



**Lagning jarðstrengja á hærri spennum
í raforkuflutningskerfinu**



FEBRÚAR 2015



SAMANTEKT

Markmið og umfang

Árið 2014 vann verkefnishópur á vegum Landsnets, með sérfræðingum á sviði jarðstrengja og jarðstrengslagna frá Íslandi og Danmörku, að umfangsmiklu rannsóknarverkefni varðandi lagningu 132 kV og 220 kV háspennustrengja á Íslandi. Markmið verkefnisins var að greina hagkvæmustu kosti við val á jarðstrengjum, lagningu þeirra og frágangi með tilliti til flutningsgetu, kerfisaðstæðna, áreiðanleika, umhverfis og kostnaðar. Verkefni sem þetta er mikilvægt fyrir Landsnet þar sem gera má ráð fyrir að jarðstrengsframkvæmdum í flutningskerfinu muni fjölga á komandi árum. Rannsóknnum tengdum jarðstrengslögnum verður haldið áfram og reynsla nýtt úr framkvæmdum sem framundan eru.

Niðurstöður verkefnisins voru settar fram í ítarlegri og fræðilegri skýrslu á ensku og er tilgangur með þessari útgáfu á íslensku að veita almennar upplýsingar um helstu niðurstöður og fjalla um jarðstrengi og lagningu þeirra á almennan og fræðandi hátt fyrir sem flesta. Tvær ólíkar og umfangsmiklar jarðstrengsframkvæmdir, sem hafa verið í umræðunni í tengslum við áætlaða raflínukosti á Sprengisandi og í Eyjafirði, voru skoðaðar sérstaklega og kostnaður þeirra metinn. Að auki er bætt við samantekt þessa áætluðum stofnkostnaði við loftlínu til samanburðar við jarðstreng í jarðstrengsframkvæmdunum tveimur sem skoðaðar voru en um þennan samanburð var ekki fjallað sérstaklega í verkefninu.

Almennar niðurstöður

Undanfarin ár hefur verið jarðstrengja fyrir hærri spennur með mikla flutningsgetu lækkað mikið, eða um allt að helming fyrir stærstu 220 kV strengi miðað við aðgengileg gögn hvers tíma. Þó svo að á sama tíma hafi ýmsir aðrir kostnaðarliðir við jarðstrengjalagnir hækkað, hefur heildarstofnkostnaður við jarðstrengslagnir lækkað á hærri spennum, en gera má ráð fyrir að innkaupsverð á jarðstreng ásamt samtengingum sé um 30-50% af heildarstofnkostnaði við 220 kV jarðstrengslögn. Verð á minni strengjum fyrir lægri spennur hefur lækkað mun minna. Ástæður verðlækkunar á stærri strengjum eru taldar nokkrar, s.s. tækniþróun í framleiðslu strengja og þrátt fyrir mikinn vöxt í eftirspurn eftir strengjum hefur framboð aukist hraðar m.a. með vaxandi þátttöku framleiðenda utan Evrópu. Ljóst er að tiltækar eru áreiðanlegri upplýsingar í dag en fyrir nokkrum árum um verð á jarðstrengjum og stofnkostnað jarðstrengjaverkefna og upplýsingarnar verða áreiðanlegri eftir því sem verkefnum fjölga.

Samtengingar strengja eru dýrar og algeng orsök bilana í strenglögnum. Því er mikið unnið með fækkun þeirra, sem þýðir að hámarka þarf lengd hvers strenghluta sem er á hverju kefli. Bæði vegir og tækjabúnaður eru takmarkandi þættir fyrir stærð og þyngd strengkefla.

Íslenska raforkukerfið er þeim annmörkum háð að skammhlaupsafl, sem er mælikvarði á styrk raforkukerfis, er lágt miðað við meginlandskerfi og að auki mjög mismunandi milli landshluta. Á Suður- og Suðvesturlandi er raforkukerfið til að mynda mun sterkara en á Norðurlandi. Skammhlaupsafl veikari hluta kerfisins mun í flestum tilvikum verða takmarkandi þáttur fyrir lengd jarðstrengja í kerfinu.

Skoðaðar voru mismunandi aðferðir sem nágrannabjóðir okkar, sem eru framarlega í jarðstrengslögnum, beita við lagningu sinna strengja og kannað hvort hugsanlega mætti bæta aðferðafræði við strenglagnir hérlandis. Niðurstaða þessara athugana var m.a. sú að hefðbundin lagning strengs í opinn skurð er ódýrasta lagningaaðferðin í langflestum tilfellum og tækifæri til aukinnar hagkvæmni hvað það varðar því takmörkuð. Til samanburðar var m.a. skoðuð lagningaraðferð sem notuð hefur verið í nýlegum jarðstrengjaverkefnum í Suður-Frakklandi þar sem rör fyrir strengi eru steypt í þröngan skurð. Kostnaður við þá aðferð er metinn um 3,5 sinnum hærri en við hefðbundna aðferð. Við sérstakar aðstæður, svo sem þveranir, í votlendi eða þéttri byggð, geta aðrar lagningaaðferðir, sem lítt eru þekktar hérlandis, komið til greina.

Kostnaður við jarðvinnu, útdrátt strengja og frágang er umtalsverður hluti stofnkostnaðar og getur verið mjög breytilegur eftir aðstæðum. Þannig getur kostnaðarmunur verið allt að þrefaldur milli hagstæðra og óhagstæra skilyrða við þennan verkþátt, sé miðað við lagningu á einu strengsetti í opinn skurð.

Eiginleiki þeirra jarðefna, sem umlykja streng í skurði, til að leiða varma frá strengnum (varmaleiðni) skiptir miklu máli varðandi flutningsgetu hans. Almennt er jarðvegur á Íslandi með minni varmaleiðni en jarðvegur í nágrannalöndunum. Stafar það m.a. af háu hlutfalli eldfjallagjóska. Til samanburðar er varmaleiðni í fylliefnum á Íslandi úr sérvöldum námum allt að helmingi minni en almennt í jarðvegi í Danmörku sem þýðir að flutningsgeta á sömu stærð strengs er að öðru óbreyttu um 30% meiri í Danmörku. Þennan mismun er mikilvægt að hafa í huga þegar kostnaður jarðstrengslagna á Íslandi er borinn saman við lagnir í öðrum löndum. Mikill ávinningur er í því fólgin að bæta varmaleiðni fylliefnis. Kannaðir voru möguleikar á því að nota önnur efni, t.d. kvars sem fellur til við iðnaðarframleiðslu innanlands, til að auka varmaleiðni í fylliefnum með strengjum og eru niðurstöður jákvæðar.

Við leiðarval jarðstrengja er mikilvægt að leggja áherslu á lágmörkun umhverfisáhrifa. Að jafnaði má gera ráð fyrir að 8-14 m breitt svæði raskist í heildina við lagningu á einu 220 kV strengsetti. Auðvelt er að endurheimta fyrri yfirborð eftir lagningu strengs í sanda, vel gróíð mólendi eða ræktarland. Liggi strengleið um skóg- eða kjarrlendi verður að skilja eftir skóglaut svæði yfir strengnum. Í hrauni eða þar sem klöpp liggur í yfirborði er ekki hægt að að koma yfirborði lands í fyrri horf. Nútímahraun njóta verndar skv. 37. gr. laga nr. 44/1999 um náttúruvernd, auk þess sem aðstæður í hrauni henta illa fyrir strenglagnir. Er því ástæða til þess að forðast strenglagnir í hrauni eins og kostur er.

Niðurstöður greiningar á tveimur jarðstrengsframkvæmdum

Gerð var lausleg greining á tveimur hugsanlegum 220 kV jarðstrengsframkvæmdum, annars vegar sem hluti raflínu yfir Sprengisand og hins vegar sem lögn í Eyjafirði sem hluti línu í austur frá Akureyri. Land- og jarðfræðilegar aðstæður strengleiðanna eru ólíkar sem og kerfislegir þættir, en þessi atriði voru metin ásamt lagningaraðferðum og kostnaður áætlaður.

Sprengisandur

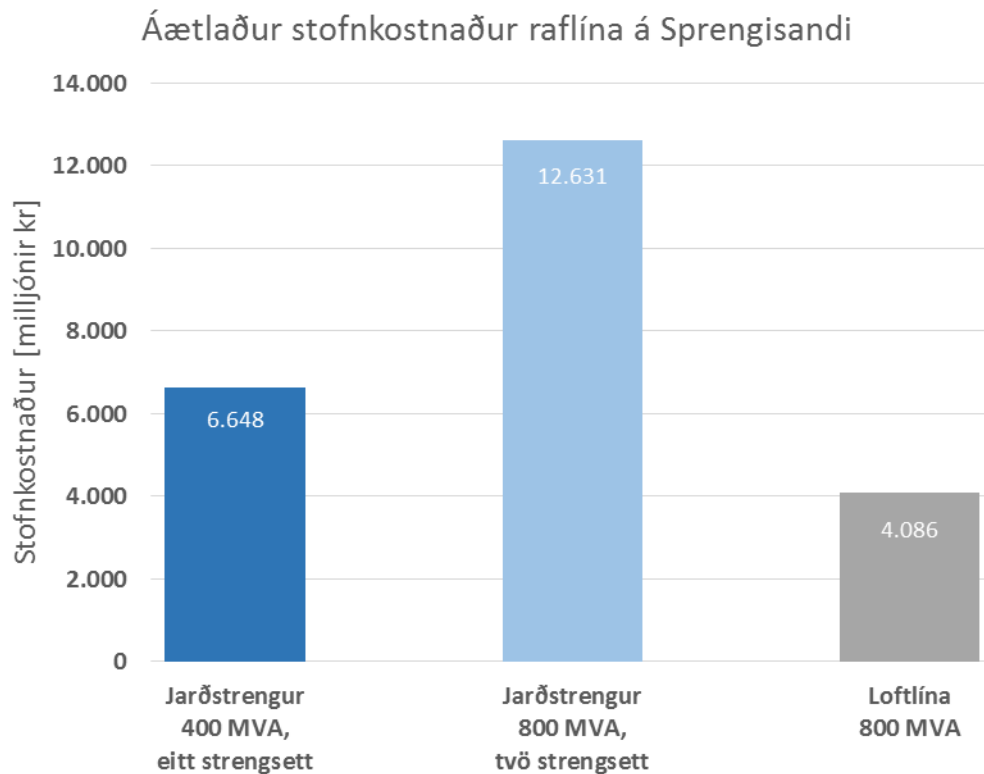
Heildarlengd línu yfir Sprengisand er um 200 km og metið var hversu langan streng væri tæknilega mögulegt að leggja á Sprengisandi við núverandi kerfisaðstæður. Strengleiðin liggur um erfitt veðursvæði, með ófullkomnu vegakerfi. Jarðfræðilegar aðstæður til strenglagnar eru ágætari en stuttur mögulegur verktími ár hvert eykur kostnað. Gert var ráð fyrir 400 MVA flutningsgetu sem grunntilfelli sem þýðir að nægjanlegt er að leggja eitt sett af stærstu gerð álstrengs. Tíu ára kerfisáætlun gerir ráð fyrir sviðsmyndum með allt að 550 MVA flutningsþörf. Þessi flutningsgeta næst ekki með einu strengsetti af álstrengjum og því er til samanburðar metinn kostnaður við að leggja tvö sett af sömu strenggerð til að auka flutningsgetuna. Þá kann að vera hagkvæmara að áfangaskipta framkvæmdum þannig að viðbótar strengsettið væri lagt síðar.

Niðurstöður útreikninga gefa til kynna að hámarks lengd á streng í línu yfir Sprengisand sé um 50 km og eru það kerfislegir þættir sem eru takmarkandi. Strengur af þeirri lengd kallar á uppsetningu sérstaks búnaðar (útjöfnunarstöðva) við báða enda hans til að mögulegt sé að reka strenginn.

Áætlaður stofnkostnaður jarðstrengslagnar á hvern kílómetra á Sprengisandi er um 133 milljónir kr/km (eitt sett af 2000 mm² Al-streng). Eftirfarandi mynd sýnir niðurstöður útreikninga á áætluðum stofnkostnaði fyrir 50 km streng á Sprengisandi. Sýndur er kostnaður fyrir bæði eitt og tvö sett. Einnig er bætt við til samanburðar áætluðum stofnkostnaði á hefðbundinni loftlínulausn með 800 MVA flutningsgetu og af sömu lengd. Eins og myndin sýnir er kostnaður við lagningu á tveimur settum í stað eins nánast tvöfaldur sem þýðir að samlegð við lagningu strengsettanna er lítil. Það þýðir að

hagkvæmt ætti að vera að áfangaskipta framkvæmdum við jarðstrengslagnir og fresta lagningu á öðru setti á meðan forsendur um flutningsþörf leyfa.

Niðurstöður á eftirfarandi mynd sýna einnig að stofnkostnaður við lagningu á einu jarðstrengssetti er um 2.500 milljónum kr. hærri en við byggingu á loftlínunni sem er til samanburðar. Lagning á tveimur jarðstrengssettum er hins vegar um 8.500 milljónum kr. dýrari en loftlínuframkvæmdin.



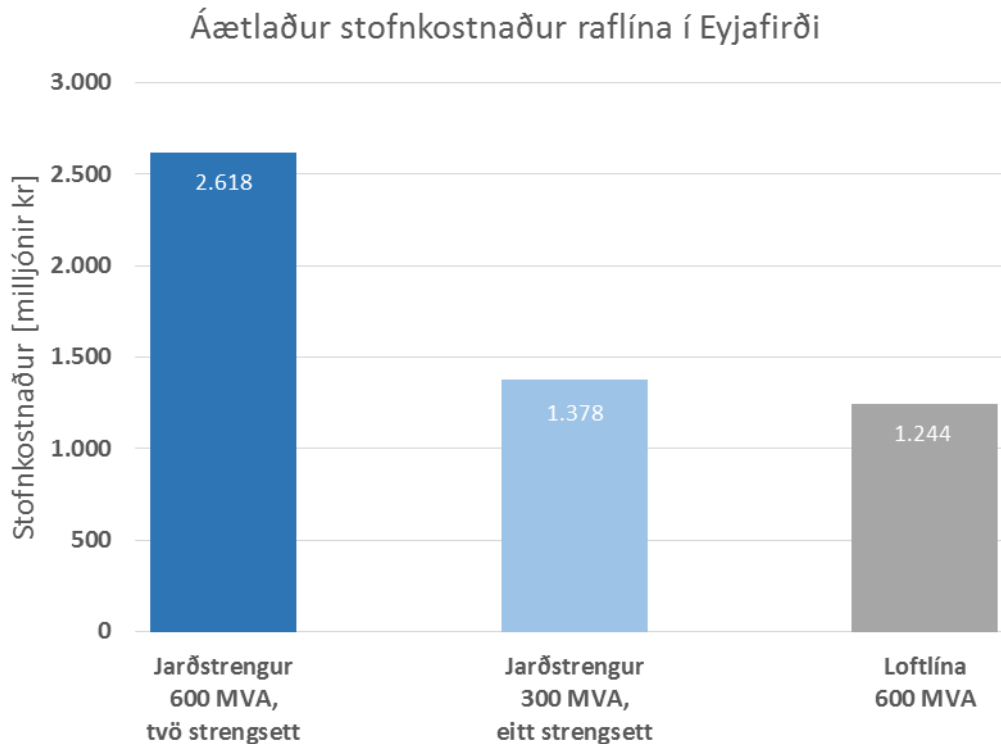
Áætlaður stofnkostnaður jarðstrengslagnar á Sprengisandi m.v. 400 MVA flutningsgetu (2000 mm² Al XLPE strengur). Til samanburðar er sýndur áætlaður kostnaður við tvö sett af strengjum og einnig við hefðbundna loftlínu með 800 MVA flutningsgetu og af sömu lengd (50 km).

Eyjafljörður

Heildarlengd áætlaðrar 220 kV línu milli Akureyrar og Kröflu er um 90 km og var lagning fyrstu 12 km línunnar framhjá Akureyri í jarðstreng skoðuð. Jarðstrengsleiðin liggur við þéttbýli, útivistarsvæði og flugvöll, þverar tvær stórar ár og votlendi. Lagning strengsins er því tæknilega nokkuð flókin. Skoðaðir voru þrír mismunandi valkostir varðandi leiðarval. Gert er ráð fyrir 600 MVA flutningsgetu sem grunntilfelli en það er áætluð flutningsþörf. Það þýðir að eitt sett af álstreng dugar ekki til að uppfylla flutningsþörf. Samt sem áður var kostnaður við að leggja aðeins eitt sett af sömu strenggerð áætlaður til samanburðar, en það getur verið valkostur að leggja fyrst aðeins eitt sett og fresta lagningu á öðru setti vegna hagkvæmnisjónarmiða.

Áætlaður stofnkostnaður jarðstrengslagnar á hvern kílómetra í Eyjafirði er á bilinu 204-240 milljónir kr./km (tvö sett af 1600 mm² Al-streng) eftir því hvaða leið er valin. Eftirfarandi súlurit sýnir niðurstöður útreikninga á áætluðum stofnkostnaði fyrir ódýrustu strengleið m.v. heildarkostnað. Sýndur er kostnaður fyrir bæði eitt og tvö sett. Einnig er bætt við til samanburðar áætluðum stofnkostnaði á hefðbundinni loftlínulausn með 600 MVA flutningsgetu en loftlínuleiðin er nokkuð lengri en jarðstrengsleiðin sem gerir jarðstrengskost hagkvæmari en ella. Eins og niðurstöður sýna er stofnkostnaðarmunur á einu jarðstrengssetti og loftlínukosti til samanburðar aðeins um 130 milljónir kr. Eins og í Sprengisandstilviki er stofnkostnaður við lagningu á tveimur jarðstrengssettum í stað eins

nánast tvöfaldur og ætti áfangangaskipting framkvæmda því að vera hagkvæm ef forsendur um flutningsþörf leyfa.



Áætlaður stofnkostnaður jarðstrengslagnar í Eyjafirði m.v. 600 MVA flutningsgetu (2 x 1600 mm² Al XLPE strengur). Til samanburðar er sýndur áætlaður kostnaður við eitt sett af strengjum. Einnig er til samanburðar hefðbundin loftlína með sambærilegri flutningsgetu en sem er 17,6 km eða nokkuð lengri en strengleiðirnar.

Niðurstöður útreikninga sýna að stofnkostnaður er um 85% af líftímakostnaði ofangreindra jarðstrengsverkefna. Ekki er hægt að yfirfæra þessa niðurstöðu beint á önnur verkefni.

Ljóst er að stofnkostnaður við jarðstrengslagnir er breytilegur eftir kerfislegum aðstæðum, jarð- og landfræðilegum þáttum, aðgengi að lagnaleið og fleiri þáttum. Því er erfitt að gefa almenn viðmiðunarverð fyrir kostnað jarðstrengslagna og mikilvægt að skoða hvert tilvik fyrir sig.

EFNISYFIRLIT

SAMANTEKT	III
EFNISYFIRLIT	VII
1 VERKEFNISLÝSING	9
1.1 Inngangur	9
1.2 Núverandi flutningskerfi Landsnets	10
1.3 Notkun jarðstrengja á heimsvísu	11
2 JARÐSTRENGIR	13
2.1 Hönnun jarðstrengja og jarðstrengskerfa	13
2.2 Lagning jarðstrengja	14
2.2.1 Þríhyrningsuppröðun	14
2.2.2 Flöt uppröðun	14
2.2.3 Segulsvið	15
2.3 Útreikningar á straumflutningsgetu	15
2.3.1 Efnisval og hönnun leiðara	16
2.3.2 Varmaviðnám og hitastig jarðvegs	18
2.3.3 Dýpt strenglagnar og fyrirkomulag	19
2.4 Val á hjálparefni og -búnaði	19
2.4.1 Spólur og háspennurofabúnaður	19
2.5 Kerfisgreining	20
2.5.1 Útjöfnunarpörf og spenna	20
2.5.2 Mælikvarði út frá straumgetu	21
2.5.3 Spennusetning og frátenging	21
2.5.4 Töþ	22
2.5.5 Lengdir strengkafli og fjöldi samsetninga	22
2.5.6 Áreiðanleiki jarðstrengskerfa	22
2.5.7 Viðhald á jarðstrengjum og viðgerðarpörf	23
3 LAGNING JARÐSTRENGJA	25
3.1 Leiðarval	25
3.2 Lagningaraðferðir	26
3.2.1 Hefðbundinn skurðgröftur	26
3.2.2 Plæging	27
3.2.3 Grafrarkassi	28
3.3 Lagning meðfram vegum	28
3.4 Þveranir	30
3.4.1 Lagnir	30
3.4.2 Ár og skurðir	30
3.4.3 Stefnumborun	31
3.5 Þjónustuslóð	32
3.6 Útdráttur og tenging strengja	32

3.7	Endabúnaður og útjöfnunarstöðvar	34
3.8	Rask og yfirborðsfrágangur	34
3.9	Varmaleiðandi strengjasandur.....	37
3.9.1	Þættir sem stjórna varmaleiðni jarðefna	37
3.9.2	Varmaleiðnieiginleikar íslenskra jarðefna	37
3.10	Möguleikar til þess að bæta varmaleiðni	39
3.10.1	Innflutningur fylliefna með lágt varmaviðnám.....	39
3.10.2	Endurunnið kvars	40
3.10.3	Varmaleiðandi steypa.....	41
3.10.4	Varmaleiðandi efja (Bentonite).....	41
4	KOSTNAÐARMAT	42
4.1	Almennt	42
4.2	Strengverð	42
4.3	Jarðvinna og lagning jarðstrengja	45
4.4	Undirbúningur, leyfismál, hönnun, eftirlit og umsjón	46
4.5	Orkutöp.....	46
4.6	Rekstur, viðhald og bilanakostnaður	47
4.7	Líftími og förgunarkostnaður	47
4.8	Aðrir þættir sem meta má til virðis.....	48
5	KOSTNAÐARGREINING TVEGGJA JARÐSTRENGSLAGNA.....	49
5.1	Almennt	49
5.2	SPRENGISANDUR.....	49
5.2.1	Skilgreining tilviks.....	49
5.2.2	Aðstæður á strengleið	50
5.2.3	Forsendur	51
5.2.4	Útreikningar og viðmið	52
5.2.5	Jarðvinna og lagning strengs	55
5.2.6	Kostnaðarmat	56
5.4	EYJAFJÖRÐUR.....	58
5.4.1	Skilgreining tilviks.....	58
5.4.2	Aðstæður á strengleið	58
5.4.3	Forsendur	60
5.4.4	Útreikningar og viðmið	61
5.4.5	Lagning strengs.....	61
5.4.6	Kostnaðarmat.....	61
	HEIMILDIR.....	64
	MYNDASKRÁ.....	65
	TEIKNINGASKRÁ	67

1 VERKEFNISLÝSING

1.1 Inngangur

Í byrjun árs 2014 setti Landsnet af stað rannsóknarverkefni varðandi lagningu 132 kV og 220 kV háspennustrengja á Íslandi. Markmið verkefnisins var að greina hagkvæmstu kosti við val á 132 kV og 220 kV jarðstrengjum, lagningu þeirra og frágangi með tilliti til flutningsgetu, kerfisaðstæðna, áreiðanleika, umhverfis og kostnaðar.

Þátttakendur í verkefninu voru auk starfsmanna Landsnets, sérfræðingar frá Energinet.dk¹ í Danmörku, Háskólanum í Reykjavík, sérfræðingar frá þremur stærstu verkfræðistofum landsins, Mannviti, Verkís og EFLU, og frá StellaCable² í Danmörku.

Helstu verkefni hópsins voru að:

- Fjalla um og skilgreina hagkvæmasta val á strenggerð, -þversniði, -lagningu og varmaleiðandi efni miðað við mismunandi flutningsgetu.
- Kanna möguleika á að lækka varmaviðnám í fylliefni með strengjum.
- Fjalla um mismunandi aðferðir við lagningu jarðstrengja, reynslu fyrirtækja erlendis af þeim aðferðum og greina kosti og galla fyrir mismunandi aðstæður á Íslandi.
- Fjalla um möguleika á að draga úr kostnaði við strenglagning, s.s. með lágmörkun slóða og fækkun á tengingum.
- Leggja fram nýtt mat á kostnaði jarðstrengjaverkefna (stofnkostnaði og líftímakostnaði) við mismunandi aðstæður og flutningsgetu.
- Fjalla um áreiðanleika jarðstrengja, þar sem m.a. er vitnað í alþjóðlega staðla.
- Fjalla um röskun lands vegna jarðstrengslagna.

Til þess að uppfylla markmið verkefnisins var ákveðið að nýta reynslu annarra þjóða, sem standa framarlega hvað varðar jarðstrengslagnir, og meta kosti og galla þarlanda aðferða við íslenskar aðstæður.

Auk almennra athugana voru tvær ólíkar og umfangsmiklar jarðstrengsframkvæmdir, sem hafa verið í umræðunni, skoðaðar sérstaklega og kostnaður þeirra metinn. Þessar framkvæmdir eru:

Sprengisandur

Lagning hluta af 220 kV Sprengisandslínu í jörð. Heildarlengd Sprengisandslínu er um 200 km og var metið hversu langan streng væri tæknilega mögulegt að leggja á Sprengisandi við núverandi kerfisaðstæður. Gert er ráð fyrir 400 MVA flutningsgetu.

Eyjafiörður

Lagning hluta af 220 kV háspennulínu milli Akureyrar og Kröflu í jörð. Heildarlengd línunnar er 90 km og var lagning fyrstu 12 km línunnar framhjá Akureyri í jarðstreng skoðuð. Jarðstrengsleiðin liggur við þéttbýli, útivistarsvæði og flugvöll, þverar stóra á og votlendi. Skoðaðir voru mismunandi valkostir varðandi leiðarval. Gert er ráð fyrir 600 MVA flutningsgetu.

¹ Rekstraraðili danska raforkuflutningskerfisins.

² Einkarekið ráðgjafafyrirtæki á sviði háspennustrengja.

1.2 Núverandi flutningskerfi Landsnets

Landsnet á og rekur allar meginflutningslínur rafmagns á Íslandi. Flutningskerfið flytur rafmagn frá framleiðendum raforku til almenningsveitna og stórnotenda um land allt og innifelur kerfið yfir 3.000 km af háspennulínunum og um 70 tengivirki. Meginhluti flutningslína Landsnets er á spennu sem er 66 kV eða hærri. Meginflutningskerfi landsins er rekið á 132 kV og 220 kV spennu. Á Suðvesturlandi eru þrjár línur sem byggðar fyrir 400 kV spennu en reknar á 220 kV og tvær slíkar línur eru á Austurlandi.

Flutningslínur eru ýmist reistar sem loftlínur eða lagðar sem jarðstrengir. Meginhluti flutningskerfisins er loftlínur og eru jarðstrengir undir 5% af heildarlengd flutningslína Landsnets. Meirihluti jarðstrengja í eigu Landsnets eru 66 kV, aðeins fáir stuttir strengir eru á 132 kV og 220 kV spennu. Í töflu 1.1 er yfirlit yfir 132 kV og 220 kV jarðstrengi Landsnets, samtals um 80 km á lengd.

Tafla 1.1. 132 kV og 220 kV jarðstrengir í eigu Landsnets³.

Nafn-spenna	Tekin í notkun	Línuheiti	KKS	Lega	Lengd [km]	Leiðara-gerð	Einangrun
132	1974	Korpuvína 1	KO1	Endi við Korpu	0,25	Al	XLPE
132	1989	Hafnarfjörður 1	HF1	Stekkur-Öldugata	2	Al	XLPE
132	1990	Hnoðraholtslína 1		Endi við Hnoðraholt	0,53	Al	XLPE
132	1991	Suðurnesjalína 1	SN1	Endi við Hamranes	0,07	Al	XLPE
220	1998	Búrfellslína 3	BU3	Endi við Hamranes	0,08	Al	XLPE
132	1998	Nesjavallalína 1	NE1	Mosfellsheiði-Korpa	15	Al	XLPE
132	2005	Stuðlalína 1	SR1	Hryggstekkur-Stuðlar	17	Al	XLPE
132	2006	Rauðavatnslína 1	RV1	Endi við A12 (Rauðavatn)	1,5	Al	XLPE
132	2007	Hafnarfjörður 1	HF1	Hamranes-Stekkur	2,6	Al	XLPE
132	2007	Fljótdalslína 2	FL2	Fljótsdalur-Brattagerði	7,1	Al	XLPE
132	2007	Hnoðraholtslína 1		Hamranes-Ásfjall	1,6	Al	XLPE
132	2009	Rangárvallalína 2	RA2	Rangárvellir-Becromal	4,43	Al	XLPE
132	2010	Nesjavallalína 2	NE2	Geitháls-Nesjavellir	24,9	Al	XLPE
132	2013	Hafnarlína 1	HA1	Ægissíða-Höfn	1,5	Al	XLPE
	Samtals				78,56		

Fram til þessa hafa ekki verið til opinberar viðmiðanir varðandi hvenær flutningslína skuli reist í lofti og hvenær lögð í jörð. Landsnet hefur því notað eftirtalin viðmið:

- Flutningslínur á 66 kV spennu: Jarðstrengislausn er að öðru jöfnu valin.
- Flutningslínur á 132 kV spennu: Jarðstrengislausnir eru skoðaðar á styttri vegalengdum og þar sem um tengingu við einstaka viðskiptavini er að ræða.

³ Landsvirkjun og Orkuveita Reykjavíkur hafa lagt nokkra 220 kV jarðstrengi, sem tengja virkjanir þeirra við flutningskerfið. Þessir strengir eru um 1 km á lengd hver og eru þeir ekki með á listanum í töflu 1.1.

- Flutningslínur á 220 kV spennu: Jarðstrengislausn er ekki tæknilega eða kostnaðarlega fýsileg. Hún kemur eingöngu til athugunar á styttri köflum og við mjög sérstakar aðstæður, t.d. ef um er að ræða einstæðar umhverfisaðstæður eða þetta íbúðabyggð.

Eins og kemur fram í töflu 1.1, hefur Landsnet einungis lagt einn stuttan 220 kV jarðstreng. Reynsla af hönnun, lagningu og rekstri strengja á svo hárrí spennu er því takmörkuð hér á landi og fékk Landsnet því Energinet.dk og StellaCable til að koma að þessu rannsóknarverkefni, en sérfræðingar frá þeim hafa víðtæka þekkingu og reynslu í hönnun og lagningu slíka strengja.

1.3 Notkun jarðstrengja á heimsvísu

Síðustu áratugina hafa flutningskerfi raforku verið byggð upp með háspennntum loftlínunum. Jarðstrengir hafa verið í boði í mörg ár, en uppbygging jarðstrengjakerfa hefur verið takmörkuð vegna kostnaðar, mikillar rýmdar og einangrunartapa strengjanna auk lakari flutningsgetu í samanburði við loftlínur.

Á síðustu árum hefur fjöldi jarðstrengja og sæstrengja í flutningskerfum aukist verulega. Þetta er að hluta til vegna þróunar í tækni og efni og stærri og stöðugri markaðar fyrir strengi. Vegna aukinnar eftirspurnar eftir raforku og vandkvæða við að byggja nýjar háspennntar loftlínur í Evrópu er talið mikilvægt að skoða möguleika á lengri jarðstrengjatengingum.

Um þessar mundir eru síauknar kröfur um að tengja endurnýjanlega orkugjafa við flutningskerfið eða að afhenda raforku til stórra notenda fjarri byggð og flutningskerfi. Í mörgum löndum getur umhverfismat og leyfisferli vegna byggingar loftlínu tekið allt að 7 til 8 ár á meðan ferli vegna jarðstrengja tekur gjarnan 1 til 2 ár. Afleiðing þess er að hægt er að byggja jarðstrengjatengingar á 2 til 3 árum á meðan 8 til 10 ár þarf fyrir loftlínu og þetta eitt og sér getur leitt til þess að hagkvæmara sé að leggja jarðstreng út frá arðsemissjónarmiðum.

Í Danmörku hefur raforkuframleiðsla breyst verulega vegna stöðu landsins gagnvart flutningi raforku milli Skandinavíu og meginlands Evrópu, auk mikillar fjölgunar vindorkuvera á hafi úti og staðbundinnar raforkuframleiðslu með endurnýjanlegum orkugjöfum. Danir þurftu því að gjörbreyta stefnu sinni varðandi styrkingu flutningskerfisins. Árið 2007 setti orku- og samgönguráðherra Dana á fót nefnd til að endurskoða uppbyggingu raforkukerfisins. Nefndinni var ætlað að skila skýrslu um framtíðaruppbyggingu danska flutningskerfisins (1).

Á grundvelli niðurstaðna þessarar nefndar tók danska stjórnin, árið 2009, fyrst allra í heiminum, skref í áttina að flutningskerfi sem byggt yrði upp á jarðstrengjum. Valið stóð á milli sex lausna, allt frá því að vera eingöngu með jarðstrengi á 132 til 400 kV yfir í að byggja ekki frekar við flutningskerfið. Eftir óháða greiningu á þessum sex lausnum valdi danska stjórnin, með þátttöku allra stjórnmálaflokka, lausn sem kölluð var valkostur C með áætlaðan kostnað upp á 2,3 milljarða evra (2). Helstu atriði þeirrar lausnar eru eftirfarandi:

- Nýjar 400 kV línur verða lagðar sem jarðstrengir.
- Meginflutningslínan gegnum Jótland (400 kV lína) verður styrkt með nýrri gerð mastra.
- Núverandi 400 kV flutningsnet mun standa áfram en skoðað verður að breyta einstökum köflum með nýrri línuleið, nýjum möstrum eða lagningu í jörð.
- Nýjar og núverandi 132 kV og 150 kV línur verða allar lagðar í jörð í áföngum.

Í kjölfar ákvörðunar Dana og vegna aukinnar vinnslu endurnýjanlegrar vindorku á sjó hefur fjöldi jarðstrengja aukist í mörgum öðrum löndum. Af þeirri ástæðu hefur mikil vinna verið unnin á alþjóðavettvangi við að leysa sum þeirra tæknilegu vandamála sem felast í stóru neðanjarðarflutningskerfi.

Fyrir flesta háspennna jarðstrengi þarf launaflsvirki við annan eða báða endana og í sumum tilfellum þar á milli líka. Skoða þarf kerfislega þætti vegna áhrifa slíkra jarðstrengja á flutningskerfið. Um er að ræða marga tæknilega þætti, ýmist vegna kerfa sem hafa einungis jarðstrengi en einnig þar sem er blanda af jarðstrengjum og loftlínunum. Vinnuhópur C4.502 hjá CIGRE hefur gert mjög umfangsmikinn tæknilegan bækling: *Power system technical performance issues relating to the application of long HVAC cables* (2). Þetta skjal lýsir mörgum tæknilegum þáttum sem þarf að hafa í huga við kerfislega hönnun.

Verið er að skoða mörg af ofan nefndum tæknilegum vandamálum í hverju landi fyrir sig. Nýlega tilkynnti RTE⁴ að í raun væri ekki um neinar tæknilegar hindranir að ræða í þeirra kerfi. Hins vegar segir RTE að stofnkostnaður háspenntra jarðstrengja sé enn þá mun hærri en loftlína og að með aukinni notkun háspenntra jarðstrengja muni andstaða almennings gagnvart þeim aukast. Þetta á einkum við í dreifbýli þar sem bændur vilja oft frekar fá loftlínu en jarðstreng (4). Þrátt fyrir þetta fer jarðstrengjum fjölgandi og í síðustu skýrslu vinnuhóps B1.47 hjá CIGRE (júní 2014) er talað um 45 ný jarðstrengjaverkefni í heiminum sem uppfylla kröfur vinnuhópsins um langa háspennna AC jarðstrengi.⁵

⁴ RTE, Réseau de transport d'électricité, er flutningsfyrirtækið í Frakklandi. Líkt og Landsnet á Íslandi er RTE eigandi flutningskerfisins og ábyrgt fyrir rekstri kerfisins í Frakklandi og hefur verið að auka hlutdeild jarðstrengja í kerfinu síðastliðin 5 ár.

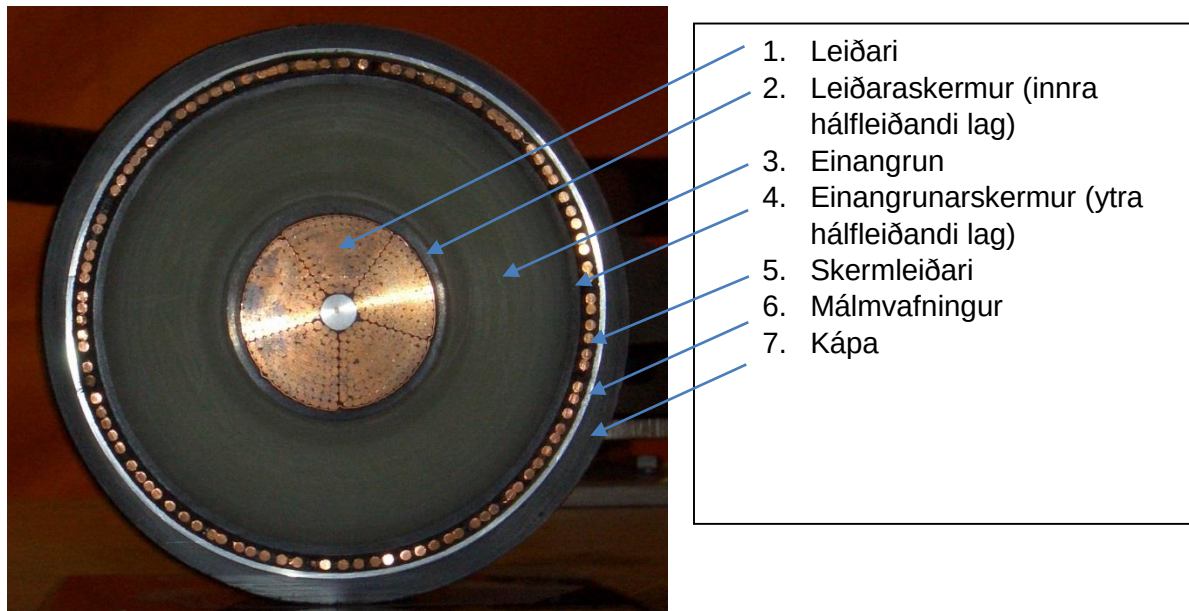
⁵ Í drögum að skýrslu vinnuhóps B1.47, eru langir AC jarðstrengir skilgreindir sem AC jarðstrengir þar sem taka þarf álagið vegna rýmdarstrauma með í reikninginn við kerfislega hönnun. Í mið Evrópu væri dæmigert um að ræða 40 km fyrir spennur lægri en 220 kV og 20 km for 220 kV og hærra.

2 JARÐSTRENGIR

2.1 Hönnun jarðstrengja og jarðstrengskerfa

Þessi kafli gefur stutt yfirlit yfir hönnun jarðstrengja fyrir spennustigin 132 kV og 220 kV sem hér eru til umfjöllunar.

Uppbygging hefðbundins einfasa jarðstrengs er sýnd á mynd 2.1 hér að neðan:



Mynd 2.1. Dæmigerður 220 kV strengur með mikilli flutningsgetu.

Strengurinn, sem sýndur er á mynd 2.1, er gerður fyrir mikinn straumflutning með lagskiptum koparleiðara. Helstu hlutar strengsins, sem sýndir eru á myndinni, eru:

1. Leiðari. Hann hefur það meginhlutverk að mynda leiðandi rás fyrir strauminn sem flytja á um strenginn. Leiðarinn er yfirleitt úr áli eða kopar. Kopar er mun betri leiðari en ál og því er flutningsgeta koparstrengs mun meiri en álstrengs með sama þverskurðarflatarmál leiðara.
2. Leiðaraskermur, gerður úr hálfleiðandi efni.
3. Einangrun. Algengast er að hún sé úr krossbundnu pólýetýleni, skammstafað XLPE. Þetta er efni sem hefur hátt einangrunargildi, er sveigjanlegt og endingargott.
4. Einangrunarskermur, gerður úr hálfleiðandi efni.
5. Skermleiðari, búinn til úr vírum sem spunnir eru utan um einangrunina. Algengast er að þessir vírar séu úr kopar þó að sífellt færist í vöxt að notuð sé álþynna. Hlutverk skermleiðarans er að eyða rafsviðinu í kringum strenginn og mynda bakrás fyrir rýmdarstraum strengsins. Við bilun í einangrun strengsins myndar hann líka leið fyrir skammhlaupsstrauminn til jarðar.
6. Málmvafningur, dregur úr hættu á að vatn komist inn í strenginn.
7. Kápa, ver strenginn fyrir ytri áhrifum, s.s. raka og tæringu. Einangrar líka skermleiðarann frá jörðu.

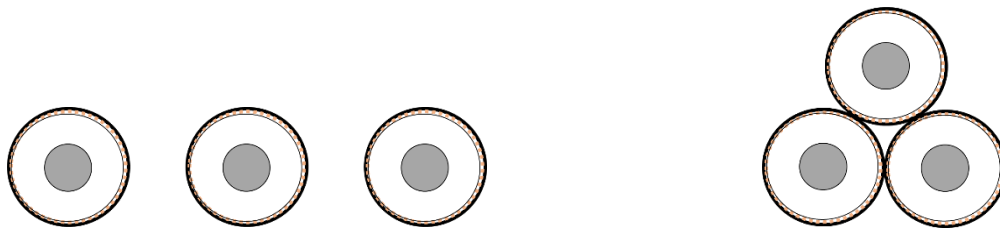
Listinn hér að ofan er engan veginn tæmandi upptalning því margar útfærslur eru mögulegar; allt eftir kröfum og aðstæðum hverju sinni. Til dæmis getur strengur verið umlukinn stálkápu ef mikil ytri áraun er á hann. Slíkt er til dæmis mjög algengt þegar sæstrengir eiga í hlut.

Á hönnunarstigi þarf að meta allar mögulegar útfærslur í hverju tilviki fyrir sig út frá þeim kröfum sem kerfið, sem strengurinn á að þjóna, kallar á.

Varðandi val á strengtegund fyrir hvert verkefni er fyrsta skilyrðið nauðsynleg flutningsgeta. Hún er fundin með kerfisgreiningum sem byggja meðal annars á núverandi kerfi og álagi ásamt spá um álagsþróun. Aðrir þættir hönnunarinnar byggja svo á þessum forsendum auk þátta eins og strenglengdar, skammhlaupsafls o.s.frv.

2.2 Lagning jarðstrengja

Í þriggja fasa kerfi er hægt að leggja strengina á ólíka vegu. Í Evrópu er algengast að leggja þá í flata uppröðun eða þríhyrningsuppröðun, sbr. mynd 2.2.



Mynd 2.2. Flöt uppröðun (til vinstri) – þríhyrningsuppröðun (til hægri).

Í þríhyrningsuppröðun eru leiðararnir þétt upp að hver öðrum en í flatri uppröðun er mögulegt að stilla af fjarlægðina milli leiðaranna.

2.2.1 Þríhyrningsuppröðun

Strengirnir fyrir fasana þrjá lagðir eins þétt saman og kostur er til þess að lágmarka spanviðnám strenglagnarinnar. Styrkur segulsviðsins fyrir ofan strenginn, vegna straumsins sem um hann rennur, er talsvert lægri en í flatri uppröðun. Skurðurinn, sem strengurinn er lagður í, er einnig mjórri en fyrir flata uppröðun þannig að þessi uppröðun hentar frekar á þéttbýlum svæðum.

Hitalosun frá fasaleiðurunum getur hins vegar orðið vandamál í þessu fyrrikomulagi. Leiðararnir eru í náinni snertingu hver við annan þannig að hiti frá einum hefur áhrif á hitamyndunina í hinum tveimur. Þetta hefur skerðandi áhrif á flutningsgetuna svo að í þríhyrningsuppröðun þarf að jafnaði strengi með meira þverskurðarflatarmál en við flata uppröðun til þess að ná sömu flutningsgetu.

Til þess að draga úr þessum varmaskiptum milli fasaleiðaranna er hægt að auka fjarlægðina milli þeirra. Það getur þó verið erfiðleikum bundið að halda þeirri fjarlægð yfir alla strengleiðina nema notaður sé einhvers konar steypdur kassi sem búið er að bora í gót fyrir fasaleiðarana. Spanviðnámið eykst líka þegar fjarlægðin milli fasaleiðaranna er aukin.

2.2.2 Flöt uppröðun

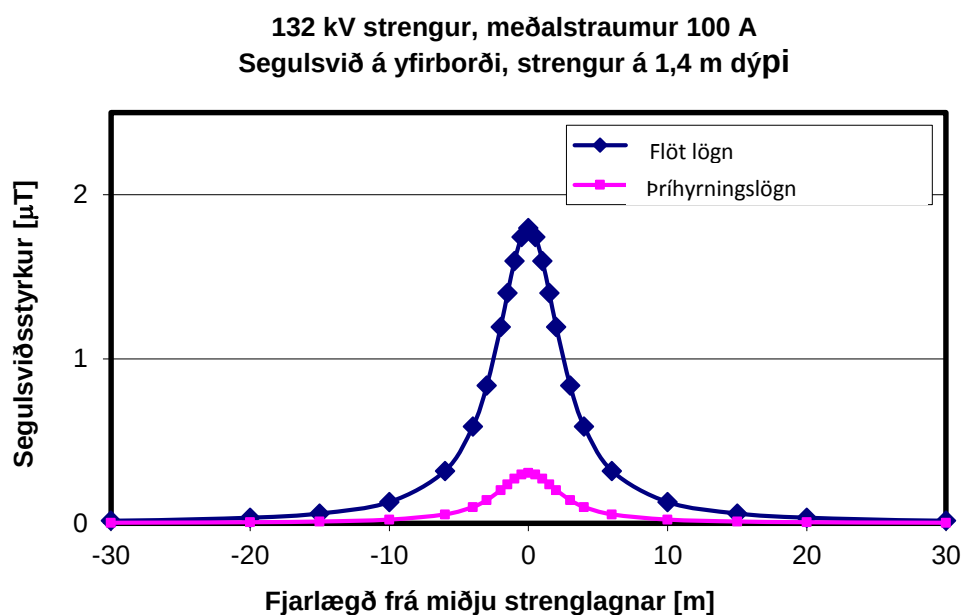
Fasaleiðararnir þrír eru lagðir hlið við hlið í láréttu plani með föstu millibili. Bilið milli leiðaranna veldur minni varmaskiptum milli leiðaranna en raunin er í þríhyrningsuppröðuninni.

Ef skermleiðarinn er jarðtengdur í báða enda strengsins getur straumurinn, sem spanast í honum, haft neikvæð áhrif á flutningsgetu strengsins, þ.e. dregið úr henni. Til þess að vinna á móti því er hægt að jarðtengja annan enda skermleiðarans og hafa hinn opinn (ótengdan en þó tengdan við yfirspennuvara). Þessi aðferð hentar þó einungis fyrir styttri strengi vegna þess að spennan, sem spanast upp í skermleiðaranum, getur orðið mjög há á ótengda endanum. Fyrir lengri vegalengdir verður að víxltengja skermleiðarann og þar með er næstum búið að

eyða algerlega spanaða straumnum í skermleiðaranum. Þessi uppröðun er mjög algeng fyrir lengri vegalengdir í dreifbýli.

2.2.3 Segulsvið

Styrkur segulsviðs umhverfis jarðstrengi veltur á uppröðun fasaleiðaranna, dýpt í jörðu og straumnum sem rennur um strenginn. Við strenglagnir í þéttbýli verður þríhyrningsuppröðun venjulega fyrir valinu. Ástæðan er ekki eingöngu takmarkað rými heldur einnig það að lágmarka segulsvið. Dæmi um útreiknaðan styrk segulsviðs í jarðstrengjakerfum með 100 A meðalstraum er sýnt á mynd 2.3.



Mynd 2.3. Samanburður á segulsviði umhverfis 132 kV strengi sem lagðir eru í flata uppröðun og þríhyrningsuppröðun. Meðalstraumur er 100 A.

2.3 Útreikningar á straumflutningsgetu

Til þess að meta lágmarksstærð jarðstrengs þarf að reikna straumflutningsgetu hans miðað við kröfu um aflflutningsþörf. Slíkir útreikningar eru jafnan byggðir á stöðluðum aðferðum, til dæmis eins og lýst er í staðlinum IEC 60287.

Í þessum útreikningum er það yfirleitt straumurinn í leiðaranum eða rekstrarhitastig (hámark) leiðarans sem er óþekkt stærðin. Venjulega aðferðin er sú að ákvarða leyfilegan hámarkshita leiðarans og reikna svo hámarksstrauminn út frá því til þess svo að finna hámarksaflflutningsgetu. Af þessum sökum er flutningsgetan oft kölluð hitaflutningsgeta strengsins. Þegar verið er að ræða og bera saman hitaflutningsgetu ólíkra jarðstrengslagna er afar mikilvægt að skilgreina hvernig rekstri strengsins verður háttað því skilgreining á hitaflutningsgetu veltur á því hvernig rekstrinum er háttað. CIGRÉ hefur lagt til, í skýrslu nr. 338 (3), eftirfarandi flokkun á hitaflutningsgetu:

- **Málflutningsgeta eða samfelld flutningsgeta** er algengasta viðmiðið. Gert er ráð fyrir að álagið sé samfelld og málflutningsgetan er hámark samfelldrar straumflutningsgetu við tilgreint stöðugt ástand.
- **Lotubundin flutningsgeta** gerir ráð fyrir því að álagið breytist með reglulegum hætti þannig að strengurinn nái að kólna milli álagstoppa. Á þennan hátt er hægt að reka strenginn á hærri hitastigi en ef miðað er við málflutningsgetu.

- **Skammtíma flutningsgeta** er sá eiginleiki strengsins að geta flutt tiltölulega mikið álag í skamman tíma án þess að hitastigið fari yfir hönnunarhitastig strengsins.
- **Rauntíma flutningsgeta** er hámarkslestunin á hverjum tíma, með tilliti til aðstæðna á hverjum tíma (jarðvegshita, raka o.fl.). Þetta er oft kallað kvik flutningsgeta.

Samfelldur rekstur með stöðugu flæði setur strangari kröfur varðandi leyfilegan hita en ef um lotubundinn rekstur er að ræða. Hámarkshiti á leiðara riðstraumssstrengs með XLPE-einangrun við samfelldan rekstur er yfirleitt gefinn upp sem 90°C. Það er þó vel þekkt að reikna flutningsgetu strengs miðað við lægra hámarkshitastig til þess að koma í veg fyrir að jarðvegurinn umhverfis strenginn þorni upp við eðlilegan rekstur. Hitastigið utan á kápu strengsins er sá þáttur sem er takmarkandi varðandi uppþornun jarðvegsins. Hefðbundið viðmið er 50°C hámarkshiti á kápu við samfelldan rekstur en nýrri rannsóknir (4), gefa vísbendingar um að uppþornun hefjist ekki fyrr en hitastigið nálgast 60°C. Franska flutningsfyrirtækið RTE miðar við 60°C hámarkshita á veturna og 55°C á sumrin. Hærra hitastig er þó leyfilegt í skemmri tíma án þess að hætta sé á uppþornun. Efnisgerð, hita- og rakastig jarðvegsins umhverfis strenginn (fylliefnið og upprunalegur jarðvegur), hefur þó afgerandi áhrif hvernig gengur að leiða burt hitann og þarf að meta leyfilegt hámarkshitastig í hverju tilviki fyrir sig. Uppþornun getur valdið vandræðum því varmaflutningseiginleikar jarðvegsins minnka, varmaeinangrunin eykst og leiðarahitastigið getur líka aukist.

Eins og kemur fram hér að ofan eiga hitatölurnar þar við um samfelldan rekstur. Danska flutningsfyrirtækið Energinet.dk hefur ólík viðmið fyrir strengi í meginflutningskerfinu annars vegar og strengi sem flytja orku frá orkuverum inn í meginflutningskerfið hins vegar. Fyrir strengi í samfelldum rekstri er viðmiðunin 50°C hiti utan á kápunni með leyfilegu hitarisi upp í 60°C í allt að 40 klukkustundir. Í sérstökum neyðartilfellum leyfa strengframleiðendur allt að 105°C leiðarahita í skamman tíma. Þetta þýðir í raun að ef meginhlutverk strengsins er lotubundinn rekstur (til dæmis flutningur orku frá vindorkuveri inn í meginflutningskerfið) er flutningsgeta strengsins talsvert meiri en ef um er að ræða streng sem ætlaður er til samfellds rekstrar því reka má hann á hærri hita því strengurinn fær tíma til að kólna á milli álagstoppa.

Þær strenglagnir, sem eru til umfjöllunar í þessari skýrslu, eru hluti af miðlæga flutningskerfinu og því þarf að miða við málflutningsgetu. Til þess að forðast uppþornun jarðvegsins umhverfis strengi má hitastigið utan á kápunni, miðað við íslenskar aðstæður, ekki fara yfir 50°C í samfelldum rekstri. Þetta svarar til þess að útreiknaður hiti á leiðara sé um 65°C þar sem hitafall frá leiðara að kápu er um 15°C. Á þann hátt er áhættunni á uppþornun og hitarisi í efninu umhverfis strenginn, og þar með hættu á skemmdum á strengnum, haldið í skefjum.

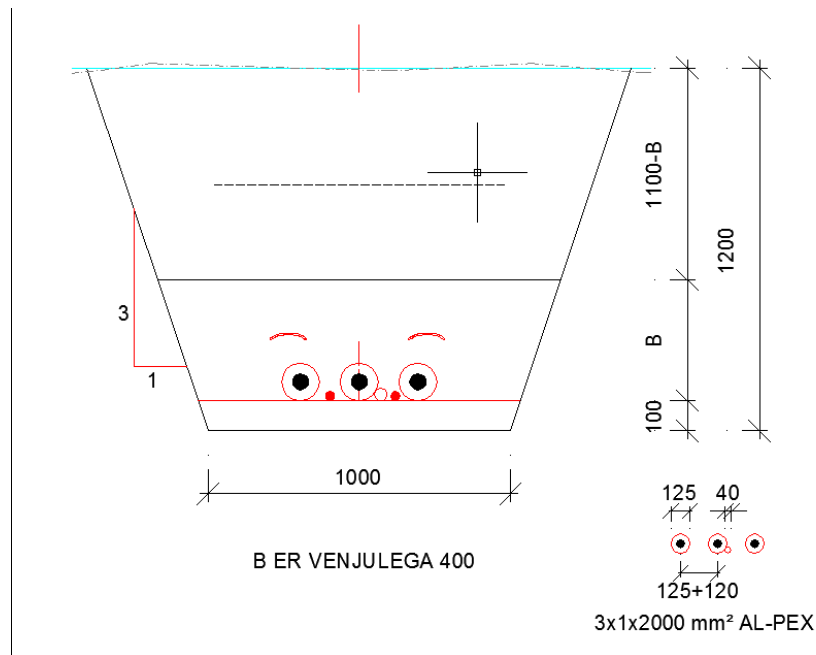
2.3.1 Efnisval og hönnun leiðara

Eins og fram kemur í kafla 2.1 eru leiðarar í jarðstrengjum yfirleitt annaðhvort úr áli eða kopar. Viðnámið í leiðaranum ræðst af efninu og þvermáli leiðarans en einnig af hönnun leiðarans; þ.e. gegnheill, spunninn, lagskiptur o.s.frv.

Þverskurðarflatarmál 132 kV og 220 kV jarðstrengja eru að miklu leyti staðlaðar stærðir. Í Evrópu eru stærðirnar frá 300 mm² og strengirnir eru til í 400 mm², 500 mm², 630 mm², 800 mm², 1000 mm², 1200 mm², 1400 mm², 1600 mm² og 2000 mm². Einhverjir framleiðendur bjóða jafnvel upp á strengi með 2500 mm² þverskurðarflatarmál og þeim fer fjölgandi. Þessi stærð er þó ekki notuð nema í sérstökum tilvikum enda eru svo stórir strengir þungir og lítt meðfærilegir og það getur haft áhrif á heildarkostnaðinn.

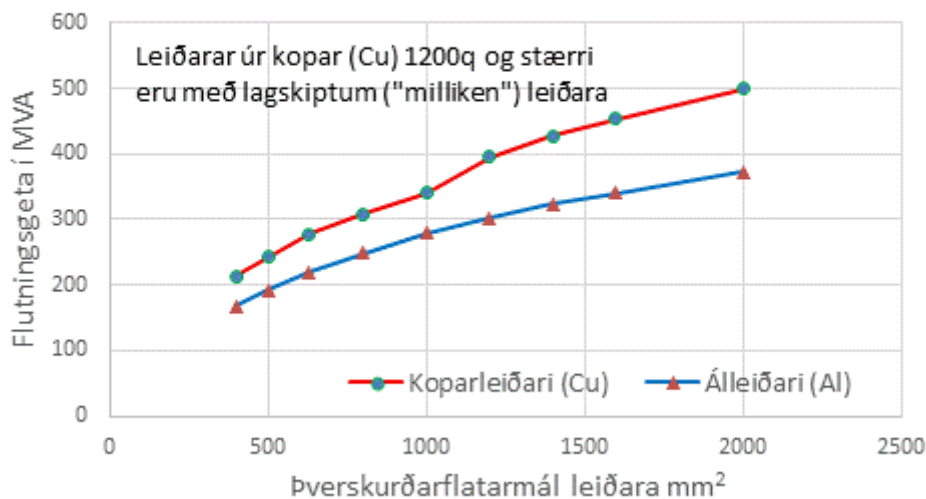
Á mynd 2.5 má sjá dæmigerð gildi flutningsgetu 220 kV jarðstrengja, reiknuð út frá straumgetu og skölunarstuðlum úr töflum framleiðenda (5), og hvernig þau gildi eru háð þverskurðarflatarmáli leiðara frá 400 mm² upp í 2000 mm², fyrir bæði ál- og koparleiðara. Gildin á myndinni eru reiknuð út miðað við 10°C umhverfishita, varmaviðnám jarðvegs 1,5 K*m/W og koparskermleiðara 95 mm². Mynd 2.4 sýnir fyrirkomulagið og umhverfið sem þessir útreikningar byggja á. Enn fremur er gert ráð fyrir að strengurinn sé í samfelldum rekstri með

hámarkshita á leiðara 65°C , lagður í flata uppröðun með fjarlægðinni $(120 + D)$ milli einleiðarastrengja og skermleiðarana krosstengda þar sem D er þvermál eins einleiðarastrengs (leiðari með einangrun og kápu, einn fasi).



Mynd 2.4. Dæmigerður skurður og lagning strengleiðara.

220 kV jarðstrengir - flutningsgeta



Mynd 2.5. Útreiknuð flutningsgeta 220 kV jarðstrengja (ál og kopar) miðað við mismunandi þverskurðarflatarmál og við dæmigerðar aðstæður.

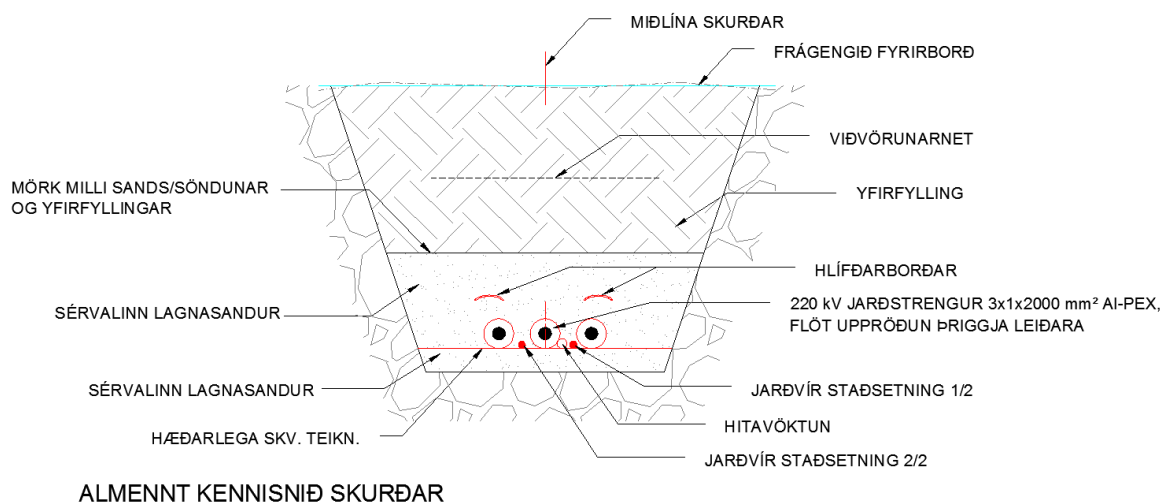
Samkvæmt þessum tölum er hámarksflutningsgeta 2000 mm^2 álstrengs á 220 kV um það bil 373 MVA og um það bil 500 MVA ef um koparstreng er að ræða. Lítils háttar munur getur verið milli framleiðenda.

Ef flutningsþörfin er til dæmis meiri en 600 MVA fyrir þær umhverfis- og jarðvegsaðstæður sem að ofan greinir þarf að nota tvö sett af annaðhvort 1400 mm^2 álstrengjum eða 800 mm^2

koparstrengjum. Í þessu tilviki myndi eitt sett af 2500 mm² koparstreng ekki nægja því að metin flutningsgeta þess er um það bil 546 MVA.

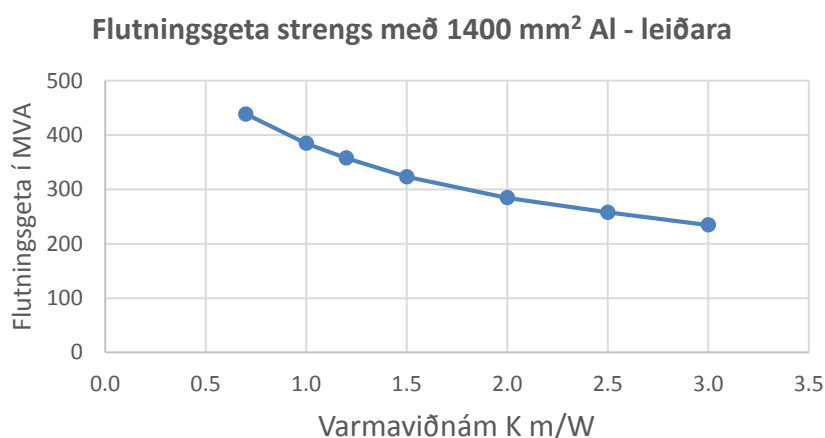
2.3.2 Varmaviðnám og hitastig jarðvegs

Mynd 2.4 sýnir helstu kennistærðir dæmigerðs skurðar fyrir jarðstreng en mynd 2.6 sýnir nánari útskýringu á helstu þáttum sem skipta máli. Einn mikilvægasti þátturinn er varmaleiðandi fylliefnið sem umlykur strenginn og er næst honum. Þetta er sérstaklega mikilvægt hér á landi vegna þess að reikna má með háu varmaviðnámi jarðvegsins sem fyrir er (sjá frekari umfjöllun í kafla 3.9. Við slíkar aðstæður eykur fylliefni með betri varmaleiðni flutningsgetu strengsins verulega.



Mynd 2.6. Útskýring á helstu þáttum sem skipta máli varðandi strengskurð.

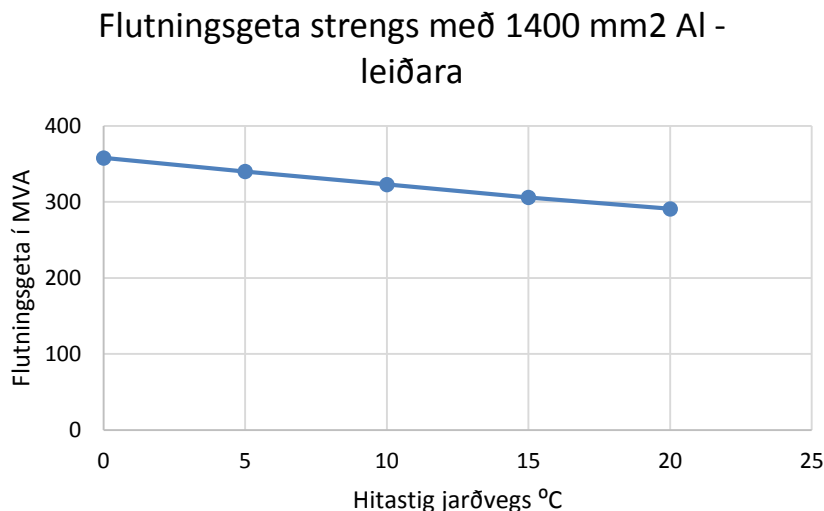
Af þessum sökum er mikilvægt að meta tiltæk fylliefni þegar hagkvæmasta þverskurðarflatarmál leiðara er fundið í hönnunarferlinu. Á mynd 2.7 er sýnt hvernig flutningsgeta 1400 mm² álstrengs er háð varmaviðnámi fylliefnisins, miðað við frágang eins og hér hefur verið sýnt.



Mynd 2.7. Flutningsgeta 220 kV, 1400 mm² Al strengs sem fall af varmaviðnámi fylliefnis.

Þegar varmaviðnámið er 1,5 K*m/W er útreiknuð flutningsgeta strengsins um 323 MVA en lækkar niður í 235 MVA ef viðnámið hækkar í 3 K*m/W sem þýðir að flutningsgetan er 27% lægri. Ef varmaviðnámið er hins vegar 0,7 K*m/W er flutningsgetan 438 MVA eða 36% hærri en við 1,5 K*m/W.

Hitastig jarðvegsins hefur einnig þýðingu fyrir flutningsgetuna eins og sjá má á mynd 2.8.



Mynd 2.8. Flutningsgeta 220 kV, 1400 mm² Al strengs sem fall af hitastigi jarðvegs.

Miðað við 323 MVA flutningsgetu við 10°C jarðvegshita, sem er nálægt meðalhita að sumarlagi hér á landi, verður flutningsgetan ekki nema 291 MVA við 20°C sem er nálægt meðalhita að sumarlagi í Evrópu. Á Sprengisandi má gera ráð fyrir að meðalhiti jarðvegs að sumarlagi sé 5°C sem þýðir að flutningsgeta þessa strengs er 340 MVA.

2.3.3 Dýpt strenglagnar og fyrirkomulag

Skilgreina þarf dýpt strenglagnarinnar og fyrirkomulag með tilliti til strengleiðarinnar. Að jafnaði er miðað við að strengurinn sé á 1,0 til 1,2 m dýpi og það talið veita honum næga vörn. Lágmarksdýpt er oft tiltekin í reglugerðum en að auki geta sérstakar aðstæður á strengleiðinni haft áhrif á kröfur varðandi lágmarksdýpt. Aukin dýpt þýðir að jafnaði lækkaða flutningsgetu strengsins, til dæmis minnkar flutningsgetan um u.þ.b. 5% við það að auka dýptina úr 1 m í 1,5 m. Mál tengd lagningunni sem slíki eru til nánari umfjöllunar í kafla 3.

Eins og nefnt er í kafla 2.2 eru jarðstrengir aðallega lagðir í flata uppröðun eða þríhyrning. Helstu kostir þríhyrningsuppröðunar umfram flata uppröðun eru lægra spanviðnám og minni þörf fyrir rými. Flöt uppröðun hefur aftur á móti meiri flutningsgetu. Dæmigert er að strengur með flatari uppröðun hafi um 6,5% meiri flutningsgetu en strengur í þéttri þríhyrningsuppröðun.

2.4 Val á hjálparefni og -búnaði

2.4.1 Spólur og háspennurofabúnaður

Þar sem lagðir eru langir jarðstrengir á hárri spennu er mjög líklegt að setja þurfi upp búnað til útjöfnunar á launaflí (þ.e. spólur) vegna mikillar rýmdar í jarðstrengjum sem valdið getur mikilli spennuhækkun. Þessi áhrif eru áberandi í þeim tilvikum sem strengir eru lítið lestaðir, þ.e. undir litlu álagi.

Fyrsti kostur hvað varðar staðsetningu útjöfnunarspólu er í næsta tengivirki við strengendann. Ef strenghlutinn er á milli tveggja loftlínukafla er næsti kostur sá að tengja spólurnar við enda strengsins. Ef útjöfnunarþörfin er mikil gæti reynst nauðsynlegt að skipta útjöfnuninni í tvo eða fleiri hluta og tengja við báða enda strengsins og jafnvel á einum eða fleiri stöðum á sjálfri strengleiðinni. Endanleg ákvörðun um stærð, fjölda, útfærslu og staðsetningu útjöfnunarspóla ræðst af eiginleikum kerfisins og rekstraraðstæðum í hverju tilviki.

2.5 Kerfisgreining

Nauðsynlegt er að framkvæma sérstaka kerfisgreiningu í hverju tilviki fyrir sig. Í þessum kafla er sjónum beint að helstu þáttum sem huga þarf að í kerfisgreiningum í jarðstrengjaverkefnum.

2.5.1 Útjöfnunarpörf og spenna

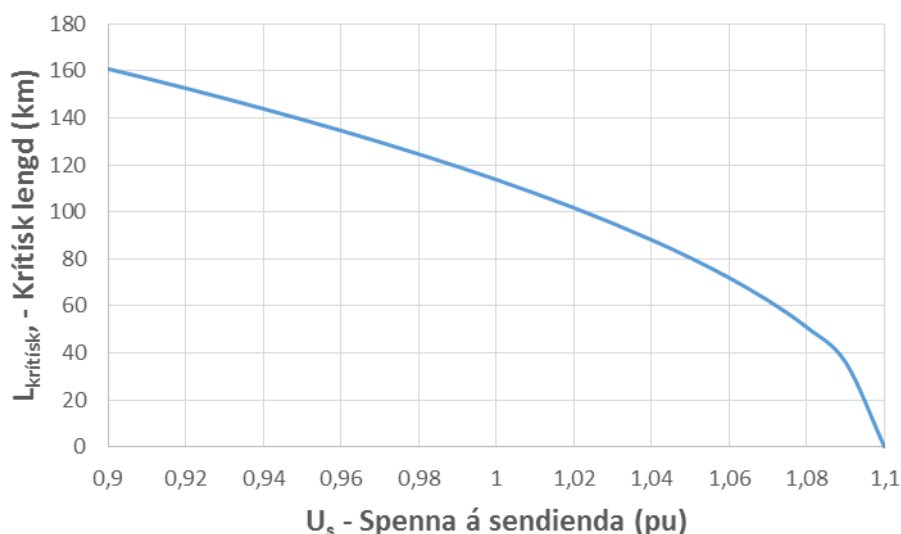
Þegar spenna er sett á jarðstreng framleiðir hann launafl á sama hátt og þéttir. Launaflsframleiðslan eykst línulega með lengd strengsins og er í hlutfalli við spennuna í öðru veldi. Spanviðnámið í jarðstrengnum eyðir hluta af þessu launaflí ef straumur rennur um strenginn. Þetta þýðir í raun og veru að launaflsframleiðsla jarðstrengs er afar háð spennunni og álaginu sem strengurinn annar (þ.e. straumnum sem um hann flæðir).

Launafl krefst hluta af heildarflutningsgetu jarðstrengsins og dregur þar með úr getu hans til þess að flytja raunafl, þ.e. þann hluta aflsins sem skilar vinnu. Aðalvandamálið eru þó áhrif launaflsins á spennuna í kerfinu því að launaflíð, sem strengurinn framleiðir, getur valdið óásættanlegri hækkun spennu í kerfinu. Skammhlaupsafl kerfisins (eða styrkur þess) hefur mikla þýðingu í þessu sambandi. Hátt skammhlaupsafl þýðir sterkt kerfi og takmörkuð áhrif launaflsins á spennuna. Í íslenska raforkukerfinu er skammhlaupsaflíð víða lágt og mikil launaflsframleiðsla getur því haft veruleg áhrif á spennuna.

Til þess að leysa þennan vanda þarf að grípa til útjöfnunar af einhverju tagi. Algengast er að setja upp hliðtengdar spólur sem hafa það eina hlutverk að eyða launaflinu sem myndast í strengnum. Stærð og staðsetningu slíks búnaðar þarf að velja af kostgæfni. Hann þarf að veita nauðsynlega útjöfnun yfir allt vinnusvið strengsins, þ.e. frá lágálagstilviki yfir í háálagstilvik. Sérstakan gaum þarf að gefa því tilviki þegar strengurinn er spennusettur, þ.e. annar endi tengdur og hinn opinn. Við þær aðstæður getur spennan á opna endanum orðið mjög há; jafnvel hærri en búnaður á þeim enda þolir. Til þess að ráða við þetta gæti þurft að nota þrepskipta spólu. Enn fremur gæti þurft að setja þær takmarkanir að ekki megi spennusetja strenginn nema frá öðrum endanum. Þetta gæti átt við þar sem verulegur munur er á skammhlaupsaflinu milli tengipunkta strengsins. Virkasta staðsetning fyrir útjöfnunarspólur er við enda strengsins. Oft geta þó aðstæður krafist þess að spólurnar séu settar upp í nálægu tengivirki. Rekstrarspenna og lengd strengsins geta enn fremur kallað á að setja þurfi upp útjöfnunarspólur með jöfnu millibili á strengleiðinni.

Einn mælikvarði til þess að meta mögulega hámarkslengd jarðstrengs (krítíska lengd) er að horfa á spennunuminn milli enda hans. Þegar strengurinn er spennusettur frá öðrum endanum (sendiend) má spennan á hinum endanum (þ.e. opna endanum eða móttökuendanum) ekki fara yfir 10% af málspennu til þess að búnaður skemmist ekki. Það veltur því á því hvað hægt er að ná spennunni á sendiendanum, U_s , langt niður hversu langur strengurinn getur verið.

Samhengi krítískrar lengdar jarðstrengs og spennu á sendiend, að því gefnu að spennan á móttökuenda sé í hámarki, þ.e. 10% yfir málspennu, er sýnt á mynd 2.9.



Mynd 2.9. Krítísk lengd jarðstrengs sem fall af spennu á sendiend. Spenna á móttökuend er 10% yfir málspennu (1,1 pu).

Spennan á sendiend ræðst af ýmsum þáttum, til dæmis skammhlaupsaflinu á staðnum og möguleikum á því að stýra spennunni, til dæmis með nálægum rafölum. Hærra skammhlaupsafl veldur því að auðveldara er að stýra spennunni og halda henni nægilega lágrí til þess að hægt sé að ná meiri krítískri lengd.

Spennuhækkun vegna launaflsframleiðslunnar er í réttu hlutfalli við framleitt launafl og í öfugu hlutfalli við skammhlaupsafl, þ.e. því hærra sem skammhlaupsafl er (þ.e. sterkara kerfi) þeim mun minni er spennuhækkunin af völdum strengsins.

Ofangreindar hugleiðingar um spennu og útjöfnun eiga allar við um spennusetningu strengsins. Í eðlilegum rekstri gæti þurft meiri eða minni útjöfnun. Það veltur, eins og áður segir, á flæði um strenginn, skammhlaupsafl í tengipunktum og ástandi kerfisins almennt. Þess vegna þarf að skoða hvert tilvik gaumgæfilega.

2.5.2 Mælikvarði út frá straumgetu

Þessi mælikvarði, sem ef til vill ætti frekar að kalla „mælikvarða út frá fluttu raunafl“, skilgreinir krítíska lengd strengsins út frá leyfilegu hámarksgildi flutts launafls um strenginn. Skilgreint er hvert lágmarkshlutfall raunafls skal vera, þ.e. sem hlutfall af heildarflutningsgetu strengsins, og svo er krítísk lengd reiknuð út þar sem meðal annars er tekið tillit til ýmissa kennistuðla strengsins.

Að jafnaði gefur þessi mælikvarði hærra gildi fyrir krítíska lengd en mælikvarðinn sem byggir á spennuviðmiðinu vegna þess að hér er ekki tekið mið af áhrifum launaflsframleiðslu strengsins á spennuna.

2.5.3 Spennusetning og frátenging

Eins og fjallað er um í kaflanum hér að framan gæti þurft að setja skorður við spennusetningu jarðstrengs vegna spennuhækkunar. Einnig þarf að gefa gætur að mögulegum innhlaupsstraum sérstaklega í því tilviki þegar strengur og aflspennir eru spennusettil saman. Lengd strengkaflans hefur bein áhrif á stærð (útslag) og tíðni innhlaupsstraumsins. Skammhlaupsafl í tengipunktinum hefur einnig mikil áhrif; því lægra sem skammhlaupsafl er þeim mun hærri eru útslag straumsins og tíðnin (6).

Vegna mikillar rýmdar í jarðstrengjum má búast við lægri eigintíði (e. resonance) í kerfum með löngum jarðstrengjum en í hreinum loftlínukerfum. Skammhlaupsafl í tengipunktinum leikur

hér enn og aftur stórt hlutverk og nú með tilliti til eigintíðninnar. Eigintíðnin ræðst af hlutfallinu milli skammhlaupsafls í tengipunktinum og launaflsins sem strengurinn framleiðir við málspennu (6). Lágt skammhlaupsafl og mikil launaflsframleiðsla lækka ómtíðnina verulega, jafnvel svo mikið að yfirtónar, sem að jafnaði eru til staðar í raforkukerfum, geta magnast upp og valdið vandræðum í kerfisrekstrinum og jafnvel skemmdum á búnaði.

2.5.4 Töp

Val á leiðarategund fyrir ákveðið verkefni er ítrunarferli⁶. Efnið í leiðaranum er annaðhvort ál eða kopar en margar ólíkar útfærslur eru mögulegar til þess að fullnægja flutningsþörfinni (til dæmis spunninn leiðari, gegnheill, lagskiptur). Þessar leiðaragerðir eru ólíkar á ýmsa vegu, svo sem varðandi stofnkostnað og rekstrartöp. Frammistaða þeirra veltur einnig á ýmsum ytri þáttum, eins og vali á fylliefni, jarðvegshita, frágangi skermleiðara o.s.frv.

Hefðbundna leiðin hér á landi hefur verið sú að reikna út flutningsþörfina og leyfilegt spennufall og velja síðan minnsta álleiðarann sem annar þeim flutningi innan skilgreindra marka varðandi hitastig og spennufall. Þessi tiltekna stærð af streng hefur svo verið boðin út.

Á síðari árum hefur þó víða rutt sér til rúms aðferðafræði sem á uppruna sinn í útboðsaðferðum sem notaðar eru fyrir aflspenna. Aðferðin felst í því að flutningsþörfin er skilgreind og töpum gefinn kostnaður. Við samanburð tilboða er tapakostnaðinum svo bætt við stofnkostnað strengsins. Þjóðandans bíður þá bestunarverkefni þar sem hann þarf að finna hagstæðustu leiðina til þess að uppfylla kröfur um flutningsþörf samtímis því sem hann reynir að lágmarka tapakostnaðinn. Með þessari aðferð er í raun verið að bjóða út flutningsgetu, ekki ákveðna strengstærð.

2.5.5 Lengdir strengkafla og fjöldi samsetninga

Mikilvægt er að lágmarka fjölda samsetninga á jarðstreng enda valda samsetningar og endatengingar oft bilunum í jarðstrengskerfum (7).

Þyngd strengkefla getur verið takmarkandi þáttur og á hvert kefli kemst aðeins ákveðin lengd strengs. Möguleg þyngd keflanna hefur þá bein áhrif á lengdir strengkafla og fjölda samsetninga.

2.5.6 Áreiðanleiki jarðstrengskerfa

Eins og fram kemur í kafla 2.5.5 eru bilanir í jarðstrengskerfum oft raktar til samsetninga og endatenginga. Enn fremur er hugsanlega verið að bæta við búnaði (til dæmis spólum og aflrofum) sem hver um sig hefur sínar tilteknu bilanalíkur. Þess vegna aukast heildarbilanalíkur jarðstrengskerfisins.

Í nýlegri könnun, sem samtök evrópskra raforkuflutningsfyrirtækja, ENTSO-E, stóðu fyrir og var kynnt á ráðstefnu CIGRÉ í París í ágúst 2014, reyndist meirihluti bilana í jarðstrengskerfum á spennu 132 kV og hærri hafa haft í för með sér viðgerðartíma á bilinu 3 til 4 vikur. Sama könnun sýndi að meðalbilanalíkur væru 0,28 bilanir á ári á hverja 100 km. Þetta þýðir að meðalútitími er á bilinu 150 til 200 klukkustundir á ári.

Þessar niðurstöður eru frábrugðnar könnun sem CIGRÉ lét gera og birti (7), sjá töflu 2.1.

⁶ Ítrunarferli: Í byrjun er valin ein útfærsla og skoðað hvernig hún kemur út gagnvart þeim kröfum sem settar eru (flutningsgeta, kostnaður og annað). Á grundvelli þeirrar skoðunar er metið hvort ástæða sé til að endurskoða það val og ferlið þá endurtekið uns komin er útfærsla sem uppfyllir allar kröfur.

Tafla 2.1. Bilanalíkur XLPE jarðstrengja milli 2000 og 2005 (7).

XLPE - strengir		60 – 219 kV	220 – 500 kV
A. Bilanir vegna innri ástæðna			
Strengur	Bilanalíkur [bilanir/ár/100 km]	0,027	0,067
Samsetning	Bilanalíkur [bilanir/ár/100 ein.]	0,005	0,026
Endabúnaður	Bilanalíkur [bilanir/ár/100 ein.]	0,006	0,032
B. Bilanir vegna ytri ástæðna			
Strengur	Bilanalíkur [bilanir/ár/100 km]	0,057	0,067
Samsetning	Bilanalíkur [bilanir/ár/100 ein.]	0,002	0,022
Endabúnaður	Bilanalíkur [bilanir/ár/100 ein.]	0,005	0,028
C. Allar bilanir			
Strengur	Bilanalíkur [bilanir/ár/100 km]	0,085	0,133
Samsetning	Bilanalíkur [bilanir/ár/100 ein.]	0,007	0,048
Endabúnaður	Bilanalíkur [bilanir/ár/100 ein.]	0,011	0,050

Eins og með alla tölfraði þarf að túlka þessar niðurstöður með varúð. Meðaltal er aldrei annað en meðaltal. Til dæmis er í hvorugri könnuninni sem nefndar eru hér að ofan, gerður greinarmunur á strenglögnum í þéttbýli og dreifbýli. Bilanatíðni strengja í töflunni að ofan er gefin upp í bilunum á ári á hverja 100 km. Í styttri strengkerfum hafa bilanir í samtengingum og endatengingum meira vægi.

2.5.7 Viðhald á jarðstrengjum og viðgerðarþörf

Jarðstrengir krefjast að jafnaði lítils viðhalds. Gæta þarf að því að lagnaleiðin sé aðgengileg og enn fremur ætti að skoða eftirfarandi:

- Yfirspennuvara, þar sem þeir eru notaðir, ætti að skoða reglulega.
- Endabúnað þarf að skoða reglulega og tryggja að hann leki hvorki gasi né olíu.
- Jarðskaut ætti að skoða reglulega.
- Ytri kápu strengsins ætti að skoða reglulega.
- Fylgja þarf leiðbeiningum framleiðanda varðandi meðhöndlun á viðgerðarmúffum hafi þær verið keyptar um leið og strengurinn.

Bilanir, sem krefjast viðgerðar, geta orðið á strengsamsetningum, í tengiboxum, á endabúnaði eða á strengnum sjálfum. Bilanir á strengnum sjálfum geta orðið af ýmsum orsökum, sbr.:

- Skemmd af völdum utanaðkomandi aðila, til dæmis vegna vinnu í nágrenni strengsins.
- Bilun vegna slæmra vinnubragða, einkum við samsetningar og/eða frágang í tengiboxum eða við endabúnað.
- Bilunar vegna rangra tenginga, til dæmis vegna rangra tenginga skermleiðis í tengiboxi.
- Framleiðslugalli í strengnum. Kemur helst fram í innri einangrun strengsins eða sjálfum leiðaranum.

- Bilunar vegna öldrunar. Hærri umhverfshiti en gert var ráð fyrir við hönnun strenglagnarinnar getur flýtt fyrir öldrun einangrunarefnisins.

Til þess að lágmarka viðgerðartímann er mikilvægt að til sé skýr og skilvirk viðbragðsáætlun og greiður aðgangur að varahlutum og öðrum nauðsynlegum búnaði.

3 LAGNING JARÐSTRENGJA

3.1 Leiðarval

Landfræðilegar, jarðfræðilegar og veðurfarslegar umhverfisaðstæður skipta miklu máli varðandi tæknilega útfærslu við lagningu jarðstrengja og hafa mikil áhrif á kostnað við strenglagningu. Vanda þarf því vel til leiðarvals og könnunar jarðvegsaðstæðna. Við leiðarval er lögð áhersla á að velja strengleið þar sem strenglagningin er sem einföldust og ódýrust og að hún valdi sem minnstu raski á landi og landnotkun. Ólíkir hagsmunir geta gert slíkt leiðarval flókið. Reynt er að forðast land með klöpp eða hraun í yfirborði en ræktarland getur hentað ágætlega til jarðstrengslagna þar sem auðvelt er að endurheimta fyrra yfirborð eftir framkvæmdir. Hér á eftir er fjallað lauslega um nokkrar gerðir landsvæða sem krefjast sérlausna hvað varðar jarðvinnu.

- **Sandar**, eins og eru t.d. víða á suðurströnd landsins, eru yfirleitt auðgræfir og yfirborðsfrágangur einfaldur. Skurðbakkarnir eru hins vegar gjarnan óstöðugir og erfitt að halda skurði lengi opnum. Þá er varmaleiðni slíkra sanda oft lítil, þannig að þó svo að strengurinn liggi í sandi þarf að leggja sérstakan varmaleiðandi sand næst strengnum.
- **Skógar og kjarrlendi**. Þegar jarðstrengir eru lagðir í gegnum skóg- eða kjarrlendi er nauðsynlegt að skilja eftir trjálaust belti yfir strengnum. Rætur trjáa draga til sín raka úr umhverfinu og geta orsakað útpurkun umhverfis strengina (4) (8). Tré með djúpstæð rótarkerfi (t.d. ösp og fura) ættu ekki að standa nær jarðstreng en fimm metra og tré með grunnstæð rótarkerfi (eins og birki og víðir) ættu ekki að standa nær en þrjá metra (9). Sé óæskilegt að skilja eftir trjálaust belti yfir jarðstrengslögn er möguleiki á því að bora undir skóglendið með stefnuborun (HDD) dýpra en svo að trjárætur hafi áhrif á strenginn. Slíkt hefur áhrif á flutningsgetu strengsins.
- **Hraun**. Skurðgröftur í hrauni krefst í flestum tilfellum fleygunar eða sprenginga. Í stöku tilfellum er mögulegt að losa klöppina með riftönn. Strenglagning í hrauni er tímafrek og kostnaðarsöm og ekki er hægt að er koma yfirborði hraunsins í fyrra horf. Þá getur tekið áratugi að endurheimta viðkvæman mosagróður. Hraun eru gropin og það veldur þurru og óhagstæðum skilyrðum fyrir strengi. Nútímahraun⁷ njóta verndar skv. 37. gr. laga nr. 44/1999 um náttúruvernd og skal forðast röskun þeirra eins og kostur er. Því getur þurft að gera hlykk á strengleið til að forðast þau. Einnig er möguleiki að setja strenginn í malarfyllingu ofan á hraunið.
- **Jarðskjálftasvæði**. Stærstu jarðskjálftar á Íslandi verða á þverbrotabeltunum á Suðurlandi og Norðurlandi. Þá geta minni skjálftar átt upptök sín á eldvirka beltinu. Þó svo þeir skjálftar verði aldrei eins stórir getur umtalsverð gliðnun átt sér stað í skjálftahrinum. Helsta ógnunin við jarðstrengi er varanleg færsla á jarðskorpunni, ýmist sem bein afleiðing jarðskjálfta eða af völdum ysjunar⁸ í lausum jarðlögum. Ysjunarhætta er bundin við fínkorna setlög sem helst er að finna á láglendi sunnanlands. Ef ekki er hægt að velja leið fram hjá jarðskjálftasvæði eru virk misgengi og mögulegir ysjunarstaðir kortlagðir. Til þess að draga úr hættu á strengskemmdum er hægt að útbúa lögnina þannig að strengurinn liggi laus yfir virka misgengið t.d. með því að draga hann í rör. Einnig má útbúa lykkju á strenginn sem tekur við tognuninni.
- **Jarðhitasvæði**. Best er að forðast að leggja jarðstrengi um jarðhitasvæði. Sé það ekki mögulegt er hægt að hanna strengskurðinn þannig að áhrif jarðhitans á

⁷ Nútímahraun, hraun sem runnið hafa eftir ísöld, þ.e. yngri en 10.000 ára.

⁸ Ysjun (e. liquefaction) kallast það þegar vatnsmettaður eða næstum því mettaður jarðvegur missir skerstyrk vegna endurtekinnar sveifluhreyfinga, t.d. vegna jarðskjálfta. Þegar skjálfta lýkur sest efnið til og getur orðið verulegt sig í jarðveginum.

jarðstrenginn séu lágmörkuð, t.d. með því að leggja einangrun undir strenginn í stað varmaleiðandi efnis eða jafnvel með því að leggja kælikerfi með strengleiðinni. Við þessar aðstæður væri kostur að grafa strenginn grunnt. Hanna þarf viðeigandi lausn í hverju tilviki. Ávallt skyldi leggja hitanema með jarðstreng yfir slík svæði til þess að fylgjast með ástandi strengsins.

- **Jarðvatn.** Há jarðvatnsstaða minnkar burðargetu jarðvegs sem kallar á umfangsmeiri vinnuslóðir meðfram skurðinum og erfiðara er að halda strengskurðinum opnum. Þá getur vatnsrennsli í skurðinum skolað burtu strengjasandinum sem nauðsynlegt er að umlyki strenginn. Mögulegar lausnir við háa jarðvatnsstöðu eru t.d.:
 - Velja þurrkatíð eða hugsanlega vetur til framkvæmda.
 - Vatnsdæling og framræsla.
 - Stíflur í skurðinum.
 - Hafa einungis stuttan skurð opinn í einu.
 - Frýsting jarðvegs.
 - Stefnumborun.
 - Plæging.
 - Grafrarkassi.

Mikilvægt er að undirbúa vel hvernig bregðast á við aðstæðum til þess að halda kostnaði niðri. Há jarðvatnsstaða kemur nær örugglega til með að auka kostnað verka nema helst ef mögulegt er að nota plægingu. Ókostur plægingar eru óvissa um hvaða efni liggur næst strengnum.

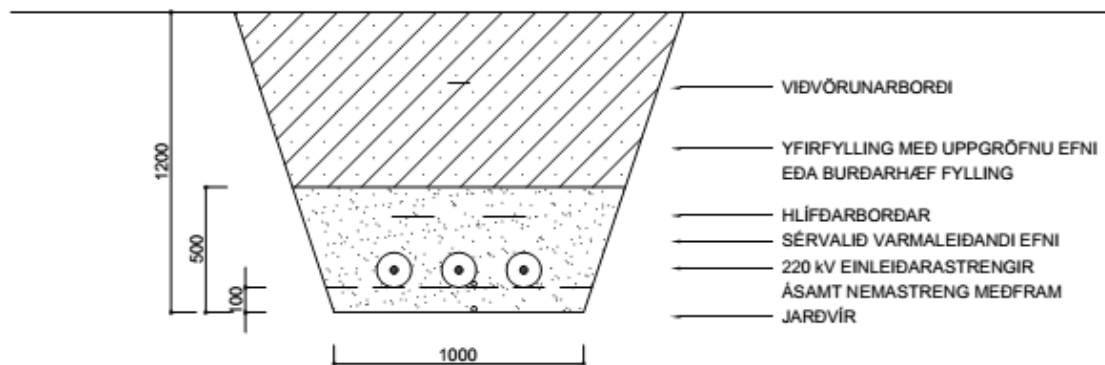


Mynd 3.1. Ólíkar aðstæður til jarðstrengslagnar. Fyrirhuguð strengleið í sandi á Suðurlandi (til vinstri). Strengskurður í hrauni við Hamranes (2007) (til hægri).

3.2 Lagningaraðferðir

3.2.1 Hefðbundinn skurðgröftur

Algengasta aðferðin við jarðstrengslögn á hárri spennu (≥ 66 kV) er lagning í opinn skurð. Taka þarf tillit til margra þátta þegar velja á hagkvæmasta skurðsnið. Þegar dregið er úr kostnaði við einn þátt getur það leitt til aukins kostnaðar annars staðar. Ef klöpp er í skurðinum þarf í flestum tilfellum að fjarlægja hana með fleygun eða sprengingum. Báðar aðferðir eru tímafrekar og kostnaðarsamar. Þá þarf að flytja að nýtt fyllingarefni í stað fjarlægðu klapparinnar. Ef klöpp kemur fram neðarlega í skurðsniðinu má í sumum tilfellum grynka sniðið lítillega en á móti gæti það þýtt að auka þyrfti öryggisráðstafanir yfir strengnum. Þörf fyrir strengjasand, gerð og magn, fer eftir því hversu mikið álag er gert ráð fyrir að verði á strengnum, þ.e. hversu mikinn hita þarf að leiða frá strengnum. Hefðbundið skurðsnið, sem hentar við íslenskar aðstæður fyrir 220 kV streng, er sýnt á mynd 3.2.



Mynd 3.2. Hefðbundið þversnið fyrir 220 kV streng lagðan í flatri uppröðun.



Mynd 3.3. Lagning 132 kV Nesjavallalínu 2 (2009) í hefðbundinn opinn skurð.

3.2.2 Plæging

Plæging strengja er aðferð sem mikið hefur verið notuð á Íslandi fyrir strengi ≤ 33 kV og einnig fyrir einstaka 66 kV strengi (Vestmannaeyjastrengur 3, 2013). Við hentugustu aðstæður er aðferðin fljótlegri og ódýrari en hefðbundinn skurðgröftur og raskar umtalsvert minna svæði. Plæging getur hentað vel þegar um er að ræða mjúkan einsleitan jarðveg (t.d. sanda) þar sem varmaleiðni jarðvegsins er viðunandi. Þar sem jarðvegur er harður eða grýttur er möguleiki á skemmdum á strengnum og þegar mikið er um þveranir hentar aðferðin ekki. Þá er alltaf nokkur óvissa um aðstæður næst strengnum og getur sú óvissa verið óásættanleg þegar um strengi á hárri spennu er að ræða. Sérútbúnir plógar fyrir stærri strengi, sem leggja strengjasand með strengnum samhliða plægingunni, eru þekktir erlendis. Sú tækni er dýr og hefur ekki verið notuð á Íslandi enn sem komið er. Við sérstakar aðstæður eins og strenglagningu tuga kílómetra leið í sandi, þar sem erfitt er að halda hefðbundnum skurði opnum kemur notkun slíkra tækja til greina.



Mynd 3.4. Plæging jarðstrengs.

3.2.3 Grafrarkassi

Á svæðum þar sem jarðvegur er óstöðugur, t.d. þar sem jarðvatnsstaða er há, getur svo kallaður grafrarkassi hentað við lagningu jarðstrengja. Aðferðin gengur út á að strengirnir eru dregnir út af keflunum og lagðir á jörðina meðfram strengleiðinni. Skurðurinn er grafinn á hefðbundinn hátt, stutta vegalengd í einu og kassinn síðan dreginn eftir skurðinum. Kassinn kemur í veg fyrir að skurðurinn falli saman og strengjasandur og strengir eru settir samhliða í skurðinn. Þá er skurðinum lokað og næsti áfangi er grafinn.

Grafrarkassi hefur ekki verið notaður á Íslandi en mikil reynsla er af notkun hans í Danmörku fyrir lagningu strengja upp að 150 kV. Tæknin hefur ekki enn verið notuð við lagningu 220 kV strengja (8). Full ástæða er til þess að kanna möguleika á að nota þessa aðferð á Íslandi, t.d. þar sem jarðvatnsstaða er há.

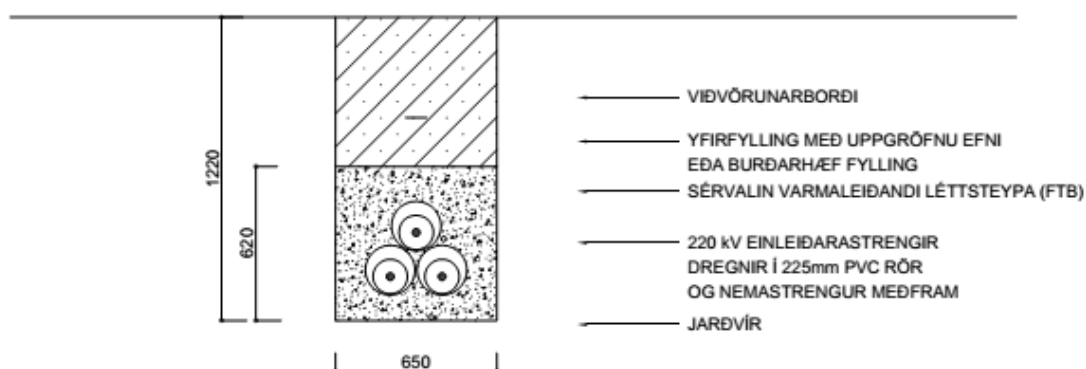


Mynd 3.5. Jarðstrengur lagður með aðstoð grafrarkassa í dönsku strengverkefni (8).

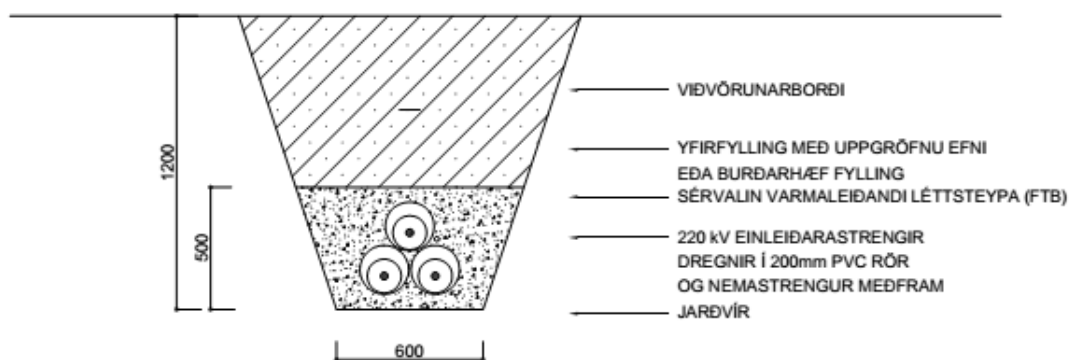
3.3 Lagning meðfram vegum

Þar sem lítið pláss er fyrir nýja strenglagn og til þess að lágmarka áhrif strenglagnar á umhverfi má hugsanlega nota fyrirbyggjandi veg sem vinnuveg og grafa strengskurðinn í eða rétt við vegfláann. Til þess að slíkt gangi þarf skurðsniðið að vera minna en hefðbundið snið og að sjálfsgöðu þarf samþykki og samstarf við eiganda vegarins.

Almennt eru aðstæður í veginum sjálfum ekki hentugar fyrir jarðstrengi. Efnið í vegfyllingunni hefur gjarnan lágt rakastig (lægra en umhverfið í kring) og hefur þannig áhrif til hins verra á flutningsgetu strengsins, auk þess er meiri hættu á því að strengurinn verði fyrir hnjaski. Ein leið til þess að minnka skurðsniðið, án þess að auka hættu á því að strengurinn verði fyrir skemmdum, er fylla að strengnum með steypu í stað sands. Varmaleiðandi steypa minnkar einnig líkur á ofhitnun strengsins þar sem yfirborð steypunnar verður krítíski flöturinn gagnvart varmaleiðandi jarðveginum í stað yfirborðs strengkápunnar, hitastigið verður orðið lægra sem minnkar líkur á útbörnun jarðvegsins umhverfis strenginn (nánari umfjöllun um varmaleiðandi fylliefni er í kafla 3.9). Erlendis hefur þessi aðferð verið notuð í ákveðnum mæli. Skurðsniðið á mynd 3.6 hefur verið notað í nýlegum verkefnum í Frakklandi í þessum tilgangi (10). Víðast hvar við íslenskar aðstæður er erfitt að grafa skurði með lóðréttu skurðbakka vegna þess hversu litla samloðun íslenskur jarðvegur hefur. Skurðsniðið á mynd 3.7 sýnir skurðsnið fyrir 220 kV streng sem talið er að hægt sé að nota hérlandis ef notuð væri varmaleiðandi steypa umhverfis strenginn.



Mynd 3.6. Þversnið með steypum hjúp umhverfis strenginn, sem notað hefur verið í nýlegum verkefnum í Frakklandi (10). Kostnaður við þetta snið er áætlaður um 3,5 sinnum hærri en hefðbundið þversnið (mynd 3.2).



Mynd 3.7. Mögulegt snið við íslenskar aðstæður þar sem notuð er varmaleiðandi steypa umhverfis strenginn. Kostnaður við sniðið með steypuhjúp umhverfis strenginn er áætlaður um 4 sinnum hærri en hefðbundið þversnið (mynd 3.2).

Samanburður á kostnaði þversniðanna tveggja hér að ofan og hefðbundins skurðsniðs (mynd 3.2) sýnir að franska sniðið á mynd 3.6 er um 3,5 sinnum dýrara en hefðbundið snið og sniðið á mynd 3.7 er um 4 sinnum dýrara.

Þessa aðferð væri hægt að nota á Íslandi en lagningaraðferðin er óhjákvæmilega mun dýrari en lagning í opinn skurð með hefðbundnu þversniði og þjónustuslóð (sjá nánari umfjöllun í kafla 3.2.1).

3.4 Þveranir

3.4.1 Lagnir

Nær allar strenglagnir fela í sér þveranir af einhverju tagi. Liggi strengleiðin í eða nærri þéttbýli er gjarnan mikið um fyrirbyggjandi lagnir (rafmagn, vatn, fráveitu, ljósleiðara o.fl.) sem þarf að þvera.



Mynd 3.8. Dæmi um lagnapverun, Nesjavallalína 2, nærri stöðvarhúsinu á Nesjavöllum.

Aðferðir til þverunar eru m.a.:

- Dýpri lagning, þ.e. gröftur undir fyrirbyggjandi lagnir.
- Grynri lagning, þ.e. gröftur yfir fyrirbyggjandi lagnir. Þá þarf að bæta við vörnum yfir strenginn, s.s. hlífðarrörum, steypuhjúp, hellulögn eða vírneti.
- Múlun, þar sem rör eru rekin í gegnum vegfyllingar eða laus jarðlög með þrýstiloftshamri. Aðferðin er notuð við vegþveranir.
- Stefnumborun (fjallað er um aðferðina í kafla 3.4.3).

Í sumum tilfellum þarf að setja varnir milli nýja háspennustrengsins og fyrirbyggjandi lagna.

3.4.2 Ár og skurðir

Nokkrar aðferðir koma til greina þegar jarðstrengsleiðir þvera ár, má þar nefna:

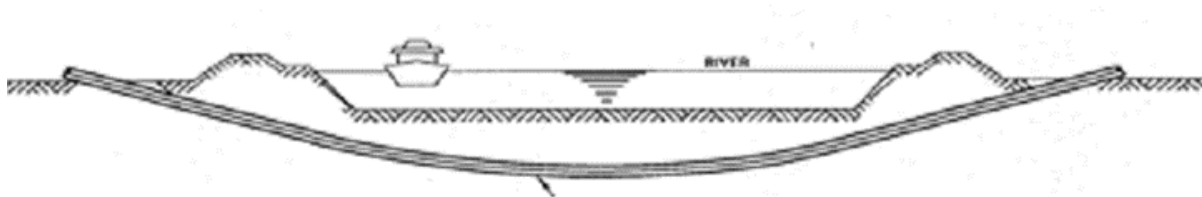
- Stíflun ár (einnar árkvísar í einu ef um slíkt er að ræða) og grafa hefðbundinn strengskurð.
- Stefnumborun undir árbotninn.
- Plæging ídráttarrörs í árbotninn.
- Byggja brú eða nota fyrirbyggjandi brú og festa ídráttarrör á mannvirkið.

Val á aðferð fer eftir stærð og staðsetningu árinna, gerð árbotns og jarðfræðilegum aðstæðum umhverfis. Læki og skurði er oftast hægt að þvera með hefðbundnum en dýpri skurði. Hlífðarrör er lagt í skurðinn og strengurinn dreginn í. Stærri lygnar ár er í sumum tilfellum hægt að þvera á sama máta en þá þarf að veita vatninu í aðra farvegi meðan á lagningu stendur. Í sumum tilfellum þarf að setja rofvörn yfir strengskurðinn. Þegar um stærri og stríðari ár er að

ræða er mögulegt að nota stefnuborun (sjá kafla 3.4.3). Sé aðkoma að ánni brött og jafnvel klettótt getur vænlegasti kosturinn verið að byggja einhvers konar brú yfir strenginn yfir ána eða nýta brýr sem fyrir eru.

3.4.3 Stefnuborun

Stefnuborun, eða lárétt stefnuborun (horizontal directional drilling), er hugtak sem notað er yfir borun þar sem borað er nær lárétt milli tveggja punkta á yfirborði jarðar. Fyrst er boruð grönn hola, þá er rýmari dreginn með borstálunum til baka og ídráttarrör þar á eftir til þess að fódra holuna. Að lokum eru háspennustrengirnir dregnir í rörin. Aðferðin er gjarnan notuð þegar þvera þarf stærri vegi, ár eða aðrar hindranir.



Mynd 3.9. Skýringarmynd af stefnuborun.

Hægt er að hafa háspennustrengi í margvíslegri uppröðun en stærri strengir eru oftast dregnir hver í sitt rör, ýmist í láréttri eða þríhyrningsuppröðun. Í flestum tilfellum eru rörin fyllt með varmaleiðandi efju sem ekki harðnar, þannig að hægt sé að draga strenginn út til viðgerða. Notkun ídráttarröra getur minnkað flutningsgetu strengja um 5 til 10% og enn meira séu rörin ekki fyllt með varmaleiðandi efju.

Það er mjög háð jarðfræðilegum aðstæðum hversu vel stefnuborun gengur. Borun gegnum einsleitt efni er oftast einföld en séu sprungur, lagmót eða aðrar óreglur á borleiðinni verður borunin erfiðari. Einnig ef borað er í mjög hart berg eða laust set. Þunn jarðlög með ólíka eiginleika gera stefnuborun á Íslandi oft erfiða en þar sem aðstæður eru hagkvæmar getur aðferðin hentað vel. Aðferðin hefur verið notuð í íslenskum strengverkefnum, bæði við Nesjavallalínu 2 (2009) og Vestmannaeyjastreng 3 (2013).

Einn verktaki á Íslandi hefur yfir búnaði að ráða til stefnuborunar. Hámarkslengd, sem sá búnaður getur borað í einni færslu er um 200-300 m. Erlendir verktakar hafa búnað sem ræður við talsvert lengri vegalengdir (yfir 1 km).

Þrátt fyrir umtalsverðan kostnaðarmun m.v. hefðbundinn skurðgröft getur stefnuborun verið hagkvæmari við ákveðnar aðstæður.



Mynd 3.10. Stefnuborun við Dyradali, vegna lagningar Nesjavallalína 2 (2009).

3.5 Þjónustuslóð

Á framkvæmdatíma þarf að gera ráð fyrir umferð þungra faratækja meðfram strengleiðinni. Í sumum tilfellum þarf að flytja uppgrafið efni frá lagningastað og í nánast öllum tilfellum þarf að leggja í skurðinn aðfluttan strengjasand. Þá þarf að flytja þung strengkefli og annan búnað til tenginga að tengistöðum. Jarðvegurinn umhverfis strengskurðinn þolir oft á tíðum ekki umferð þungra faratækja og þarf því víðast að leggja slóð meðfram strengleiðinni. Þjónustuslóð er gjarnan um 3,5 til 5 m breið og um 0,3 til 0,5 m þykk. Í mörgum tilfellum þarf, af umhverfisástæðum, að fjarlægja slóðina að framkvæmdum loknum og er því í sumum tilfellum settur jarðvegsdúkur undir malarfyllinguna til þess að lágmarka skemmdir.

Til að lágmarka skemmdir á jarðvegi þekkist einnig að leggja stálplötur meðfram skurðinum á framkvæmdatíma. Þessi aðferð krefst talsverðrar fjárfestingar í stálplötum í upphafi og mikil vinna felst í því að flytja plöturnar til meðan á framkvæmdum stendur. Að öllu jöfnu þarf um 600 stálplötur, 2x3 metra, meðfram hverjum kílómetra af skurði. Til viðbótar getur þurft stálplötur í aðkomuvegi.

Samkvæmt upplýsingum frá Energinet.dk er kostnaður við að kaupa eða leigja stálplötur, ásamt vinnunni við að flytja þær til á framkvæmdasvæðinu sambærilegur eða heldur hærri en að leggja hefðbundinn malarlóða. Þurfi hins vegar að fjarlægja malarlóðann að framkvæmdum loknum er kostnaðurinn við malarlóðann orðinn hærri.

Fyrir framkvæmdir á viðkvæmu en tiltölulega sléttu landi þar sem þörf er á umfangsmiklum vinnuslóðum sem ekki nýtast eftir framkvæmdir, er því ástæða til að kanna þann möguleika að nota stálplötur.



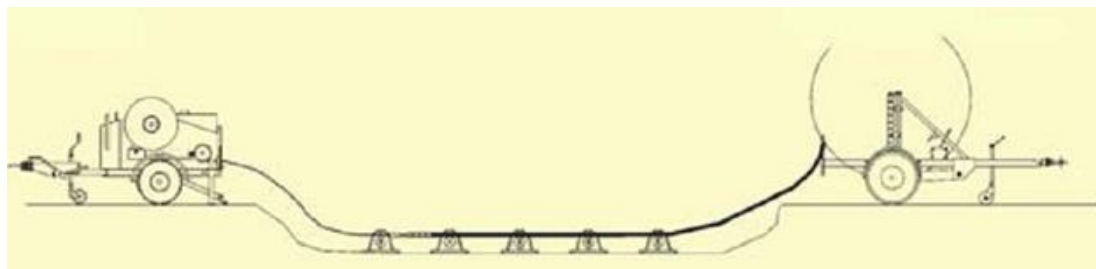
Mynd 3.11. Dæmi frá Evrópu, um notkun stálplatna sem þjónustuslóðar (8).

3.6 Útdráttur og tenging strengja

Háspennustrengir eru afhentir á stórum keflum, einn einleiðarastrengur á hverju kefli. Staðsetning tengihola er ákvörðuð áður en strengurinn er keyptur. Þar þarf m.a. að hafa í huga hversu langur strengur kemst á hvert kefli og hversu stór og þung strengkefli vegamannvirki, sem flytja þarf strenginn um að framkvæmdastað, þola. Strenglengd (132 kV og 220 kV) á hverju kefli er gjarnan á bilinu 800 til 1.500 m. Slík kefli (með álstreng) geta vegið allt að 25 tonnum. Erlendis hefur tilhneigingin verið sú að fækka tengiholum og þar af leiðandi lengja strengkaflana og þyngja strengkeflin.

Sérbúinn útdráttarvagn þarf til þess að leggja strenginn í skurðinn. Hver einleiðarastrengur er dreginn í einu milli tveggja tengihola. Lögð eru kefli í skurðbotninn svo strengurinn dragist ekki eftir skurðbotninum sem rispað gæti strengkápuna. Vagninn þarf að hafa búnað sem stjórnar snúningi keflisins þannig að þess sé gætt að ekki sé farið yfir leyfilegt togþol strengsins. Þá

þarf að hafa mannskap í skurðinum til að gæta þess að leiðararnir detti ekki út af keflunum. Almenn er ekki leyfilegt að leggja streng ef lofthiti fer niður fyrir -5°C nema strengkeflin séu hituð upp fyrir útdrátt.



Mynd 3.12. Lagning háspennustrengja.

Við hverja tengihölu er skurðurinn víkkaður til þess að koma sérstöku tengihúsi fyrir. Tengivinna er mikið nákvæmnisverk svo nauðsynlegt er að hafa upplýst og upphitað tengihús

sem hlífir fyrir vatni, ryki og vindi. Í sumum tilfellum getur þurft að dæla vatni frá til að halda gólfi tengihússins þurru. Allt þetta krefst rafstöðvar á staðnum.

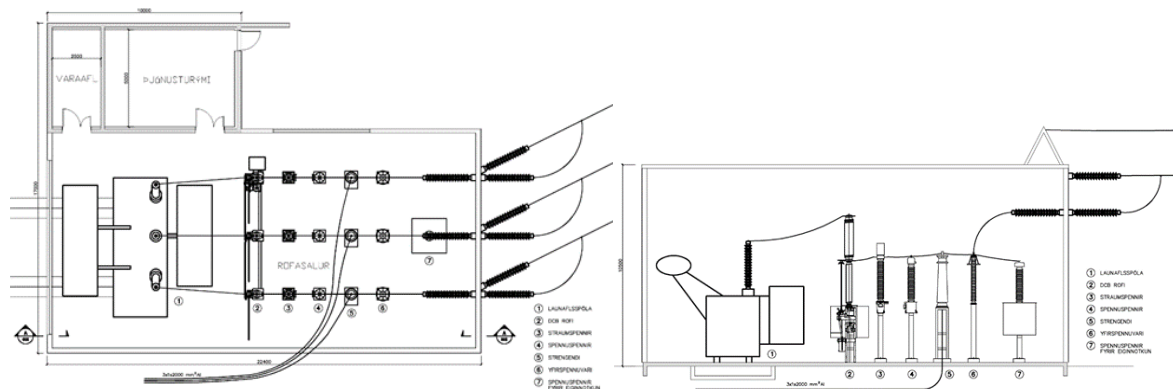


Mynd 3.13. Undirbúningur tengiholu á leið Nesjavallalínu 2 (til vinstri). Gámur notaður sem tengihús (Evrópa) (til hægri) (8).

Gera má ráð fyrir að tengivinna við 220 kV streng taki um 7 - 8 daga fyrir hverja tengiholu (tenging þriggja leiðara). Tengimenn fyrir 132 kV og stærri strengi koma erlendis frá, oftast á vegum strengframleiðanda.

3.7 Endabúnaður og útjöfnunarstöðvar

Útjöfnunarstöðvar eru að jafnaði staðsettar í tengivirki ásamt öðrum búnaði sem tilheyrir línunni. Útjöfnunarstöðina má staðsetja við strengenda, sé um að ræða jarðstrengshluta af lengri línu. Líta má á þannig stöð sem ígildi lítils tengivirkis að stærð og umfangi. Forhönnun á útjöfnunarstöð ásamt endabúnaði og tengingu milli loftlínu og jarðstrengs er sýnd á mynd 3.14.

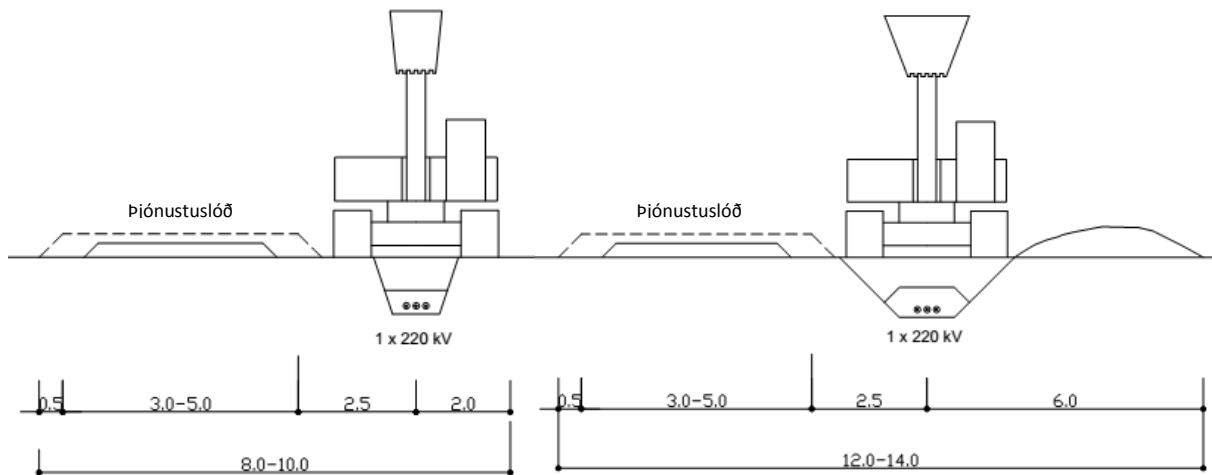


Mynd 3.14. Endabúnaður ásamt útjöfnunarstöð á mótum jarðstrengs og loftlínu.

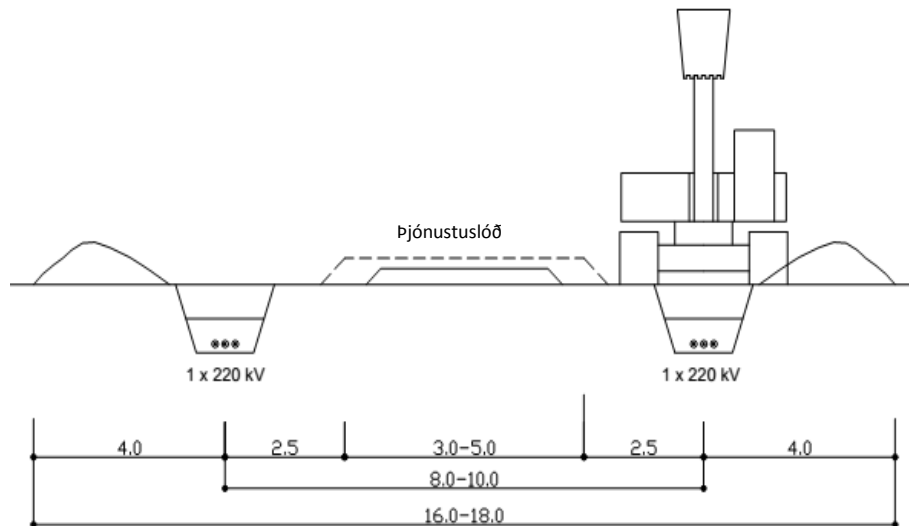
3.8 Rask og yfirborðsfrágangur

Í strengverkefnum er almennt gert ráð fyrir því að koma öllu röskuðu landi í samt horf að framkvæmdum loknum. Umfang rasks af völdum strenglagningar fer m.a. eftir strengstærð, landslagi, jarðvegsaðstæðum og lagningaraðferð. Þegar um hefðbundinn skurð er að ræða er

hægt að minnka raskað svæði með því að keyra uppgröftinn burt af svæðinu, þá reiknast rasksvæðið frá ytri brún þjónustulóðarinnar að ytra beltafari gröfunnar. Sé uppgröfturinn settur á skurðbakkann bætast 2 til 4 m við raskaða svæðið. Að jafnaði má gera ráð fyrir að alls 8 til 14 m breitt svæði raskist við lagningu á einu 220 kV strengsetti. Ef strengleiðin liggur í halla verður svæðið breiðara en ef strengurinn er á flötu landi. Við lagningu tveggja strengsetta er þjónustulóðinn hafður á milli tveggja skurða. Gera má ráð fyrir að rasksvæði vegna tveggja strengsetta sé á bilinu 14 til 22 m. Dæmi um rasksvæði vegna lagningar eins og tveggja strengsetta eru sýnd á mynd 3.15 og mynd 3.16.



Mynd 3.15. 220 kV strengur, lágmarks þversnið og þjónustulóð (vinstri). 220 kV strengur breiðara skurðsnið, þjónustulóð og uppgröfturinn við skurðbakka (hægri).



Mynd 3.16. Rasksvæði vegna lagningar tveggja setta af 220 kV streng með þjónustulóða og uppgröfttri við skurðbakka.

Tafla 3.1. Stærð rasksvæða og magn uppgrafins efnis og strengjasands byggð á fjórum mismunandi skurðsniðum fyrir 132 kV og 220 kV strengi.

Gerð þversniðs	Rasksvæði heild [m ² /m]		Þjónustuslóði [m ² /m]		Strengskurður yfirborð [m ² /m]		Strengjasandur aðfluttur [m ³ /m]		Uppgröftur [m ³ /m]	
Spenna	132 kV	220 kV	132 kV	220 kV	132 kV	220 kV	132 kV	220 kV	132 kV	220 kV
Min eitt sett	6,8	8,0	3,6	3,6	1,6	1,8	0,5	0,6	1,5	1,7
Max eitt sett	12,7	14,0	6,0	6,0	3,2	3,6	0,6	0,7	2,4	2,7
Min tvö sett	10,0	12,0	3,6	3,6	3,2	3,6	1,0	1,2	2,9	3,4
Max tvö sett	19,0	22,0	6,0	6,0	6,4	6,8	1,2	1,4	4,8	5,3

Eins og tekið er saman í töflu 3.1, þá getur raskað svæði við lagningu eins jarðstrengjasetts verið allt frá 7.000 m²/km (min 132 kV strengur) upp í 14.000 m²/km (max 220 kV strengur). Hámarks svæði fyrir tvö strengsett getur verið um 22.000 m²/km. Við tengipunkta er stærra svæði raskað.



Mynd 3.17. Frágangur ólíkra svæða.

3.9 Varmaleiðandi strengjasandur

3.9.1 Þættir sem stjórna varmaleiðni jarðefna

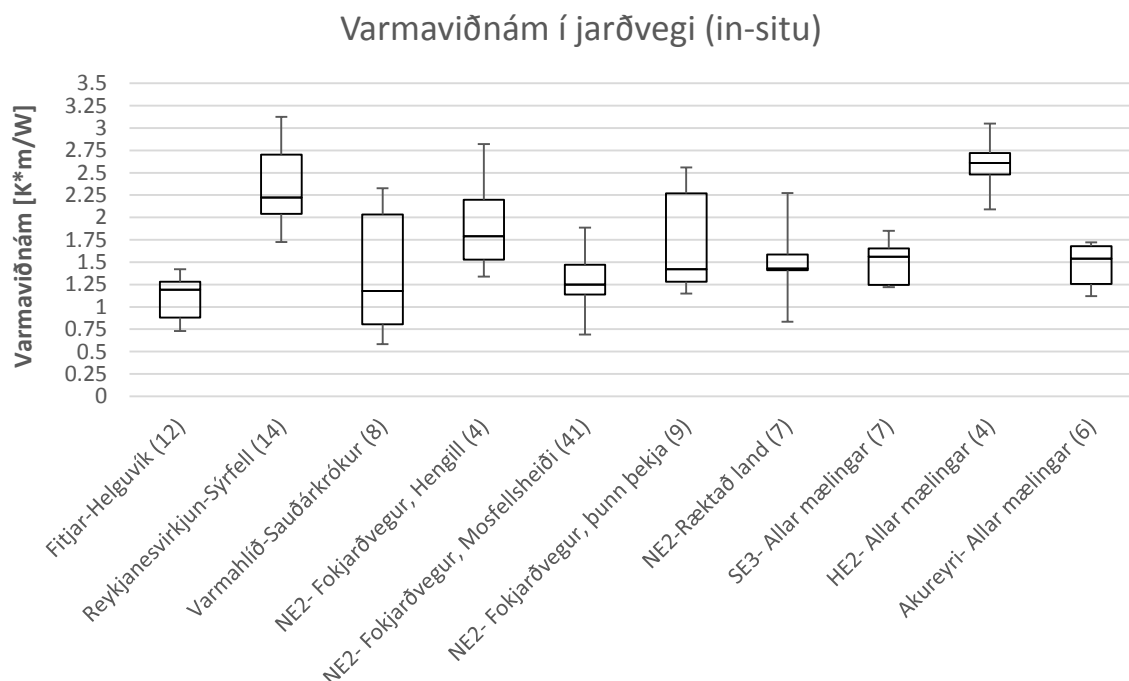
Varmaleiðni efnis lýsir eiginleikum efnisins til þess að leiða varma en varmaviðnám er tregða efnisins til að leiða varma. Varmaleiðni og varmaviðnám eru gagnkvæmar stærðir. Eining fyrir varmaleiðni er $W/K\cdot m$ en eining fyrir varmaviðnám er $K\cdot m/W$.⁹

Eins og fram kemur í kafla 2.3.2 skiptir miklu máli fyrir flutningsgetu jarðstrengja hversu vel jarðvegurinn leiðir varma frá strengnum. Þeir meginþættir, sem stjórna varmaleiðni jarðefna, eru berggerð, þéttleiki, ummyndun, lögun korna og kornastærðardreifing. Þessir eiginleikar hafa síðan áhrif á aðra mikilvæga þætti, svo sem hversu vel efnið þjappast, lekt, vatnsmettun og hárpípukrafta.

Þær steindir, sem mynda berg, hafa mjög mismunandi varmaleiðni. Sú steind, sem leiðir varma hvað best, er kvars, með meira en þrefalt minna varmaviðnám en flestar aðrar algengar steindir. Myndlausar steindir (gler) sem eru algengar í eldfjallajarðvegi, leiða varma verr en kristallaðar steindir. Þétt berg leiðir varma betur en blöðrótt berg og þá sérstaklega ef holrýmin eru ekki vatnsfyllt þar sem loft hefur meira en tíu sinnum hærra varmaviðnám en berg. Vatn leiðir varma heldur ekki vel. Samt sem áður lækkar varmaviðnám jarðvegs þegar hann er rakur vegna hreyfinga vatnsins og vatnið tengir auk þess jarðvegskornin betur saman.

3.9.2 Varmaleiðnieiginleikar íslenskra jarðefna

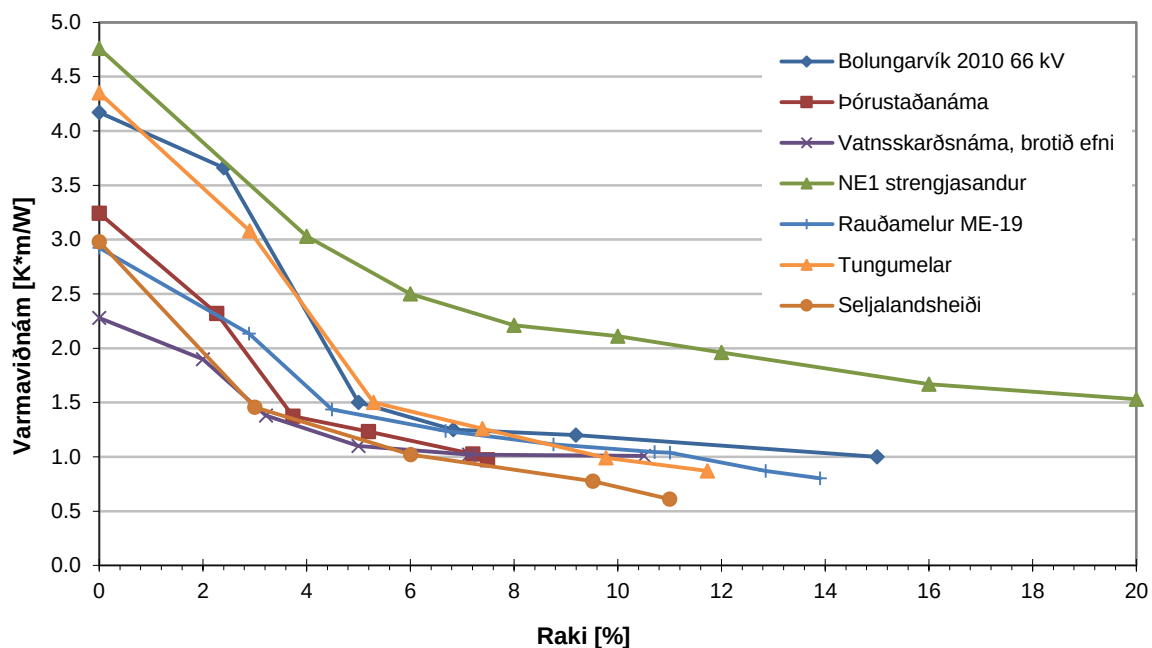
Mælingar á varmaleiðni íslenskra jarðefna, bæði á fyrirhuguðum strengleiðum og mögulegum efnistöðustöðum strengjasands, hafa farið fram frá árinu 2007. Niðurstöður mælinga á strengleiðum eru sýndar á mynd 3.18.



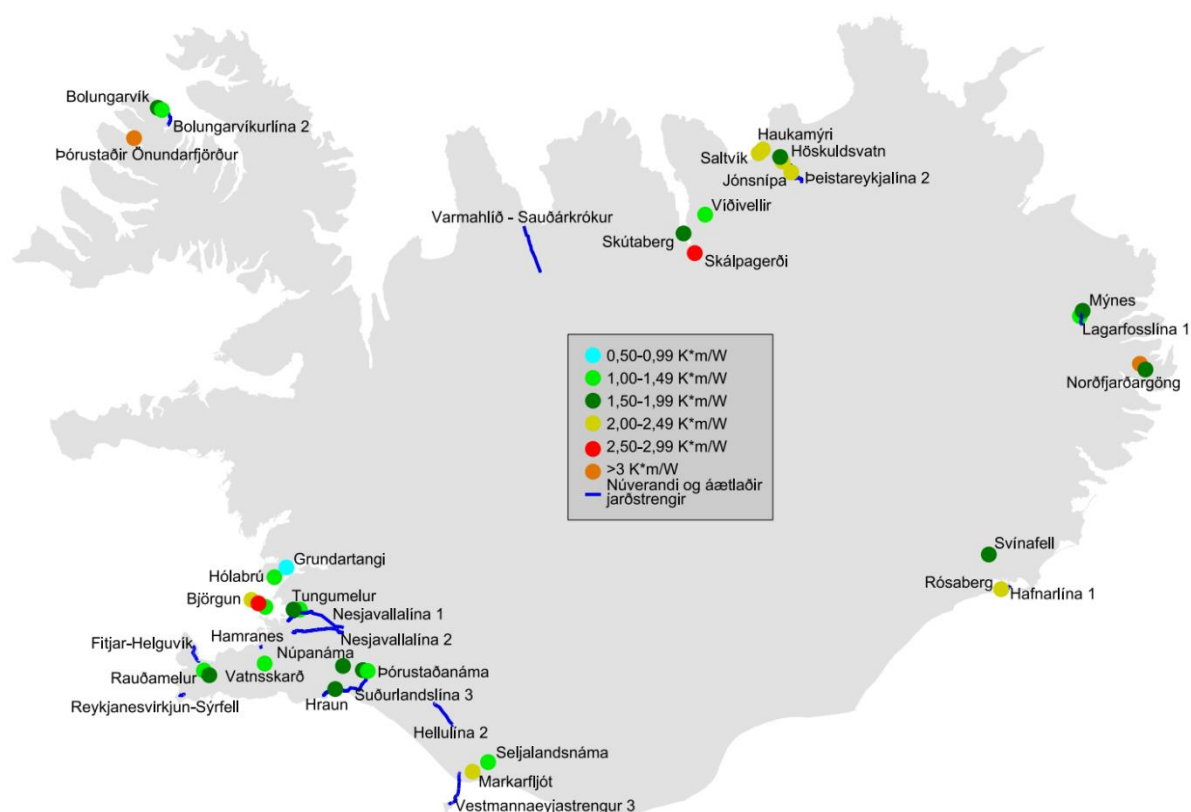
Mynd 3.18. Niðurstöður varmaviðnámsmælinga í jarðvegi á nokkrum núverandi og mögulegum strengleiðum. Kassarnir sýna fyrstu og þriðju fjórðungsmörk en línurnar sýna hámarks- og lágmarksgildi. Meðaltal allra sýna í gagnasafninu er $1,53 K\cdot m/W$, staðalfrávikðið er $0,55$.

⁹ Kelvin-metrar per watt.

Varmaviðnám jarðefna er mjög háð rakastigi. Til þess að átta sig betur á hvaða rakastigi eðlilegt er að gera ráð fyrir við mismunandi náttúrulegar aðstæður hefur Landsnet sett á laggirnar rannsóknarverkefni þar sem fylgst verður með rakastigi jarðvegs á völdum stöðum og fylgni þess við veðurfar. Mynd 3.19 sýnir varmaviðnám efna frá mismunandi stöðum sem fall af rakastigi. Því lægra viðnám því betur hentar efni sem strengjasandur. Skyndilegt ris í varmaviðnámskúrfu efnanna nálægt 5% rakastigi sýnir „krítískt rakastig“ viðkomandi efnis, þá byrjar vatnsfilman, sem umlykur kornin, að brotna niður. Þegar vatnsfilman verður ósamfelld fellur hárpípukrafturinn og þar með geta efnisins til rakaupptöku, nema til komi úrkoma. Lægra krítískt rakastig bendir til þess að efnið sé ekki eins háð raka til þess að leiða varma frá strengjum.



Mynd 3.19. Nokkur dæmi um varmaviðnámsmælingar á íslensku fyllingarefni.



Mynd 3.20. Niðurstöður og landfræðileg dreifing varmaviðnámsmælinga á efnistöðum. Mælingarnar hafa allar verið gerðar í tengslum við möguleg jarðstrengsverkefni.

Varmaviðnám í íslenskum jarðvegi er afar breytilegt, meðaltal þeirra mælinga, sem gerðar hafa verið við raunaðstæður í óhreyfðum íslenskum jarðvegi, er rúmlega 1,5 K*m/W. Sambærilegar mælingar á fyllingarefnum (sand) er um 1,8 K*m/W, þ.e. hærra en í óhreyfðum jarðvegi. Orsakast það af því að fínefni skortir gjarnan í slíkan sand. Lægstu varmaviðnámsgildi sem mælst hafa í íslenskum fyllingarefnum við 5% rakastig, eru á bilinu 1,1 til 1,2 K*m/W, á hinn bóginn geta hámarksgildi auðveldlega verið um og yfir 3 K*m/W. Við útreikning á flutningsgetu, áður en jarðkönnun hefur farið fram á viðkomandi strengleið og efnistöðum, er því eðlilegt að miða við varmaviðnám um 1,5 K*m/W. Til samanburðar nota Danir varmaviðnámsgildið 0,8 K*m/W við útreikning á flutningsgetu strengja. Eins og fram kemur í kafla 2.3.2 getur flutningsgeta strengja aukist yfir 30% þegar varmaviðnám umhverfisins lækkar úr 1,5 K*m/W í 0,7 K*m/W þannig að eftir miklu er að slægjast þegar leitað er leiða til að lækka varmaviðnám í umhverfi jarðstrengja.

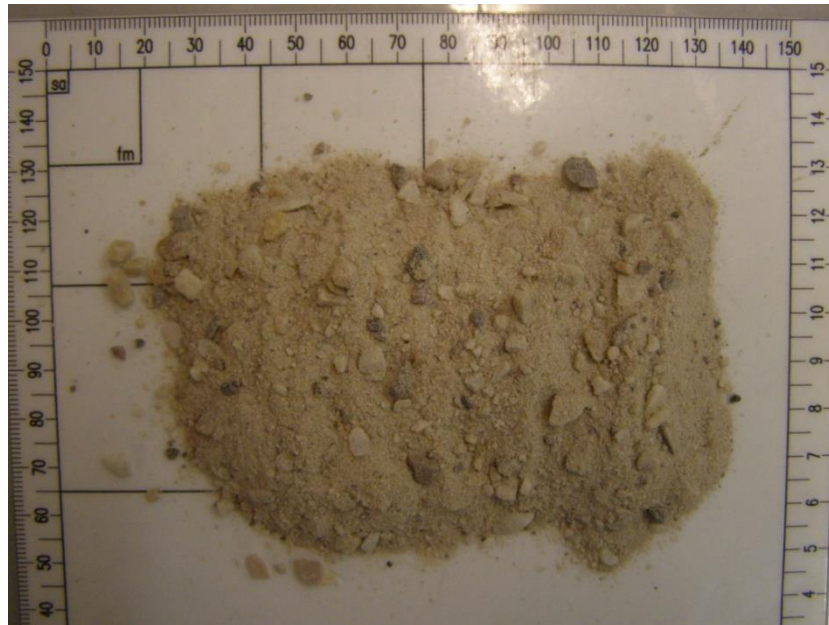
3.10 Möguleikar til þess að bæta varmaleiðni

3.10.1 Innflutningur fylliefna með lágt varmaviðnám

Í áratugi hafa malarefni verið flutt til Íslands í stórum stíl til malbiksframleiðslu og að einhverju leyti til notkunar í steypu. Var því ákveðið að kanna hvort hagkvæmt gæti verið að flytja inn fylliefni með lágt varmaviðnám, þ.e. kvars, fyrir strengjasand. Að teknu tilliti til flutningskostnaðar á sjó og landi sem og vinnu við niðurlögn gæti slíkur sandur verið um tvöfalt dýrari en íslenskur strengjasandur. Þar sem varmaviðnám slíks fylliefnis gæti verið 40 til 50% af varmaviðnámi innlendra efna er tilefni til að skoða kostnaðinn við slíka aðgerð í samhengi við þann möguleika að minnka strengþvermál og viðhalda sömu eða aukinni flutningsgetu með ódýrari streng.

3.10.2 Endurunnið kvars

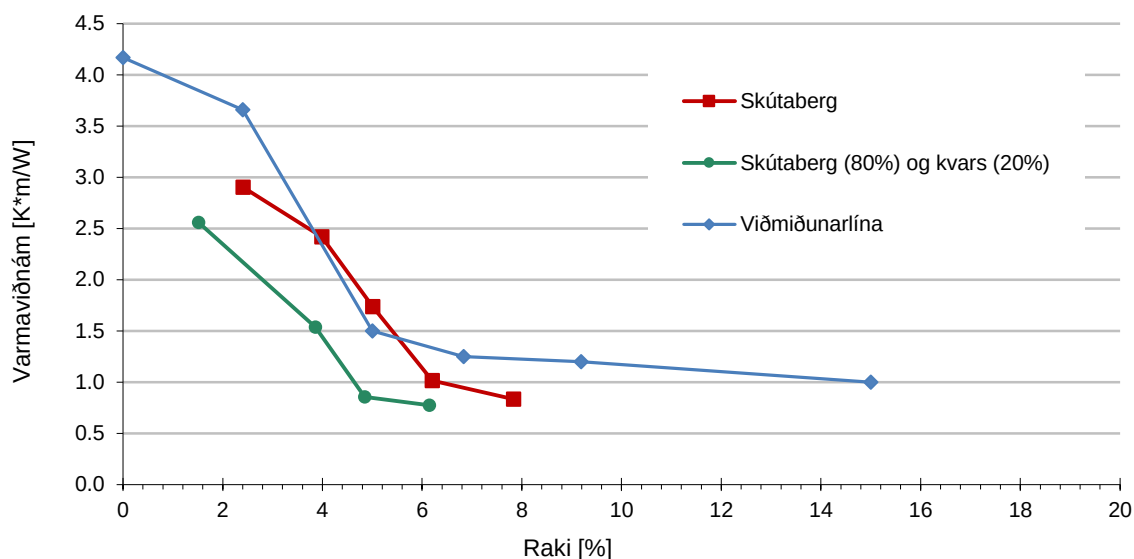
Járnblendiverksmiðja Elkem á Grundartanga flytur árlega inn 220.000 tonn af kvasi frá Noregi. Hingað til hafa einungis kornastærðir stærri en 12 mm verið notaðar í þeirra framleiðslu en kornastærðir 0 til 12 mm, 6.000 til 7.000 tonn á ári, er úrgangsefni sem hefur verið sett í landfyllingar og flæðigryfjur á Grundartanga. Sýni af úrgangskvasinu var mælt á rannsóknarstofu og reyndist hafa varmaviðnám $0,5 \text{ K}^*\text{m/W}$ við 3,8% raka.



Mynd 3.21. Sýni af úrgangskvasi frá Elkem á Grundartanga.

Möguleiki á því að nýta úrgangskvars frá Grundartanga við jarðstrengslagnir var kannaður og gerir Landsnet ráð fyrir að nýta efnið á völdum stöðum í jarðstrengsverkefnum á næstunni. Flutningskostnaður hefur mikil áhrif á heildarkostnað við nýtingu á efninu.

Algenzt er að fylliefni í íslenskum námum skorti fínefni til þess að henta sem strengjasandur. Auk þess að nota Grundartangakvasið beint í skurð var kannað hvaða áhrif það hefði að blanda því saman við innlend jarðefni nærri framkvæmdastað. Tilraun var gerð til þess að blanda 20% af kvasi saman við fylliefni frá Eyjafjarðarsvæðinu. Niðurstaða þeirrar tilraunar lofar mjög góðu, sérstaklega við lágt rakastig. Krítískt rakastig efnisins lækkaði úr 6% í 4,7% og varmaviðnámið við 5% rakastig mældist $0,8 \text{ K}^*\text{m/W}$ sem þýðir að blandaða efnið er mjög góður og stöðugur strengjasandur á íslenskan mælikvarða.



Mynd 3.22. Varmaviðnám fylliefnis úr Eyjafirði (rauð lína) og varmaleiðnám efnisins eftir íblöndun 20% kvars (græn lína). Bláa línan er viðmiðunarlína sem notuð hefur verið í 66 kV verkefnum hérlandis.

3.10.3 Varmaleiðandi steypa

Í þéttbýli og víðar þar sem verja þarf strengi fyrir ytra hnjaski eru þeir stundum umluktir varmaleiðandi steypu. Steypan er gjarnan með lágan styrk (weak mix) svo mögulegt sé að brjóta steypuna utan af strengnum án þess að skemma strenginn. Varmaleiðandi steypa minnkar auk þess líkurnar á því að jarðvegurinn umhverfis þorni út þar sem krítisku 50°C mörkin (sjá umfjöllun kafla 2.3) eru nú við ytra byrði steypunnar í stað strengkápunnar.

Við lagningu Nesjavallalínu 2 (NE2) var varmaleiðandi steypa notuð í fyrsta sinn hérlandis. Fylliefnin í steypunni voru innfluttur danskur sandur blandaður við þétt íslenskt berg (sk. Hornafjarðarperlu). Varmaviðnám steypunnar mældist undir 0,8 K*m/W. Byggt á þeirri reynslu er kostnaður við efni og útlögn varmaleiðandi steypu í skurð (án ídráttarröra) áætlaður um 10 til 15 sinnum hærri en notkun hefðbundins strengjasands.

Varmaleiðandi steypa er stöðugt og gott fylliefni. Tæplega er þó raunhæft að nota steypu sem meginfylliefni með jarðstrengjum á Íslandi sökum mikils kostnaðar, m.a. vegna mikilla flutningsvegalengda. Steypulausn gæti hins vegar hentað á völdum stöðum, t.d. við þveranir eða þar sem aðstæður eru sérlega óhentugar, t.d. þurr jarðvegur og þrengsli.

3.10.4 Varmaleiðandi efja (Bentonite)

Varmaleiðandi efja er notuð erlendis, t.d. í Danmörku til þess að fylla með háspennustrengjum sem dregnir eru í rör (til þess að lækka varmaleiðnám), t.d. við stefnuborun eða í lagnastokkum. Slíkt hefur einnig verið gert hérlandis, t.d. við lagningu Nesjavallalínu 2. Þar fór strengframleiðandinn fram á að ídráttarrörin væru fyllt með varmaleiðandi efju og einnig rýmið milli rörs og bergs. Varmaleiðandi efja samanstendur að öllu jöfnu af fíngerðum kvarssandi, bentoníti og þjálniefnum. Flutt var inn efja með varmaleiðnámi á bilinu 0,52 til 0,62 K*m/W en einnig var þróuð blanda hérlandis sem mældist með varmaleiðnámi 0,65 til 0,74 K*m/W.

Notkun varmaleiðandi efju er talinn hagkvæmur kostur til þess að lækka varmaleiðnám þar sem sérstakra lausna er þörf.

4 KOSTNAÐARMAT

4.1 Almennt

Við áætlun kostnaðar er bæði metinn stofnkostnaður og líftímakostnaður (life-cycle cost, LCC).

Stofnkostnaður er mat á öllum kostnaði mannvirkis frá hugmyndastigi og þangað til mannvirkið er tekið í rekstur. Hann innifelur meðal annars innkaup á búnaði og verklegar framkvæmdir auk afleidds kostnaðar við skipulags- og leyfismál, hönnun, eftirlit og umsjón verkkaupans sem og fjármagnskostnað.

Líftímakostnaður er mat á heildarkostnaði á líftíma mannvirkis frá upphafi og þar til mannvirki hefur lokið hlutverki sínu og verið fargað. Líftímakostnaður inniheldur meðal annars: stofnkostnað, rekstrarkostnað, viðhaldskostnað, bilanakostnað, kostnað vegna orkutapa, skortkostnað og förgunarkostnað. Allir þættir líftímakostnaðar eru færðir á sameiginlegt verðlag með núvirðisreikningi.

Landsnet metur stofnkostnað með óvissugreiningu þar sem hver kostnaðarliður er ákvarðaður með þremur gildum: Líklegasta gildi, lágt gildi ($q_{10} = 10\%$ líkur á að kostnaður verði undir gefnu gildi) og hátt gildi ($q_{90} = 90\%$ líkur á að kostnaður verði undir gefnu gildi). Út frá þessari dreifingu og fylgni milli kostnaðarpátta er fundin heildaróvissa í kostnaðarmati. Við ákvarðanatöku um framkvæmdir er miðað við gildin P_{50} og P_{85} . Gildið P_{50} er miðgildi kostnaðaráætlunar og þá eru 50% líkur á að kostnaður verði innan áætlunar. Við gildið P_{85} eru 85% líkur á að kostnaður verði innan þess gildis.

4.2 Strengverð

Innkaup jarðstrengja er yfirleitt stærsti einstaki kostnaðarliðurinn í jarðstrengsverkefnum og því er mikilvægt að kostnaðaráætlun byggji á áreiðanlegum upplýsingum um strengverð. Unnt er að áætla strengverð eftir tveimur leiðum á forstigum verkefnis:

- (i) Byggt á verðupplýsingum frá strengframleiðendum áður en eiginlegt útboð á sér stað, gjarnan nefnt „budget price“.
- (ii) Byggt á raunverulegum samningsverðum framleiðenda í svipuðum verkum.

Ætíð er nokkur óvissa í strengverði vegna ýmissa þátta, má þar nefna:

- Stöðu á markaði, framboð og eftirspurn.
- Magn fyrirhugaðra innkaupa, það er dýrara að kaupa lítið magn.
- Hráefnisverð, verð á áli og kopar hefur verið mjög breytileg á undanförunum árum.
- Væntanleg verk hjá verkkaupa. Framleiðendur gefa oft betra verð til verkkaupa sem er vænlegur framtíðar viðskiptavinur.

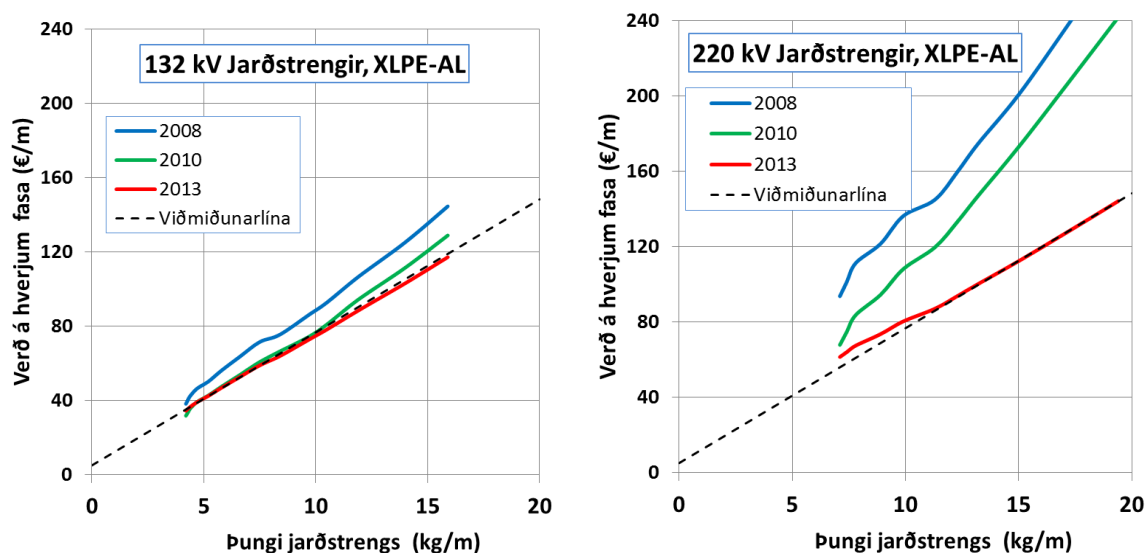
Í niðurstöðu könnunar, sem framkvæmd var af Europacable (2011), var talið að strengframleiðsla myndi anna eftirspurn í Evrópu um fyrirsjáanlega framtíð. Árleg framleiðslugeta var metin sem 700 til 1.000 km af einrásu strengjum á 220 og/eða 400 kV spennu (2100 til 3000 km strenglengd). Talið var að unnt væri að anna aukinni eftirspurn með nýjum framleiðslulínum en það tekur um tvö til þrjú ár að byggja og hefja rekstur á nýjum línunum.

Samningur við strengframleiðanda inniheldur yfirleitt eftirfarandi þætti:

- Jarðstreng.
- Samsetningar og endatengibúnað.
- Samsetningarvinnu á streng, þ.e. strengframleiðandi sendir sérhæfða starfsmenn á verkstað sem sjá um samsetningu strenghluta í niðurlögn.
- Prófanir á streng.

Verð jarðstrengja ræðst af nokkrum þáttum, svo sem kostnaði við leiðara, kápu, skerm, skermbindingu, einangrun, hálfleiðarakápu auk kostnaðar við framleiðsluna sjálfa þar sem koma til þættir eins og tæki, orka, vinnuafli o.fl. Verð á þyngdareiningu strengs er breyta sem lýsir nokkuð vel verði XLPE-AL strengja, þ.e. á mismunandi spennustigum, af mismunandi stærð og með mismunandi flutningsgetu. Hér á eftir er kostnaður á þyngdareiningu notaður sem viðmið þó að það sé nokkur einföldun.

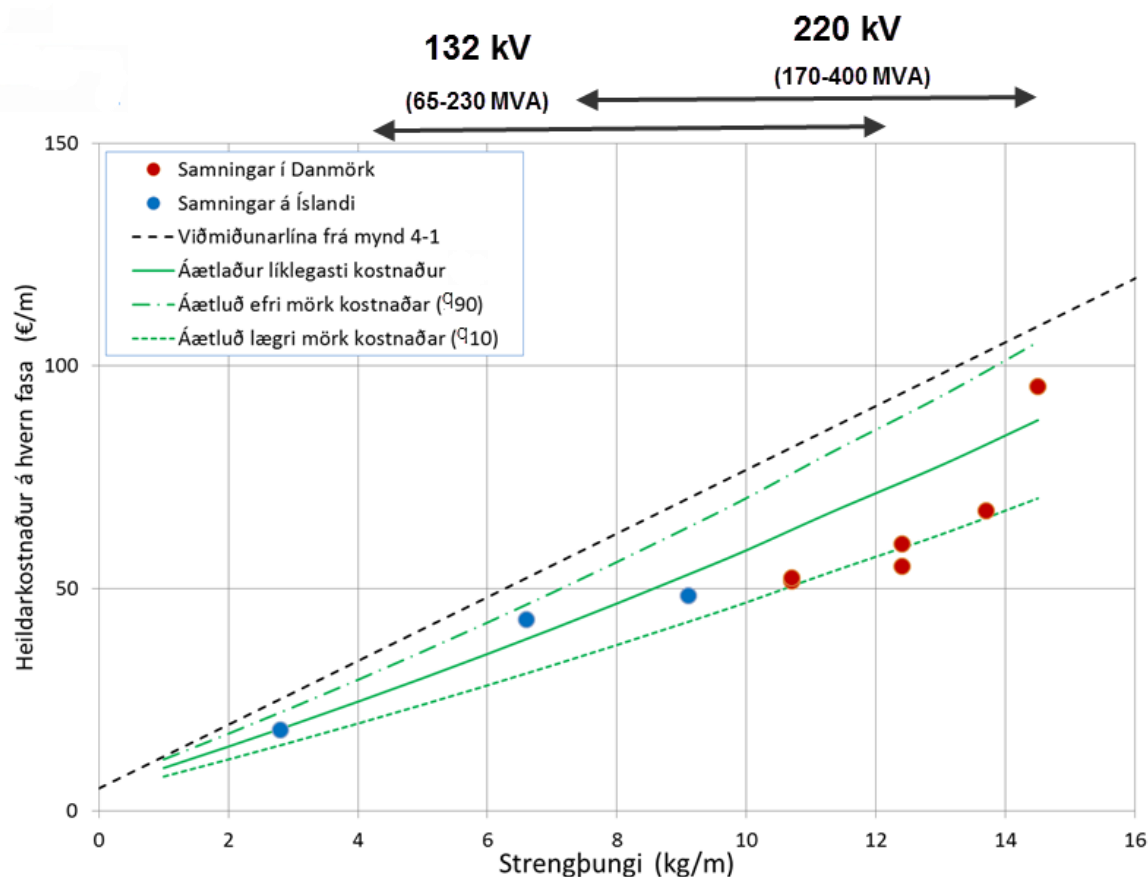
Landsnet hefur á undanförunum árum leitast við að hafa sem bestar verðupplýsingar um innkaupsverð jarðstrengja. Reglulega eru sendar verðfyrirspurnir til framleiðenda jarðstrengja (budget price) og niðurstöður settar í kostnaðargrunn, ásamt fyrirliggjandi raunverði. Kostnaðargrunnurinn er síðan notaður við kostnaðarmat jarðstrengsverkefna. Mynd 4.1 sýnir þróun á strengverði í kostnaðargrunni, sem hlutfall af þunga, á tímabilinu 2008 - 2013. Uppgefið verð er fyrir fremur stutta strengi (5-20 km strenglengd) og innifelur samsetningar og samsetningavinnu. Verð á 132 kV strengjum hefur lækkað heldur á tímabilinu á meðan verð 220 kV strengja hefur lækkað mikið. Verð á strengjum árið 2013 nálgast brotalínuna sem er sýnd eins á báðum myndum.



Mynd 4.1. Verð í verðgrunni Landsnets á tímabilinu 2008-2013, innifalið er strengur, samsetningar og samsetningavinna fyrir XLPE-AL strengi. Verðin eru einkum byggð á verðupplýsingum framleiðenda (budget price) til Landsnets.

Reynslan sýnir að framleiðendur hafa tilhneigingu til að gefa upp fremur há verð í svörum við verðfyrirspurnum samanborið við tilboðsverð þar sem nokkrir framleiðendur taka þátt. Raunveruleg tilboðs- og samningsverð frá sambærilegum útboðum gefa því ávallt betri upplýsingar. Mynd 4.2 sýnir raunveruleg samningsverð úr útboðum á Íslandi og í Danmörku á tímabilinu 2009 - 2014. Samningsverðin innihalda allan kostnað við framleiðslu, samtengingar, vinnu við samsetningar, flutning að hafnarbakka auk hluta af prófunarkostnaði. Strenglengd er mismunandi milli samninga, stærstu samningarnir eru um kaup á 180 km af streng. Munur milli tilboða og verðupplýsinga framleiðenda við verðfyrirspurnum skýrist að hluta til af mismunandi verkstærð en einnig af samkeppnisáhrifum.

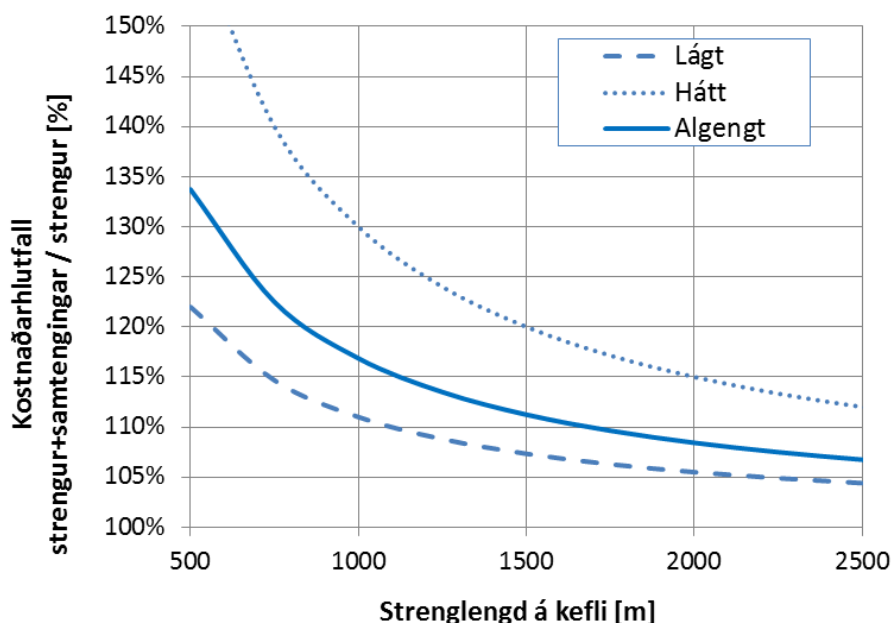
Mynd 4.2 sýnir einnig áætlaðan kostnað sem unnið er með í þessari skýrslu, heildregin lína sýnir líklegasta kostnaðarmat en brotalínur sýna efri- og neðri mörk. Í kostnaðarmati er tekið tillit til mismunandi fjarlægðar milli tengipunkta, flutningskostnaðar og verkstærðar.



Mynd 4.2. Strengverð (XLPE-AL) úr samningum á Íslandi og Danmörku frá árunum 2009 - 2014. Innifalið er: strengir, samsetningar, vinna við samsetningar, flutningur að hafnarbakka, hluti af prófunum o.s.frv. Svört brotalína sýnir viðmiðunarlínu frá mynd 4.1 og grænar línur sýna áætlað strengverð sem unnið er útfra í þessari skýrslu.

Með fleiri raunverðum úr samningum hefur myndast áreiðanlegri verðgrunnur fyrir innkaupsverð á jarðstrengjum. Af mynd 4.1, mynd 4.2 og undirliggjandi gögnum má sjá að verð jarðstrengja hefur lækkað undanfarin ár og þá einkum á stærri og flutningsmeiri strengjum, eða um allt að helming fyrir stærstu 220 kV strengi. Ástæður verðlækkunar á stærri strengjum eru taldar nokkrar, s.s. tæknipróun í framleiðslu strengja og þrátt fyrir mikinn vöxt í eftirspurn eftir strengjum hefur framboð aukist hraðar m.a. með vaxandi þátttöku framleiðenda utan Evrópu.

Kostnaður við hverja samtengingu leiðara er mikill og bilanatíðni strengja eykst með fjölda tengipunkta. Töluverður ávinningur er því af fækkun samtenginga þ.e. að hafa lengri streng á hverju kefli. Mynd 4.3 sýnir dæmigerð tengsl lengdar milli samsetninga og kostnaðar. Lengd milli samsetninga á 220 kV spennu er oft á bilinu 800 – 1500 m. Miðað við það má gera ráð fyrir að kostnaður við samtengingar sé á bilinu 10 - 20% ofan á verð jarðstrengs. Verð á samsetningum (efni og samsetningarvinna) er breytilegt milli framleiðenda og myndin sýnir dæmi um efri og neðri mörk samsetninga.



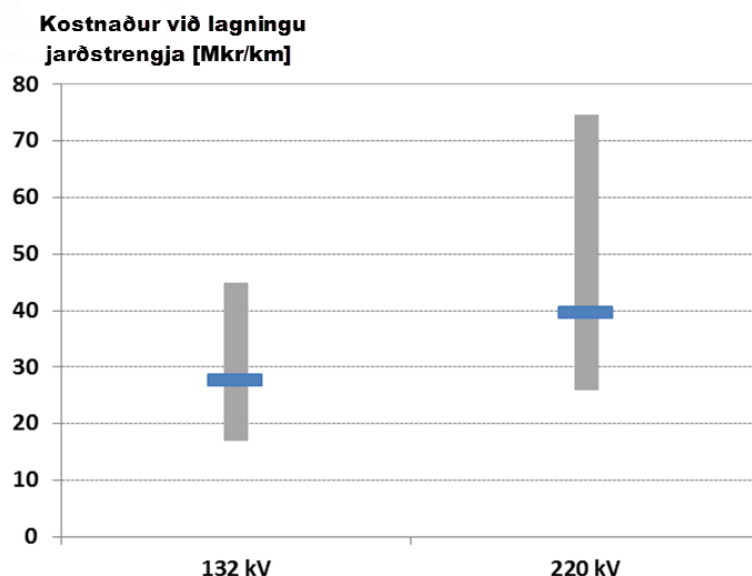
Mynd 4.3. Samband kostnaðar samsetninga (efni og samsetningavinna) sem hlutfalls af strengverði og strenglengdar á kefli. Endatengingar jarðstrengs eru ekki innifaldar.

4.3 Jarðvinna og lagning jarðstrengja

Kostnaður við lagningu jarðstrengja er umtalsverður hluti stofnkostnaðar og getur verið mjög breytilegur eftir aðstæðum. Almenn er hann töluvert hærri í og við byggð samanborið við sveitir og óbyggð svæði. Nærri byggð þarf oft að þvera vegi, vatns- og hitaveitulagnir, rafstrengi, ljósleiðara o.s.frv. Þá setur framtíðarskipulag mannvirkja oft skorður við leiðarvali og legu. Almenn leiða þveranir og skorður til aukins kostnaðar.

Hagstæðasta lagningaraðferðin er yfirleitt lagning í opinn skurð, grafinn með hefðbundinni gröfu. Nokkrir þættir hafa áhrif á kostnað, þeir helstu eru: (i) klöpp sem þarf að fjarlægja úr skurði, (ii) aðgengi að heppilegum strengjasandi með góðri varmaleiðni, (iii) sérstakar þveranir, t.d. árþveranir, (iv) þörf fyrir slóða, (v) hugsanlegar kröfur um að fjarlægja slóða eftir lagningu strengs, (vi) kröfur um að fjarlægja aukaefni sem ekki er endurnýtt í skurð, (vii) kröfur um yfirborðsfrágang eftir lagningu.

Mynd 4.4 sýnir lagningarkostnað sem má vænta við lagningu á einu strengsetti í grafinn skurð. Kostnaðurinn getur verið á töluverðu bili og ræðst af staðbundnum aðstæðum, verkstærð og kröfum til verks, munurinn getur verið allt að þrefaldur.



Mynd 4.4. Dæmigert kostnaðarsvið við lagningu eins setts af jarðstreng á Íslandi, meðalkostnaður er sýndur sem blá lína. Kostnaður er án VSK.

4.4 Undirbúningur, leyfismál, hönnun, eftirlit og umsjón

Undirbúningskostnaður samanstendur af vinnu við leiðarval, forhönnun verks og mat á umhverfisáhrifum. Lagningu niðurgrafinna strengja/lagna 10 km eða lengri utan þéttbýlis eða óháð vegalengd á verndarsvæðum þarf að tilkynna til Skipulagsstofnunar samkvæmt lögum um mat á umhverfisáhrifum. Skipulagsstofnun ákvarðar hvort framkvæmdin sé háð mati á umhverfisáhrifum.

Kostnaður við leyfismál inniheldur m.a. kostnað vegna skipulagsmála, leyfa og greiðslna til landeigenda. Skipulagsstofnun fer fram á að gert sé ráð fyrir stofnkerfi, þ.m.t. jarðstrengjum, á aðalskipulagi sveitarfélaga og á deiliskipulagi, ef farið er um svæði sem hafa verið deiliskipulögð. Auk þess þarf að afla leyfis frá Orkustofnun og framkvæmdaleyfis frá viðkomandi sveitarfélagi. Heimild landeigenda er forsenda þess að framkvæmdaleyfi taki gildi og öflun slíkra leyfa felur oftast í sér greiðslu fyrir það land sem fer undir mannvirki og helgunarsvæði þeirra.

Kostnaður við hönnun, eftirlit og umsjón innifelur fullnaðarhönnun fyrir útboð, útboðsgagnagerð, samninga við verktaka, úttektarprófanir, eftirlit með framkvæmd og umsjón með framkvæmd og verksamningum. Kostnaðurinn er einkum háður verkstærð og hversu flókin framkvæmdin er.

Reynslan sýnir að þessir kostnaðarpættir, þ.e. undirbúningur, leyfismál, landbætur, hönnun, eftirlit og umsjón, eru verulega háðir aðstæðum og umfangi og eru samtals oft á bilinu 10 til 20% af stofnkostnaði.

4.5 Orkutöp

Orkutöp í jarðstrengjum eru reiknuð til kostnaðar og innifalin í líftímakostnaði. Helstu töp í jarðstrengjum eru viðnámstöp í leiðurum, einangrunartöp og skermtöp. Þar að auki eru einhver orkutöp í spólum í útjöfnunarstöðvum en ekki er reiknað með þeim hér.

Þegar töpin hafa verið fundin þarf að meta þau til fjár. Þegar horft er á fjárfestingar í grunnkerfum þjóðfélagsins er oft horft til þjóðhagslegs kostnaðar fremur en rekstrarlegrar útkomu í fyrirtækjarekstri. Í því ljósi er eðlilegt að horfa á jaðarkostnað við raforkuöflun á hverjum tíma þegar verið að meta kostnað af töpum í flutningskerfi raforku. Til lengri tíma litið

hækkar kostnaður við raforkuöflun þar sem fyrst er ráðist í hagkvæmustu kostina og því má gera ráð fyrir að orkuverð, sem metið er á þennan hátt, fari hækkandi.

Flutningstöp í kerfi Landsnets voru um 340 GWh árið 2012 og nýtingartími flutningstapa rúmlega 6.100 stundir. Fyrir slíkan notanda ætti jaðarkostnaður orkuöflunar í vatnsorku nú að vera um 3,3 kr/kWh sem er í góðu samræmi við orkuverðið sem nú býðst á íslenska markaðinum. Kostnaður í nýjum jarðgufustöðvum er líklega nokkuð hærri en í vatnsaflsstöðvum eða um eða yfir 4 kr/kWh. Þegar búið verður að nýta flesta leyfilega virkjunarkosti vatnsorku og jarðgufu er líklegt að vindorka geti verið hagkvæmasti orkuvinnslukosturinn með samspili við virkjaða vatnsorku. Kostnaður við orkuöflun í slíkum kostum gæti orðið um 6 kr/kWh.

Ef kostnaður vegna tapa er metinn út frá jaðarkostnaði orkuöflunar ætti því að miða við hækkandi verð á næstu áratugum en að það fari ekki yfir 6 kr/kWh. Hér er reiknað með því að orkuverðið vegna tapa byrji í 3,5 kr/kWh og hækki síðan um 2,5% á ári uns það verður komið í 6 kr/kWh og haldist óbreytt eftir það.

4.6 Rekstur, viðhald og bilanakostnaður

Til rekstrarkostnaðar jarðstrengja telst hlutdeild í rekstri flutningskerfisins og starfsemi Landsnets. Kostnaðurinn er að hluta tengdur hlutdeild í orkuflutningi og einnig hlutdeild í stofnkostnaði.

Eftir að jarðstrengur hefur verið tekinn í rekstur má vænta þess að hann sé viðhaldslítill í mörg ár. Reglubundið eftirlit innifelur eftirlit með strengleið, eftirlit með að utanaðkomandi aðilar sem vinna nærri streng valdi ekki skaða, mælingar og eftirlit með hita við streng, sérfræðiþjálfun starfsmanna til að takast á við bilanir, lagerhald fyrir aukaefni, eftirlit og hreinsun á endatengingum og úttektir.

Bilanir verða í öllum búnaði og jarðstrengir eru engin undantekning. Bilanir jarðstrengja orsakast oft af vinnu utanaðkomandi aðila í nágrenni strengs. Kostnaður við bilanir felst í viðgerðarkostnaði og kostnaði vegna straumleysis. Reynslutölur sýna að viðgerðartími vegna bilana í jarðstreng, samsetningum og endabúnaði er oftast á bilinu 3-4 vikur en getur verið allt að tveimur mánuðum. Stuttur viðgerðartími krefst þess að: (i) sérfræðingar, sem setja saman samskeyti séu strax tiltækir, (ii) varaefni sé aðgengilegt, (iii) gott aðgengi að bilanastað, (iv) auðvelt að staðsetja og finna bilun.

Í vissum tilvikum kann að vera þörf á að huga að áhrifum langs viðgerðartíma og meðfylgjandi straumleysis á rekstraröryggi flutningskerfisins og bregðast við með fyrirbyggjandi hætti. Sem dæmi má nefna bilun í jarðstreng sem er dreginn í rör eftir stefnuborun. Bilun getur verið langvarandi og jafnvel óljóst hvort unnt sé að draga strenginn út til viðgerðar ef rörið hefur verið fyllt t.d. með bentonite. Til þess að stytta hugsanlegan straumleysistíma kann að vera ástæða til fyrirbyggjandi aðgerða og leggja auka streng (einn fasa) í upphafi, það er þó kostnaðarsamt.

Áreiðanlegar tölur um rekstrarkostnað, viðhaldskostnað og bilanakostnað eru ekki fyrirbyggjandi fyrir jarðstrengi. Hér er gert ráð fyrir að árlegur kostnaður við þessa þætti sé 0,5% af stofnkostnaði.

4.7 Líftími og förgunarkostnaður

Líftímagreining á kostnaði þarf að innihalda aðgerðir sem grípa þarf til við lok líftíma mannvirkis, þ.e. að aftengja og hugsanlega að fjarlægja mannvirki.

Undanfarna áratugi hefur framleiðsla á jarðstrengjum fyrir háa spennu verið að þróast og liggja því ekki fyrir miklar upplýsingar um líftíma nýjustu kynslóða jarðstrengja. Algengast er að gera ráð fyrir að nýir strengir hafi 40 ára endingartíma. Ábyrgð strengframleiðenda er yfirleitt á bilinu tvö til þrjú ár en getur í einstaka tilvikum verið allt að fimm ár. Dæmi eru um að framleiðendur

telji að búast megi við lengri líftíma en ekki er komin næg rekstrarreynsla á nýjustu gerðir jarðstrengja til að staðfesta það.

Þegar XLPE strengur hefur lokið hlutverki sínu er val á milli eftirtalinna kosta

- Skilja jarðstreng eftir í jörðu.
- Fjarlægja jarðstreng.
- Framlengja líftímann með rekstri á lægri spennu.

Algengast hefur verið að skilja XLPE jarðstrengi eftir óhreyfða í jörðu eftir að þeir hafa verið teknir úr rekstri. Efnin í XLPE jarðstrengjum brotna ekki niður í náttúrunni og því er vaxandi umræða um hvort óæskilegt sé að skilja jarðstrengi eftir til frambúðar. Ef þörf er á að fjarlægja jarðstreng úr jörðu eftir notkun getur það leitt til álíka umfangsmikilla framkvæmda og niðurlagningu, mögulega þarf slóðagerð fyrir framkvæmdina. Það er því mjög kostnaðarsamt að fjarlægja grafna strengi og getur það leitt til óæskilegs rasks á yfirborði. Auðveldara og ódýrara er að fjarlægja jarðstrengi sem eru settir í loftfyllt rör, þá má í flestum tilfellum fjarlægja með útdrætti og jafnvel endurnýta rörið.

Mikil óvissa er um kostnað við förgun. Hér er gert ráð fyrir að hann sé 6% af stofnkostnaði. Þetta er kostnaður sem nær yfir einhverja frágangsvinnu í lok líftíma en er of lágur ef þörf er á að fjarlægja streng í lokin.

4.8 Aðrir þættir sem meta má til virðis

Þar sem þörf er á auknum orkuflutningsmannvirkjum kann tímalengdin við að fá mannvirkið samþykkt og byggt að hafa áhrif á hagkvæmnimat. Ferlið við mat á umhverfisáhrifum og leyfismál fyrir ný mannvirki tekur sífellt lengri tíma. Tímalengdin við loftlínur er oft að lágmarki 5 til 10 ár. Talið er að yfirleitt taki skemmri tíma að fá leyfi fyrir jarðstrengjum. Í sumum tilvikum má reikna þennan styttri tíma til virðis í hagkvæmnimati.

Ákvörðun um flutningsþörf jarðstrengja er yfirleitt tekin út frá þeirri forsendu að framtíðarvöxtur orkuflutnings sé þekktur. Reynslan sýnir að mörgum flutningsmannvirkjum raforku er skipt út eða breytt verulega áður en fyrirhuguðum líftíma er náð eða hrörnun takmarkar notkun. Þetta stafar af ófyrirséðri framtíð þar sem orkuflutningur breytist í takt við þarfir notenda. Flutningsmannvirki eins og jarðstrengur, sem hefur flutningsgetu umfram fyrirséða þörf, hefur innra virði sem kann að raungerast í framtíðinni ef forsendur breytast. Mögulegt er að taka tillit til þessa í hagkvæmnimati ef tekið er tillit til óvissu í forsendum.

5 KOSTNAÐARGREINING TVEGGJA JARÐSTRENGSLAGNA

5.1 Almennt

Gerð var frumathugun á tveimur umfangsmiklum jarðstrengslögnum við ólíkar aðstæður, bæði hvað varðar kerfislega þætti og jarð- og landfræðilega þætti. Nokkrar mögulegar útfærslur voru skoðaðir í hvoru tilviki fyrir sig í þeim tilgangi að varpa ljósi á mismunandi þætti sem taka þarf tillit til þegar leggja á hluta af flutningskerfinu í jörð. Um er að ræða eftirfarandi tilvik:

Sprengisandur. Lagning hluta af 220 kV háspennulínu, sem tengir flutningskerfi Suðurlands við Norðausturland yfir Sprengisand, í jörð. Heildarlengd línunnar er um 200 km. Mismunandi jarðstrengslengdir voru skoðaðar til þess að greina hvaða jarðstrengslengdir væru raunhæfar og hagkvæmast að leggja. Í þessu tilviki var skoðuð lausn þar sem miðað var við 400 MVA flutningsþörf en í því tilfalli dugar eitt strengsett og er þá gert ráð fyrir að byggðalínan nýtist sem varaleið. Sé þörf á meiri flutningsgetu er gert ráð fyrir að annað strengsett verði lagt og var einnig áætlaður kostnaður fyrir slíka útfærslu.

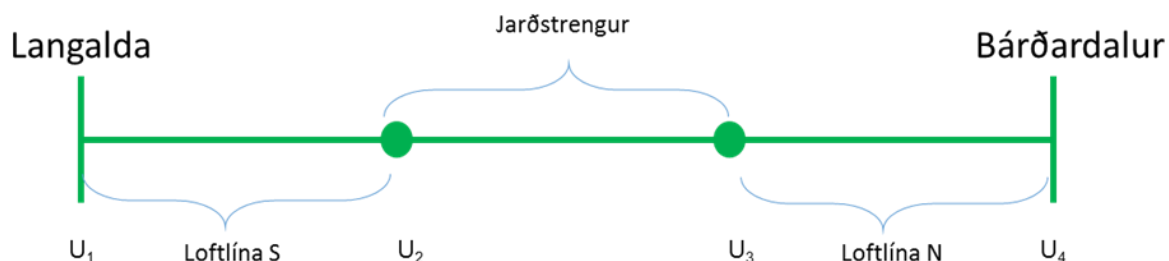
Eyjafjörður. Lagning hluta af 220 kV háspennulínu milli Akureyrar og Kröflu í jörð. Heildarlengd línunnar er 90 km, tilvikið gerir ráð fyrir lagningu 12 km næst Akureyri í jarðstreng. Strengleiðin liggur í útjaðri byggðar og útivistarsvæðis, fram hjá flugvelli og yfir votlendi. Flutningskrafa er 600 MVA sem krefst tveggja setta af álstreng eða eins setts af koparstreng. Af öryggisástæðum er gert ráð fyrir að bæði ál-strengsettin verði lögð á sama tíma og að auka leiðari (því lagðir fjórir leiðarar) verði lagður af koparstreng. Þá var einnig skoðaður sá kostur að nota núverandi 132 kV Kröflulínu 1 sem varaleið til að byrja með og annað strengsett yrði lagt þegar flutningsþörfin ykist.

5.2 SPRENGISANDUR

5.2.1 Skilgreining tilviks

Í þessu tilviki er skoðuð tenging milli suður- og norðurhluta íslenska flutningskerfisins yfir hálendið (Sprengisand). Sérstök áhersla er lögð á að skoða lagningu jarðstrengs á hluta leiðarinnar. Meginatriði í skoðun eru: (i) raftæknileg atriði sem setja skorður á hámarks lengd strengs, (ii) kostnaður við jarðstreng. Einungis er um frumathugun á tilvikinu að ræða og því má ekki líta á þetta sem verkhönnun á slíkri línu enda þarf mun ítarlegri skoðun fyrir slíka vinnu.

Einfölduð mynd af fyrirkomulaginu er sýnd á mynd 5.1 þar sem jarðstrengur er settur inn í hluta flutningslínunnar en hinn hlutinn er loftlína. „Loftlína S“ er syðri loftlínuhlutinn, „Jarðstrengur“ er jarðstrengshlutinn og „Loftlína N“ er nyrðri loftlínuhlutinn. Fjögur mismunandi dæmi hafa verið greind til þess að freista þess að meta mögulega hámarks lengd strengkaflans. Þessi dæmi eru sýnd í töflu 5.1.



Mynd 5.1. Einfölduð mynd af hugsanlegri tengingu yfir Sprengisand.

Tafla 5.1. Fjögur mismunandi dæmi sem skoðuð hafa verið fyrir Sprengisandslínu til þess að meta mögulega hámarks lengd jarðstrengskafla með tilliti til flutningskerfisins.

Dæmi	Lengd syðri loftlínuhluta Loftlína S (km)	Lengd jarðstrengs- hluta Jarðstrengur (km)	Lengd nyrðri loftlínuhluta Loftlína N (km)	Heildarlengd norður-suður tengingar (km)
1	82,5	25	92,5	200
2	63,7	53,6	79	196,3
3	63,7	66,2	66,8	196,7
4	57,5	75	67,5	200

Tilgangurinn með því að greina þessi dæmi er að finna grunn sem hægt er að byggja á varðandi mat á mögulegri lengd strengkaflans, með tilliti til flutningskerfisins. Þetta mat er ítrunarferli og er nánar lýst í kafla 5.2.4.

5.2.2 Aðstæður á strengleið

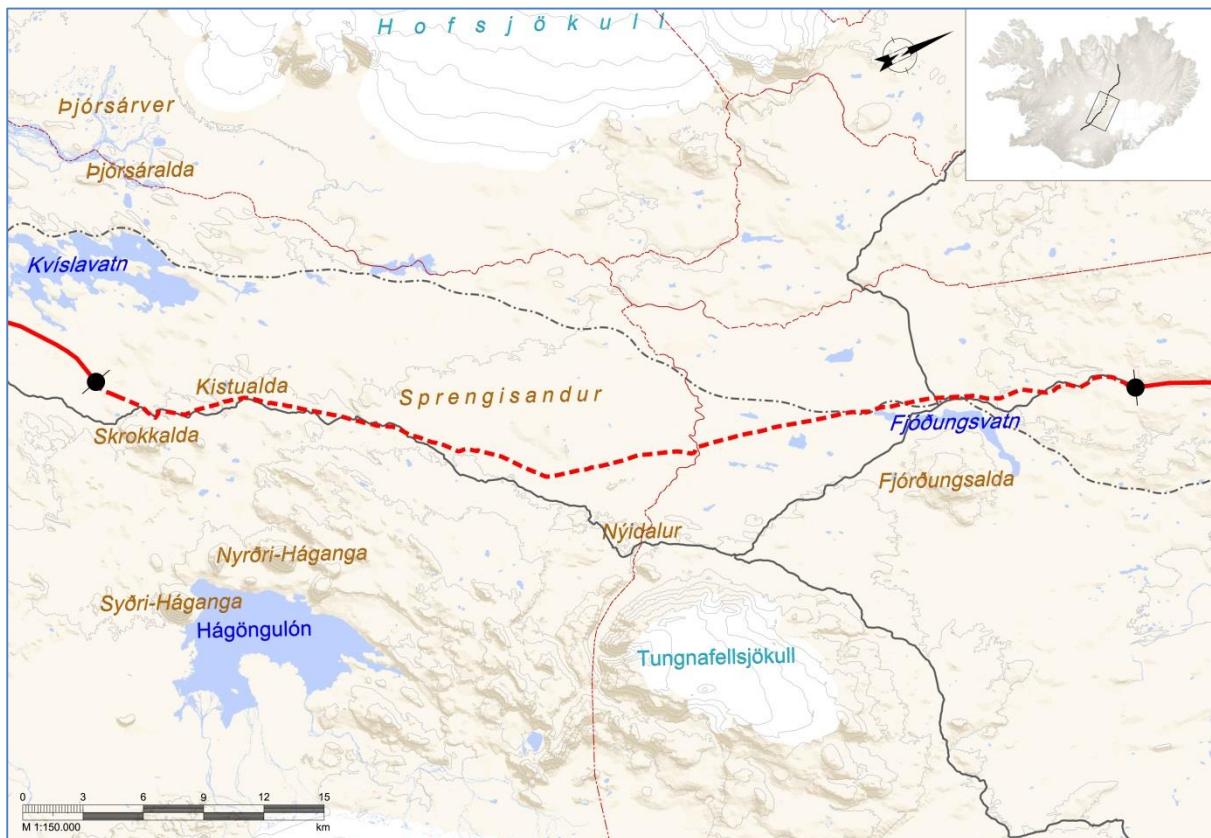
Fyrirhuguð Sprengisandslína liggur yfir hálendi Íslands milli Hofsjökuls og Vatnajökuls, frá Búrfelli í suðri og niður í Bárðardal í norðri. Skoðað var að leggja línuna í jörð á hluta leiðarinnar, sbr. töflu 5.1, og liggur sá kafla í 640 til 840 m.y.s. Miðað er við að jarðstrengurinn fylgi núverandi vegi yfir Sprengisand að hluta en að hluta fylgir hann ljósleiðara sem lagður var yfir Sprengisand árið 2001, sjá mynd 5.2.

Núverandi vegur yfir Sprengisand er ekki uppbyggður. Vegurinn er að öllu jöfnu opinn fyrir umferð 3 til 4 mánuði á ári. Sú staðreynd ásamt erfiðum veðurskilyrðum setur framkvæmdum við jarðstrengslagningu á Sprengisandi þröngar skorður. Það sama á við um byggingu loftlínu þó svo að verktími þar gæti líklega verið eitthvað lengri.

Landslag á strengleiðinni hentar ágætlega fyrir jarðstrengslögn, þar eru ávalar hæðir og víðáttumiklir sandar, engar brattar hlíðar eða djúpir árfarvegir að þvera. Mjög lítill gróður er á fyrirhugaðri strengleið. Jarðvegurinn er að öllu jöfnu 0,2 til 1,0 m þykkur foksandur með örþunnu malarlagi efst. Undir foksandinum er oftast misþykkur jökulruðningur eða árset. Berggrunnurinn er ýmist móberg eða basalt.

Þar sem Sprengisandsleið liggur í nágrenni gosbelta landsins má gera ráð fyrir því að foksandurinn hafi frekar lélega varmaleiðnieiginleika. Ætla má að jökulruðningurinn þar undir sé betri varmaleiðari. Aðstæður til skurðgraftar eru trúlega ágætær þó jökulruðningur þéttist og harðni með auknu dýpi.

Gera má ráð fyrir sífrera á afmörkuðum stöðum. Sífrerinn takmarkast þó við gróin svæði og svæði sem liggja í miklum skugga.



Mynd 5.2. Sprengisandur. Strengleiðin er sýnd með rauðri brotalínu en fyrirhuguð loftlína með heilli rauðri línu. Stærri kort er í viðauka A.

5.2.3 Forsendur

Festar voru nokkrar grunnforsendur fyrir tilvikið og síðan skoðað með útreikningum hvort ákveðnar strenglengdir væru mögulegar fyrir þessa línu. Þeim viðmiðum, sem þetta varða og þarf að skoða, hefur þegar verið lýst, í kafla 2.

Raftæknilegar forsendur eru sem hér segir:

- Flutningsþörfin er $S_n = 400$ MVA sýndarafl fyrir eitt strengsett og málgildi raunafls $P_n = 300$ MW.
- Skermleiðarar eru víxltengdir.
- Gæði raforku skulu vera í samræmi við reglugerð nr. 1048/2004. Þar eru skilgreind mörk á spennutoppum og -dældum, stærð og styrk yfirtóna og önnur atriði sem strenghlutinn og útjöfnunarbúnaður munu hafa áhrif á.
- Spennan á línunni, þar með talinn jarðstrengshlutinn, má hvergi fara yfir 1,1 per unit, þ.e. 10% yfir málspennu (sem er 220 kV), í rekstri.
- Spennuprep, sem verður við það að strengurinn er settur inn eða tekinn út, má ekki vera stærra en 5%, samkvæmt áðurnefndri reglugerð nr. 1048/2004.
- Mögulegt er að stilla spennustýringu rafala í nágrenni við syðri tengipunktinn niður undir 90% af málgildi. Það þýðir þó að spennan við suðurenda strenghluta Sprengisandslínu er um 2% yfir málgildi við spennusetningu.
- Óvíst er hvort búið verði að byggja upp 220 kV flutningskerfi á Norðurlandi þegar Sprengisandslína verður hugsanlega að veruleika. Því má reikna með að skammhlaupsaflíð sunnan megin verði um 3700 MVA en geti farið allt niður undir 800 MVA fyrir norðan. Með tengingu Sprengisandslínu má búast við að skammhlaupsaflíð norðan megin verði um 1000 MVA að öðru óbreyttu.

Forsendur fyrir hitaflutningsgetu jarðstrengs:

- Dýpt strengsins er 1,1 m. Skurðdýptin er 1,2 m og breidd hans við botn er 1,0 m. Varmaleiðandi fylliefni er í neðstu 0,1 m, þar á ofan er strengurinn lagður og fyllt upp með 0,4 m varmaleiðandi fylliefni að auki.
- Loft- og jarðvegshiti eru 5°C.
- Varmaviðnám jarðvegsins er 1,5 K*m/W að meðaltali.
- Gengið er út frá því að fylliefni hafi varmaviðnám 1,5 K*m/W.
- Strengurinn verður lagður í flata lögn með (120 + D) mm milli strengmiðja.
- Leyfilegur hámarkshiti utan á kápu (samfelldur) er 50°C. Þetta svarar til þess að útreiknaður hiti á leiðara sé um 65°C.
- Fylgst verður með hitastigi leiðara með ljósleiðara sem lagður verður með öllum strengnum.

Forsendur fyrir jarðvinnu og útlögn:

- Strengleiðin er 50 km.
- Strengur verður lagður í opinn skurð.
- Um það bil 1.000 m eru milli tengihola, sem gerir samtals 50 tengiholur.
- Þörf er fyrir þjónustuslóða fyrir 50% strengleidarinnar.
- Heildarverktími um 10 mánuðir á tveimur sumrum.
- Gert er ráð fyrir að fastur gröftur sé 5% af öllum greftri.
- Árset í slóðagerð er að finna víða á leiðinni. Í kostnaðaráætlun er gert ráð fyrir að strengjasand sé einnig hægt að fá í næsta nágrenni framkvæmdasvæðisins.
- Gert er ráð fyrir að gröftur og fylling gangi fyrir sig á hefðbundinn hátt án sérstakra vandræða.
- Gert er ráð fyrir að þveranir á línuleiðinni séu fáar og einfaldar, litlar ár og lækir.
- Lítil gróður er á fyrirhugaðri strengleið og því gengur yfirborðsfrágangur fyrst og fremst út á það að fjarlægja slóðir sem ekki mega vera, jafna út yfirborðsrask og hreinsa svæðið af öllum verksummerkjum eftir vinnubúðir og aðrar framkvæmdir.
- Fyllt er yfir strengi með uppgrofnu efni.
- Leiðarar eru dregnir í rör í þverunum.
- Styrkja þarf núverandi vegakerfi til þess að áætlaður verktími gangi upp.

Eftirfarandi forsendur eru notaðar við mat á kostnaði:

- Vextir á byggingartíma = 5,5%.
- Gengi á evru = 160 kr/€.
- Árlegur kostnaður við rekstur, viðhald og bilanir = 0,5% af stofnkostnaði.
- Kostnaður við förgun = 6% af stofnkostnaði.
- Líftími jarðstrengs = 40 ár.
- Orkutöþ. Hámarksálag á fyrsta rekstrarári = 30% af flutningsgetu strengs. Árlegur vöxtur orkuflutninga er línulegur uns 100% álagi er náð eftir 40 ár. Nýtingarstuðull ársins = 0,8.
- Orkuverð vegna tapa. Á árinu 2014 er það 3,5 kr/KWh og vex árlega um 2,5% uns það verður 6 kr/kWh.

5.2.4 Útreikningar og viðmið

Til að meta áhrif strengs voru framkvæmdir ýmsir útreikningar og er fjallað um þá í þessum kafla og þau viðmið sem þeir taka mið af.

Spennuviðmið

Eins og nefnt er í kafla 2 ákvarðar spennuhækkunin yfir strenginn hámarkslengdina á honum. Við spennusetningu frá öðrum enda má spennan á hinum endanum (þ.e. opna endanum) ekki vera hærri en 10% yfir málgildi.

Straumflutningsgeta

Grunnútfærsla fyrir Sprengisand er 3x1x2000 mm² álstrengur með lagskiptum leiðara. Útreiknuð flutningsgeta hans er 399 MVA m.v. ofangreindar forsendur.

Útjöfnunarpörf og hámarkslengd

Til þess að meta mögulega hámarkslengd jarðstrengs hefur verið gengið út frá spennuviðmiðinu enda er það viðmið stífara en viðmiðið m.v. raunaflsflutningsgetu, þ.e. krítísk lengd út frá spennuviðmiði er styttri en ef gengið er út frá raunaflsviðmiðinu, sbr. kafla 2.5.2. Grunnforsendan er sú að flutningsrásin sé spennusettt að sunnan og að spennan norðan megin (á opna endanum) fari ekki yfir 10% umfram málspennu. Launaflíð, sem strengurinn framleiðir, hækkar spennuna eftir strengleiðinni. Því lengri sem strengurinn er, þeim mun meira launafl framleiðir hann og því hærri verður spennan.

Aðaláskorunin í þessu samhengi er að halda spennunni á syðri endanum eins lágrí og mögulegt er, en þó án þess að stofna öðrum hlutum kerfisins í hættu.

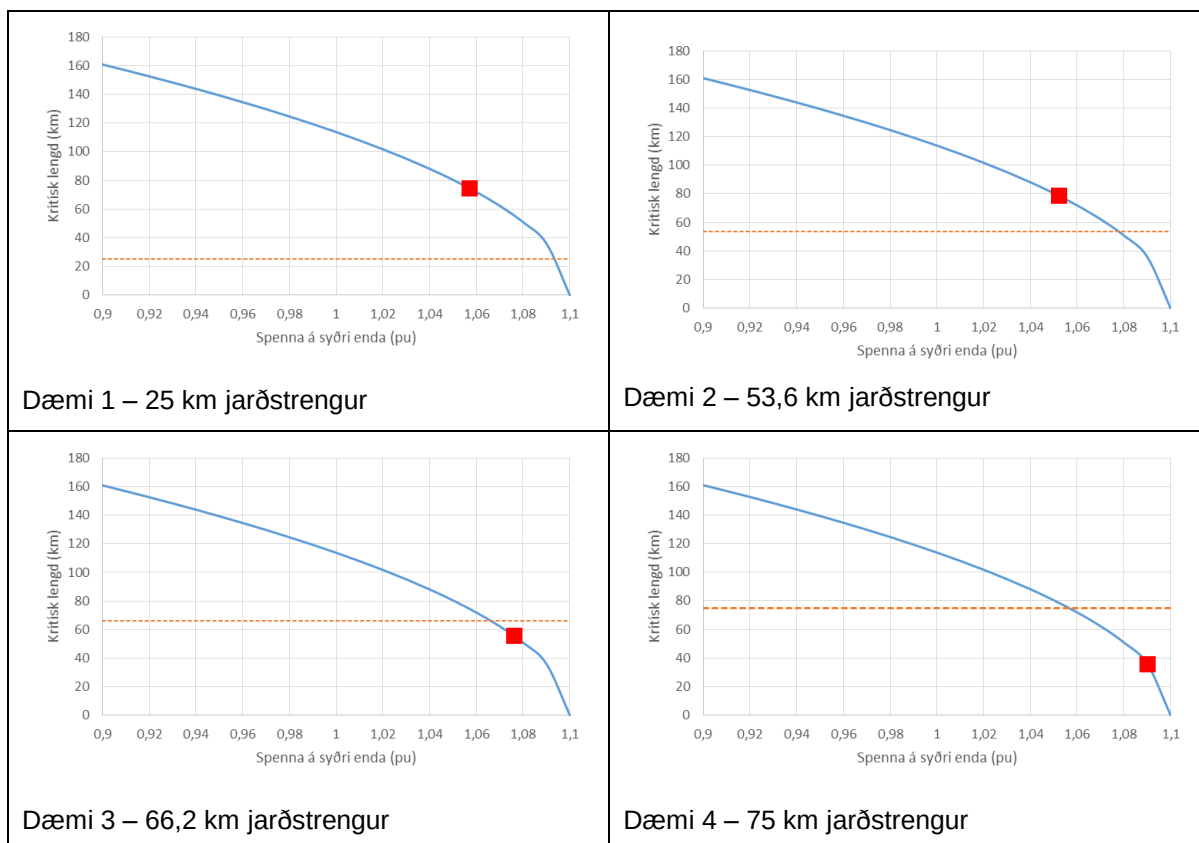
Í öllum þeim dæmum, sem skoðuð hafa verið hér (talin upp í töflu 5.1), hefur spennan sunnan megin verið lækkuð eins og kostur er, með aðstoð rafala þeirra virkjana sem til staðar eru þeim megin, og að auki er sett upp útjöfnun sem svarar til 50% af tómgangslaunaflsframleiðslu. Í töflu 5.2 eru niðurstöðurnar teknar saman og spennur í punktunum U₁, U₂, U₃ og U₄ á mynd 5.1 sýndar í því tilviki að verið sé að spennusetja línuna að sunnan.

Tafla 5.2. Niðurstöður á mati á krítískri lengd strengs. Byggt á viðmiði um spennun milli enda við spennusetningu að sunnan.

Dæmi	Spenna				Framleitt launafl í tómgangi (á 220 kV)	50% útjöfnun launafls	Athugasemdir
	U ₁ (pu)	U ₂ (pu)	U ₃ (pu)	U ₄ (pu)			
1	1,006	1,056	1,061	1,066	91,2 Mvar	45,6 Mvar	50% útjöfnun er sýnilega meira en nægjanleg.
2	0,983	1,052	1,071	1,075	195,6 Mvar	97,8 Mvar	50% útjöfnun er sýnilega meira en nægjanleg eða ekki er þörf á að lækka spennuna í syðri endanum svo mikið.
3	0,992	1,077	1,106	1,109	241,6 Mvar	120,8 Mvar	Þetta tilvik er á mörkunum eða jafnvel komið aðeins yfir mörkin, þ.e. spennukröfurnar eru í hættu og spennan á 66 kV kerfinu, sem tengt er 220 kV kerfinu, er orðin mjög lág.
4	1,000	1,087	1,125	1,128	273,6	136,8 Mvar	Í þessu tilviki er ekki nóg að lækka óskgildi spennunnar og jafna út 50%.

Þessar niðurstöður eru sýndar á myndrænan hátt á mynd 5.3 hér á eftir. Á þessari mynd hafa vinnupunktarnir úr töflunni að ofan (töflu 5.2) verið settir inn á mynd 2.9 í kafla 2.5.1.

Vinnupunktur, sem eru fyrir ofan appelsínugulu strikalínuna sýna að krítískri lengd sé ekki náð (miðað við spennuviðmiðið). Vinnupunktur, sem eru fyrir neðan línuna, sýna að lengd strengsins sé meiri en krítíska lengdin.



Mynd 5.3. Myndræn framsetning á niðurstöðum greiningar á krítískri lengd.

Þessar niðurstöður gefa vísbendingu um að hámarkslengdin, að gefnum ofangreindum forsendum varðandi útjöfnun og stýringu spennunnar, sé um það bil 60 km. Þetta gæti þó verið ofmat vegna þess meðal annars, að óvíst er hversu mikið er raunhæft að hægt sé að lækka spennuna sunnan megin meðan á spennusetningu stendur. Spennan á syðri enda sjálfs strengsins (í punktinum U_2) verður alltaf talsvert hærri en í tengipunktinum við kerfið („Langalda“), vegna rýmdaráhrifa strengsins.

60 km er talin vera útreiknuð hámarkslengd strenghlutans miðað við skammhlaupsafl kerfisins, viðmiðunarmörk spennu og útjöfnunarpörf. Útjöfnunarpörfin (50% af tómgangs) er metin vera 118,5 Mvar og má gera ráð fyrir því að þetta magn útjöfnunar sé of stór biti fyrir jafn veikt kerfi og það íslenska er, svo að raunhæf hámarkslengd er mun líklega nálægt 50 km og er miðað við það í þessari skýrslu. Í eðlilegum rekstri er ekki hægt að reka kerfið sunnanlands á þeirri lágu spennu sem nauðsynleg er við spennusetningu á svo löngum streng. Þegar spennan er á eðlilegu róli er 50% útjöfnun launafls ekki nægileg og það þarf að bæta við einingu, til dæmis einni 50 Mvar einingu, til þess að halda spennunni innan marka alls staðar.

Verði truflun á línunni í eðlilegum rekstri þarf að tryggja að báðir endar leysi út samtímis til þess að koma í veg fyrir óhóflegt spennuris.

Eins og komið er inn á í kafla 2.5.1 hefur skammhlaupsaflíð í tengipunktinum mikil áhrif á eigintíðni kerfisins. Jarðstrengur af þeirri gerð og lengd sem hér hefur verið skoðaður (50 km) framleiðir um það bil 180 Mvar af launaflí við málspennu. Þetta er gríðarlega mikið launafl í kerfi þar sem skammhlaupsaflíð er undir 4000 MVA í syðri hlutanum og getur farið niður undir 800 MVA norðan megin. Hlutfallið milli skammhlaupsaflsins og launaflsframleiðslunnar er mjög lágt, sem hefur í för með sér lága eigintíðni, þ.e. hún liggur á bilinu 3. til 5. yfirtónn (150 til 250 Hz). Þessir yfirtónar eru til staðar í kerfinu og munu því magnast upp í tengipunktum línunnar og geta haft skaðleg áhrif á spennugæði og valdið notendum óþægindum.

Búnaður til launaflsútföfnunar

Stærð eininganna til launaflsútföfnunar veltur að ákveðnu marki á lestun línunnar, þ.e. álaginu á hana. Lítil lestun kallar á meiri útföfnun en mikil lestun. Lengd strengs hefur afar mikla þýðingu fyrir stærðina. Það er að auki þörf fyrir viðbótarútföfnun við spennusetningu línunnar. Vegna þess hve mikill munur er á skammhlaupsafli sunnan- og norðan megin er ekki mögulegt að spennusetja línuna að norðan.

Virkasta staðsetningin fyrir spólurnar er á strengendunum. Fyrir dæmið með stysta strenginn (25 km) sýna aflflæðiútreikningar að 50% útföfnun sé nægileg í venjulegum rekstri og við spennusetningu, að því gefnu að hægt sé að lækka spennu sunnanlands. Í öðrum tilvikum, þ.e. með lengri strengjum, er 50% útföfnun ekki nægileg í venjulegum rekstri, og þarf þá að bæta við, eins og sýnt er í töflu 5.3.

Tafla 5.3. Þörf fyrir launaflsútföfnun fyrir tilvikin fjögur ásamt tilvikinu með áætlaðri hámarkslengd strengs í eðlilegum rekstri.

Dæmi	Strenglengd	Stærð spólu...	
		...við 50% útföfnun	Nauðsynleg viðbótar-útföfnun í eðlilegum rekstri
1	25 km	45,6 Mvar	-
2	53,6 km	97,8 Mvar	30 Mvar
3	66,2 km	120,8 Mvar	60 Mvar
4	75 km	136,8 Mvar	85 Mvar
Hámarkslengd	50 km	91 Mvar	40 Mvar

Aflflæðiútreikningarnir gefa ekki til kynna að þörf sé á útföfnun á sjálfri strengleiðinni. Af hagkvæmniástæðum er gert ráð fyrir að útföfnunareiningarnar verði allar eins, þ.e. ein (eða fleiri) á hvorum enda Sprengisandslínu, 40 til 80 Mvar hver, að undanskildu dæmi eitt þar sem aðeins er þörf á einni einingu.

Niðurstöðurnar hér að framan eiga við um eitt strengsett. Verði annað sett lagt, af sömu lengd (þ.e. 50 km), þarf að gera frekari varúðarráðstafanir. Ekki verður hægt að spennusetja bæði settin samtímis svo setja verður upp aflrofa við báða enda seinna settsins. Einnig þarf að gera ráð fyrir því að það þurfi að rúmlega tvöfalda útföfnunina og að þær einingar þurfi að vera við sinn hvorn enda strengsins. Þetta þýðir í raun að það að bæta við öðru strengsetti kallar á byggingu tengivirkja við sinn hvorn enda strengsins til þess að hýsa aflrofana og nýja útföfnunarbúnaðinn. Styrking flutningskerfisins norðan megin, þ.e. með auknu skammhlaupsafli, bætir mjög aðstæður til þess að hægt sé að bæta við öðru setti.

Tvö strengsett af þeim lengdum, sem hér eru til skoðunar (þ.e. 25 km og meira), þurfa alltaf aflrofa í báða enda fyrir að minnsta kosti annað strengsettið.

5.2.5 Jarðvinna og lagning strengs

Strengleiðin liggur yfir miðhálandi Íslands og núverandi vegakerfi þar þolir ekki þungaflutninga. Gert er ráð fyrir því að styrkja þurfi vegi og brýr að einhverju leyti áður en verkefnið hefst. Áætlað er að hægt sé að vinna að strenglöggninni á tímabilinu frá júní til október, en það tímabil er háð veðurfari og hversu miklar vegabætur verða gerðar. Veðurfar getur verið mjög breytilegt milli ára og þarf vinnuflokkurinn að vera tilbúinn að hefja vinnu um leið og aðstæður leyfa. Gert er ráð fyrir að verkið taki u.þ.b. tíu mánuði sem dreifast á tvö ár en til þess að það takist þarf veðurfar að vera hagstætt. Ef veðurfar er óhagstætt er ólíklegt að hægt sé að hefja framkvæmdir í júní og miklar líkur á því að framkvæmdir dreifist á þrjú ár, með umtalsverðum viðbótarkostnaði.

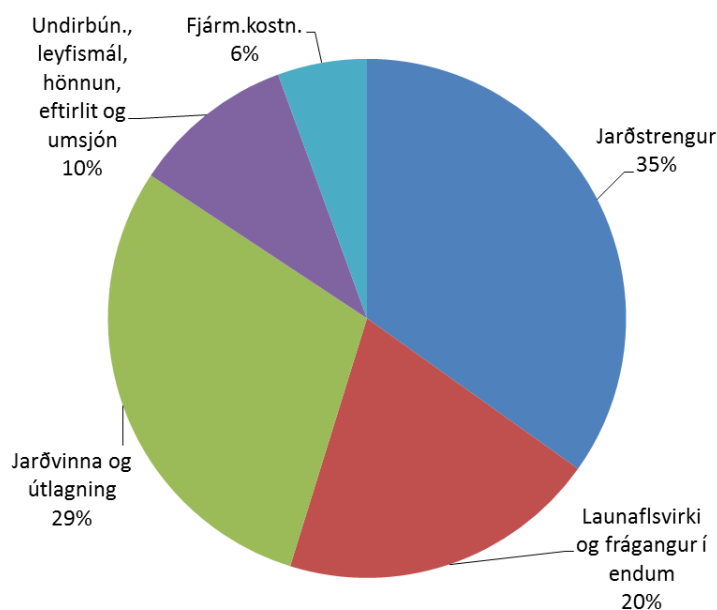
Vandamál sem gætu komið upp við útdrátt strengsins eru helst tengd ótryggu veðurfari. Gera verður ráð fyrir að hitastig geti farið niður fyrir -5°C svo hita þurfi strenginn fyrir útdrátt, eða fresta útdrætti tímabundið.

5.2.6 Kostnaðarmat

Stofnkostnaður er reiknaður með óvissugreiningu með forritinu @Risk. Við ákvarðanatöku um framkvæmdir lítur Landsnet til þeirrar óvissu sem kemur fram í kostnaðarmati, litið er til gildanna P_{50} og P_{85} . Gildið P_{50} er miðgildi kostnaðaráætlunar og þá eru 50% líkur á að kostnaður verði innan áætlunar. Við gildið P_{85} eru 85% líkur á að kostnaður verði innan þess gildis. Tafla 5.4 sýnir niðurstöður kostnaðarmats og mynd 5.4 sýnir hvernig kostnaður dreifist á helstu kostnaðarþætti.

Tafla 5.4. Stofnkostnaður jarðstrengs fyrir Sprengisandstilvik.

Stofnkostnaður	Miðgildi kostnaðar		85% mörk kostnaðar	
	P_{50}		P_{85}	
Útfærsla	[Mkr]	[Mkr/km]	[Mkr]	[Mkr/km]
Eitt strengsett, 3x1x2000mm ² Al (≈ 400 MVA)	6648	133,0	7543	150,9
Tvö strengsett, 2x3x1x2000mm ² Al (≈ 800 MVA)	12631	252,6	14332	286,6



Mynd 5.4. Dreifing kostnaðar á helstu verkþætti.

Einnig var reiknaður líftímakostnaður fyrir eitt strengjasett og er niðurstaðan sýnd í töflu 5.5.

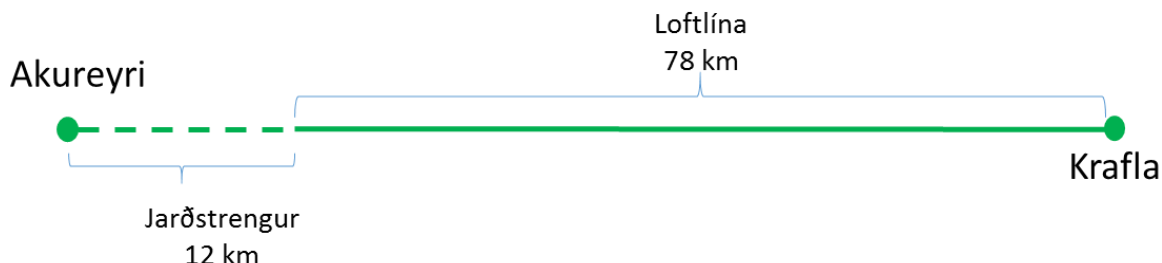
Tafla 5.5. Líftímakostnaður jarðstrengs – tilvik 1 – Sprengisandur með einu strengsetti.

Líftímakostnaður	Eitt strengsett (≈400 MVA)	
	[Mkr]	[% af heild]
Stofnkostnaður	6648	86,2%
Tapakostnaður	450	5,8%
Rekstur, viðhald og bilanir	563	7,3%
Förgun	47	0,6%
Samtals	7708	100,0%

5.4 EYJAFJÖRÐUR

5.4.1 Skilgreining tilviks

Í þessu tilviki er skoðað að leggja 12 km af fyrirhugaðri 90 km 220 kV loftlínu milli Akureyrar og Kröflu í jörð. Línuhlutinn sem hér er til skoðunar, eru fyrstu 12 km út frá tengivirkinu Kífsá fyrir utan Akureyri, sjá mynd 5.5.



Mynd 5.5. Einfölduð mynd af tengingunni Akureyri – Krafla.

Til þess að ná sömu flutningsgetu og fyrirhuguð loftlína, þarf að leggja tvö sett af jarðstrengjum. Tvö sett eru einnig nauðsynleg til þess að halda nægu rekstraröryggi. Hagkvæmt getur þó verið að áfangaskipta framkvæmdum þannig að annað settið væri lagt fyrst og treyst á núverandi 132 kV línu sem varaleið. Þannig mætti fresta lagningu á öðru strengsetti.

5.4.2 Aðstæður á strengleið

Strengleiðin liggur frá fyrirhuguðu tengivirki að Kífsá rétt ofan Akureyrar, til norðurs í átt að útivistarsvæðinu í Kjarnaskógi, í stórum dráttum samhliða núverandi loftlínum. Strengurinn þverar Glerá þar sem hún rennur í litlu gljúfri. Frá Kjarnaskógi að Akureyrarflugvelli voru þrjár strengleiðir skoðaðar (sjá mynd 5.6):

- Með norðurmörkum Kjarnaskógar undir flugbraut Akureyrarflugvallar.
- Eftir að mestu leyti fyrirbyggjandi göngustígum gegnum Kjarnaskóg, þá með suðurmörkum skógarins og suður fyrir flugbrautarendann.
- Eftir að mestu leyti fyrirbyggjandi göngustígum gegnum Kjarnaskóg, síðan áfram til suðurs og samhliða núverandi loftlínum að Eyjafjarðará.

Strengleiðirnar allar þvera síðan Eyjafjarðará og votlendið á árbökkum hennar á aðeins mismunandi stöðum og stefna þangað sem loftlínan tekur við neðst í hlíðum Vaðlaheiðar.

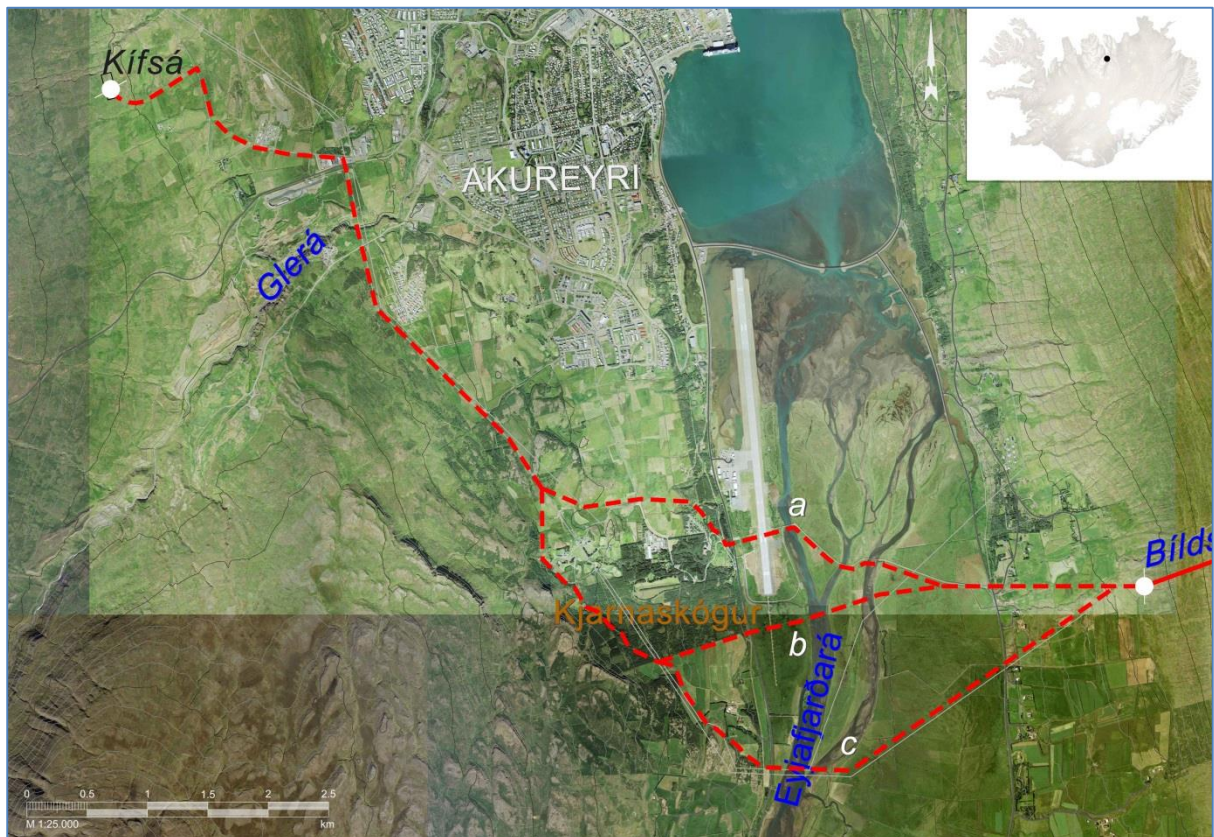
Nokkrar strengleiðir koma til greina, en í aðalatriðum eru jarðvegsaðstæður svipaðar þó að lengd innan hvernar jarðvegsgerðar sé misjöfn. Strengleiðin byrjar í 220 m.y.s. við tengivirkið að Kífsá. Þaðan liggur leiðin um graslendi og tún þar til kemur í hlíðina ofan við leirur Eyjafjarðarár. Hlíðin er skógivaxin en klöpp er í yfirborði á stöku stað. Þegar komið er austur fyrir leirurnar liggur strengleiðin upp að Vaðlaheiði í 130 m.y.s., þar sem loftlínan tekur við. Land þar er að mestu ræktuð tún.

Jarðvegsaðstæðum á strengleiðinni má gróflega skipta í þrennt, kafla 1, 2 og 3, sjá töflu 5.6. Í hlíðunum ofan Akureyrar og einnig uppi í hlíðum Vaðlaheiðar er mýrarjarðvegur með þunnum öskulögum og mörgum framræsluskurðum. Þrátt fyrir það er jarðvatnsborð nálægt yfirborði víðast hvar. Þá er einnig dálítið um klöpp í yfirborði. Í botni fjarðarins eru árslettta eða leirur. Efstu 20 til 30 cm á leirunum eru lífrænn votlendisjarðvegur. Þar undir eru þykk laus setlög. Jarðvatn er nánast í yfirborði. Jarðvegur í leirunum hefur háa lekt og mun afvötnun strengskurða verða mikilvægt atriði á framkvæmdatíma. Nokkur námusvæði eru í nágrenni strengleiðarinnar.

Varmaviðnám jarðvegarins á strengleiðinni er mjög breytilegt. Mýri og annar lífrænn jarðvegur, sem þekur stærstan hluta svæðisins er almennt með hátt varmaviðnám þrátt fyrir háa

jarðvatnsstöðu. Fokmoldin neðst í hlíðinni er skárri og er almennt með lægra viðnám en íblöndun lífræns efnis og öskulaga eykur samt viðnámið. Auk þess sem lágt rakastig gæti orðið til trafala. Sandurinn á ársléttunni virðist vera með þokkalega lágt viðnám við hátt rakastig og þar er ekki hætt á útpornun.

Erfiðar þveranir eru á öllum strengleiðunum. Fyrst þarf að þvera Glerá þar sem hún rennur í litlu gljúfri. Önnur flókin þverun er Akureyrarflugvöllur, ein strengleiðin liggur til dæmis undir flugbrautina. Þriðja þverunin sem allar strengleiðir þurfa að eiga við, er Eyjafjarðará sem rennur í nokkrum kvíslum yfir leirurnar.



Mynd 5.6. Eyjafjörður. Strengleiðirnar sem skoðaðar voru við Eyjafjörð, eru sýndar með rauðri brotalínu. Heil rauð lína hægra megin í jaðri myndarinnar sýnir hvar loftlína tekur við. Stærra kort er í viðauka A.

Tafla 5.6. Aðstæður á strengleið í Eyjafirði.

Kafli	1		2		3	
	Meðal	Versta tilvik	Meðal	Versta tilvik	Meðal	Versta tilvik
Varmaviðnám á strengleið [$K^{\circ}m/W$]	1,25	2,00	1,50	2,20	1,80	3,00
Varmaviðnám strengjasands [$K^{\circ}m/W$]	1,20		1,20		1,20	
Aðstæður	Árset		Fokjarðvegur, lífrænn að hluta		Mýri, hátt lífrænt innihald	

5.4.3 Forsendur

Markmiðið með þessu verkefni er að finna vænlega leið til þess að ná 600 MVA flutningsgetu frá Akureyri og yfir Eyjafjarðarsvæðið.

Raftæknilegar forsendur eru sem hér segir:

- Flutningsþörf er 600 MVA.
- Skermleiðarar eru víxltengdir.

Forsendur fyrir hitaflutningsgetu jarðstrengs:

- Dýpt strengsins er 1,1 m. Skurðdýptin er 1,2 m og breidd hans við botn er 1,0 m. Varmaleiðandi fylliefni er í neðstu 0,1 m, þar á ofan er strengurinn lagður og fyllt upp með 0,4 m varmaleiðandi fylliefni að auki.
- Loft- og jarðvegshiti er 10°C.
- Varmaviðnám jarðvegsins er 1,5 K*m/W að meðaltali.
- Fylliefnið hefur varmaviðnám 1,2 K*m/W.
- Strengurinn verður lagður í flata lögð með (120 + D) mm milli strengmiðja. Tvö strengsett verða lögð, með u.þ.b. 10 m bili milli skurðmiðja. Þannig verður komist hjá gagnkvæmum áhrifum hitamyndunar í strengjunum.
- Leyfilegur hámarkshiti utan á kápu (samfelldur) er 50°C. Þetta svarar til þess að útreiknaður hiti á leiðara sé um 65°C.

Forsendur fyrir jarðvinnu og útlögn:

- Framkvæmdasvæðið er algróið og því felst yfirborðsfrágangur fyrst og fremst í því að endurheimta fyrri gróður. Á skógarsvæðum má þó ekki planta yfir skurðstæðið (sjá umfjöllun í kafla 3.1).
- Strengleið allra valkostanna er á bilinu 12 til 13 km.
- Tvö strengsett verða lögð samtímis í aðskilda skurði.
- Stefnumörkun verður notuð við þverun Eyjafjarðarár og Akureyrarflugvallar.
- Um það bil 1.000 m eru milli tengihola, sem gerir samtals 24 tengiholur fyrir bæði strengsettin.
- Vinnuslóða þarf með 80% strengleiðarinnar. Slóðin verður á milli strengskurðanna.
- Heildarverktími er um 8 mánuðir, frá mars til október.
- Meirihluti leiðarinnar er hefðbundinn skurðgröftur í laus setlög. Jarðvatnsstaða er víða há sem krefst talsverðrar dælingar. Kostnaðaráætlun miðar við notkun grafrarkassa í votlendinu á bökkum Eyjafjarðarár. Gera verður ráð fyrir að hluti uppgraftrarins (s.s. mýrarjarðvegur) sé ónothæfur í strengskurð. Þarf þá að flytja að betra fyllingarefni úr námu. Nokkuð er um klöpp í skurði í fjallshlíðum beggja megin fjarðar. Klöpp, sem þarf að losa í skurði, er áætluð 15% af skurðsniði.
- Mikið er um þveranir, á vegum og lögnum, skurðum og girðingum. Gert er ráð fyrir því að múla (sjá kafla 3.4.1) undir Eyjafjarðarbrautirnar beggja megin fjarðar en grafa í gegnum minni götur. Stærstu þverunarverkefnin eru hins vegar Akureyrarflugvöllur (einn valkostur af þremur), Eyjafjarðará og Glerá. Í kostnaðaráætluninni er gert ráð fyrir að þvera Eyjafjarðará og flugvöllinn með stefnumörkun en Glerá með brú.

Eftirfarandi forsendum eru notaðar við mat á kostnaði:

- Byggingartími = 1 ár.
- Vextir á byggingartíma = 5,5%.
- Gengi á evru = 160 kr/€.
- Árlegur kostnaður við rekstur, viðhald og bilanir = 0,5% af stofnkostnaði.
- Kostnaður við förgun = 6% af stofnkostnaði.

- Líftími jarðstrengs = 40 ár.
- Stofnkostnaður er byggður á P_{50} gildinu.
- Orkutöp. Hámarksálag á fyrsta rekstrarári = 30% af flutningsgetu strengs. Árlegur vöxtur orkuflutninga er línulegur uns 100% álagi er náð eftir 40 ár. Nýtingarstuðull ársins = 0,8.
- Orkuverð vegna tapa. Á árinu 2014 er það 3,5 kr/KWh og vex árlega um 2,5% uns það verður 6 kr/kWh.

5.4.4 Útreikningar og viðmið

Til að meta áhrif strengs voru gerðir ýmsir útreikningar og er fjallað um þá í þessum kafla og þau viðmið sem þeir taka mið af.

Straumflutningsgeta

Hér eru bornar saman tvær útfærslur af þverskurðarflatarmáli leiðara. Niðurstöðurnar eru byggðar á líkanútreikningum sem taka tillit til strenggerðar, fylliefnis, jarðvegsgerðar og fleiri þátta. Niðurstöðurnar eru birtar í töflu 5.7.

Grunnútfærslan fyrir Eyjafjörð er tvö strengsett, hvort um sig með $3 \times 1 \times 1600 \text{ mm}^2$ álstrengjum með spunnum leiðara (e. stranded).

Til þess að fá samanburð á kostnaði var einnig skoðuð útfærsla með einu strengjasetti og koparleiðara. Flutningsþörfin næst ekki að fullu með þeirri útfærslu og því fylliefni sem valið var en henni væri hægt að ná með því að velja betra (og dýrara) fylliefni.

Tafla 5.7. Samanburður á tveimur útfærslum þverskurðarflatarmáls.

Útfærsla	Strenggerð	Varmaviðnám fylliefnis $K \cdot m/W$	Þykkt fylliefnis mm	Hitastig á leiðara $^{\circ}C$	Flutningsgeta A	Flutn.-geta MVA %
Grunnútfærsla	$2 \times 3 \times 1 \times 1600q$ Al	1,2	500	65	1844	117%
Koparleiðarar	$3 \times 1 \times 2500q$ Cu	1,2	500	65	1491	95%

Búnaður til launafslúttjónunar

Meginniðurstaðan, byggð á aflflæðiútreikningum, er sú að í eðlilegum rekstri sé sérstök útjöfnun ekki nauðsynleg. Þó geta komið upp truflanatilvik sem þarf að skoða sérstaklega og gætu kallað á útjöfnun að einhverju marki.

5.4.5 Lagning strengs

Strengleiðin er tæknilega nokkuð flókin, jarðvegsaðstæður eru margvíslegar, skógur, mýrarjarðvegur með hátt varmaviðnám og nokkuð er um klöpp í yfirborði. Þveranir eru margar og umfangsmiklar. Lauslega var skoðað að nota stefnuborun undir skógar- og útivistarsvæðið í Kjarnaskógi. Það er ekki talin hentug lausn, m.a. vegna þess að jarðvegsaðstæður eru mjög breytilegar og víða grunnt á klöpp. Gert er ráð fyrir að strengleið gegnum Kjarnaskóg fylgi núverandi stígum. Sökum margra þverana og þar af leiðandi ídráttar í rör og krappa beygja á strengleiðinni þarf að skipuleggja útdrátt strengsins í smáatriðum.

5.4.6 Kostnaðarmat

Stofnkostnaður var reiknaður fyrir fjórar mismunandi útfærslur. Fyrstu þrjár útfærslurnar (A, B og C) eru fyrir þær þrjár strengleiðir sem voru skoðaðar. Strengir voru valdir þannig að þeir uppfylltu fulla flutningsþörf, hún næst ekki með XLPE Al strengjum án þess að nota tvö strengsett. Fjórða útfærslan, D, er eftir sömu strengleið og útfærsla B en notaðir eru koparstrengir í stað álstrengja. Flutningsgeta þessarar útfærslu er aðeins undir flutningsþörf. Notaðir eru fjórir leiðarar þar sem fjórði leiðarinn er varaleiðari til þess að tryggja að straumleysi

verði innan ásættanlegra marka í bilanatilvikum. Fimmta útfærslan, E, er einnig eftir sömu strengleið og útfærsla B og með sömu strenggerð, en gert er aðeins ráð fyrir að annað strengsettið sé lagt í þessum áfanga. Flutningsgetan er undir flutningsþörf grunnforsendna, en þessi útfærsla gæti verið valkostur út frá hagkvæmnisjónarmiðum sem fyrsti áfangi framkvæmda þar til aukin flutningsþörf kallar á annað strengsett. Útfærslum er lýst í töflu 5.8.

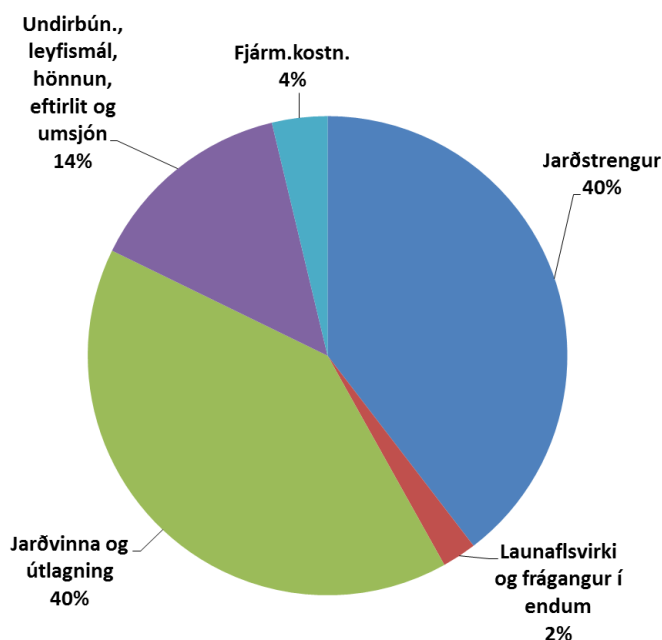
Tafla 5.8. Útfærslur fyrir Eyjafjarðartilvik.

Útfærsla	Lýsing á strengleið	Jarðstrengur	Flutnings- geta [MVA]	Lengd [km]	Fjarl. milli tengipunkta [m]
A	Undir flugvöll, tvö strengsett	6x1x1600q Al	700	11,69	1.000
B	Gegnum Kjarnaskóg, tvö strengsett	6x1x1600q Al	700	12,37	1.000
C	Samhliða loftlínu, tvö strengsett	6x1x1600q Al	700	13,21	1.000
D	Gegnum Kjarnaskóg, 4 koparstrengir	4x1x2500q Cu	570	12,37	1.000
E	Gegnum Kjarnaskóg, eitt strengsett	3x1x1600q Al	350	12,37	1.000

Tafla 5.9 sýnir niðurstöður reikninga fyrir allar útfærslur. Gildið P_{50} er miðgildi kostnaðaráætlunar og þá eru 50% líkur á að kostnaður verði innan áætlunar. Við gildið P_{85} eru 85% líkur á að kostnaður verði innan áætlunar.

Tafla 5.9. Stofnkostnaður jarðstrengs fyrir útfærslur A, B, C, D og E kostnaðarþættir gefnir sem miðgildi.

Stofnkostnaður	Miðgildi kostnaðar		85% mörk kostnaðar	
	P_{50}		P_{85}	
Útfærsla	[Mkr]	[Mkr/km]	[Mkr]	[Mkr/km]
A - Undir flugvöll, tvö strengsett	2809	240,3	3373	288,5
B - Gegnum Kjarnaskóg, tvö strengsett	2618	211,6	3061	247,5
C - Samhliða loftlínu, tvö strengsett	2706	204,9	3137	237,5
D - Gegnum Kjarnaskóg, 4 koparstrengir	3560	287,8		0,0
E - Gegnum Kjarnaskóg, eitt strengsett	1538	124,4	1786	144,4



Mynd 5.7. Útfærsla B, gegnum Kjarnaskóg, dreifing kostnaðar á helstu verkþætti.

Útfærsla B er ódýrust af þeim kostum sem uppfylla flutningsþörf. Útfærsla A er 7,3% dýrari sem orsakast af hærri kostnaði við jarðvinnu og útlagningu. Útfærsla C er 3,4% dýrari en B vegna lengri strengleiðar. Koparstrengur í útfærslu D er töluvert dýrari. Útfærsla E er augljóslega ódýrust en hún uppfyllir ekki þá flutningsþörf sem áætluð er til framtíðar og hefur ekki sama afhendingaröryggi. Þessi útfærsla getur samt sem áður verið valkostur fyrir fyrsta áfanga í nýrri 220 kV raflínu þar sem annað strengsett yrði lagt síðar.

Einnig var reiknaður líftímakostnaður fyrir útfærslur A, B og C og er niðurstaðan sýnd í töflu 5.10.

Tafla 5.10. Líftímakostnaður fyrir Eyjafjarðartilvik.

Líftímakostnaður	Útfærsla A		Útfærsla B		Útfærsla C	
	[MKr]	[% of heild]	[MKr]	[% of heild]	[MKr]	[% of heild]
Stofnkostnaður	2809	84,7%	2618	84,3%	2706	84,5%
Tapakostnaður	248	7,5%	248	8,0%	248	7,7%
Rekstur, viðhald og bilanir	238	7,2%	222	7,1%	229	7,2%
Förgun	20	0,6%	18	0,6%	19	0,6%
Samtals	3315	100%	3106	100%	3202	100%

HEIMILDIR

1. **B1.07, Cigre Working Group.** *Statistics on AC underground cable in power networks.* Paris : s.n., 2007.
2. **Kristensen, Anders H.** *Danish Policy on Underground Cabling of HV lines.* Spreitenbach : RGI Cable Workshop - Understanding Underground Cables, 2013.
3. **B1.07, Cigre Working Group.** *Report 338 - Statistics of AC Underground Cables in Power Networks.* s.l. : CIGRÉ, 2007. ISBN 978-2-85873-026-1.
4. **Olsen, Rasmus.** *Dynamic Loadability of Cable Based Transmission Grids. PHD-Thesis.* Lyngby : Technical University of Denmark DTU. Energinet.dk., 2013.
5. **ABB.** *XLPE Land Cable Systems - User Guide.*
6. **Silva, Filipe Miguel Faria da.** *Analysis and simulation of eletromagnetic transients in HVAC cable transmission grids. PhD thesis.* Aalborg University. Fredericia : Aalborg University, Energinet.dk, 2011.
7. **B1.10, Cigre Working Group.** *Report 379 - Update of Service Experience of HV Underground and Submarine Cable Systems.* s.l. : CIGRE, 2009. ISBN 978-2-85873-066-7.
8. **Simon Dalsgård and Unnur Stella Guðmundsdóttir.** *Kabelhåndbogen. AC-kabelanlæg 132-400 kV.* Fredericia : Energinet.dk. ISBN 978-87-90707-03-3, 2013.
9. **Bjarklind, Magnús.** *Gróðursetnig trjá- og runnaplantna, við og yfir háspennustrengjum.* Reykjavík : Óútgefið, 2009.
10. **Lesur, F, o.fl.** *Innovative insertion of very long AC cable links into the transmission network.* Paris : Cigré, 2014.
11. *Solving Zero-Miss with Cable Energisation at Voltage Peak, Based on Insulation Coordination Study Results.* **Guðmundsdóttir, Unnur Stella and Holst, Per B.** Vancouver : IPST2013, 2013.
12. **Ohno, Teruo.** *Dynamic Study on the 400 kV 60 km Kyndbyværket - Asnesværket Line - PhD report.* Fredericia : Aalborg University, Energinet.dk, 2012.
13. **61936-ed2.0, IEC.** *Power installations exceeding 1 kV a.c. - Part 1: Common rules.* 2010.
14. **Task Force B1.26.** *TB 347 - Earth potential rises in specially bonded screen systems.* s.l. : Cigré, 2008. ISBN 978-2-85873-034-6.
15. **C4.502, Cigre Working Group.** *Power System Technical Performance Issues Related to the Application of Long HVAC Cables.* 2013.
16. —. *Power System Technical Performance Issues Related to the Application of Long HVAC Cables.* s.l. : Cigré, 2013. ISBN 978-2-85873-251-7.
17. **B1.18, Cigre Working Group .** *TB 283 - Special bonding of high voltage power cables.* s.l. : Cigré, 2005.
18. **Holst, Per.** *The process for the Danish transmission grid towards all cables.* Vienna : s.n., 2010.
19. **RTE.** *Case Study Experiences in France.* Spreitenbach : s.n., RGI Cable Workshop - Understanding Underground Cables.

MYNDASKRÁ

Mynd 2.1. Dæmigerður 220 kV strengur með mikilli flutningsgetu.	13
Mynd 2.2. Flöt uppröðun (til vinstri) – þríhyrningsuppröðun (til hægri).	14
Mynd 2.3. Samanburður á segulsviði umhverfis 132 kV strengi sem lagðir eru í flata uppröðun og þríhyrningsuppröðun. Meðalstraumur er 100 A.	15
Mynd 2.4. Dæmigerður skurður og lagning strengleiðara.	17
Mynd 2.5. Útreiknuð flutningsgeta 220 kV jarðstrengja (ál og kopar) miðað við mismunandi þverskurðarflatarmál og við dæmigerðar aðstæður.	17
Mynd 2.6. Útskýring á helstu þáttum sem skipta máli varðandi strengskurð.	18
Mynd 2.7. Flutningsgeta 220 kV, 1400 mm ² Al strengs sem fall af varmaviðnámi fylliefnis.	18
Mynd 2.8. Flutningsgeta 220 kV, 1400 mm ² Al strengs sem fall af hitastigi jarðvegs.	19
Mynd 2.9. Krítísk lengd jarðstrengs sem fall af spennu á sendi enda. Spenna á móttöku enda er 10% yfir málspennu (1,1 pu).	21
Mynd 3.1. Ólíkar aðstæður til jarðstrengslagnar. Fyrirhuguð strengleið í sandi á Suðurlandi (til vinstri). Strengskurður í hrauni við Hamranes (2007) (til hægri).	26
Mynd 3.2. Hefðbundið þversnið fyrir 220 kV streng lagðan í flatrí uppröðun.	27
Mynd 3.3. Lagning 132 kV Nesjavallalínu 2 (2009) í hefðbundinn opinn skurð.	27
Mynd 3.4. Plægning jarðstrengs.	28
Mynd 3.5. Jarðstrengur lagður með aðstoð grafrarkassa í dönsku strengverkefni (8).	28
Mynd 3.6. Þversnið með steiptum hjúp umhverfis strenginn, sem notað hefur verið í nýlegum verkefnum í Frakklandi (10). Kostnaður við þetta snið er áætlaður um 3,5 sinnum hærri en hefðbundið þversnið (mynd 3.2).	29
Mynd 3.7. Mögulegt snið við íslenskar aðstæður þar sem notuð er varmaleiðandi steypa umhverfis strenginn. Kostnaður við sniðið með steypuhjúp umhverfis strenginn er áætlaður um 4 sinnum hærri en hefðbundið þversnið (mynd 3.2).	29
Mynd 3.8. Dæmi um lagnapverun, Nesjavallalína 2, nærri stöðvarhúsinu á Nesjavöllum.	30
Mynd 3.9. Skýringarmynd af stefnuborun.	31
Mynd 3.10. Stefnuborun við Dyradali, vegna lagningar Nesjavallalína 2 (2009).	31
Mynd 3.11. Dæmi frá Evrópu, um notkun stálplatna sem þjónustuslóðar (8).	32
Mynd 3.12. Lagning háspennustrengja.	33
Mynd 3.13. Undirbúningur tengiholu á leið Nesjavallalínu 2 (til vinstri). Gámur notaður sem tengihús (Evrópa) (til hægri) (8).	34
Mynd 3.14. Endabúnaður ásamt útjöfnunarstöð á mótum jarðstrengs og loftlínu.	34
Mynd 3.15. 220 kV strengur, lágmarks þversnið og þjónustuslóð (vinstri). 220 kV strengur breiðara skurðsnið, þjónustuslóð og uppgrofturinn við skurðbakka (hægri).	35
Mynd 3.16. Rasksvæði vegna lagningar tveggja setta af 220 kV streng með þjónustuslóða og uppgreftri við skurðbakka.	35
Mynd 3.17. Frágangur ólíkra svæða.	36
Mynd 3.18. Niðurstöður varmaviðnámsmælinga í jarðvegi á nokkrum núverandi og mögulegum strengleiðum. Kassarnir sýna fyrstu og þriðju fjórðungsmörk en línurnar sýna hámarks- og lágmarksgildi. Meðaltal allra sýna í gagnasafninu er 1,53 K*m/W, staðalfrávikðið er 0,55.	37
Mynd 3.19. Nokkur dæmi um varmaviðnámsmælingar á íslensku fyllingarefni.	38

Mynd 3.20. Niðurstöður og landfræðileg dreifing varmaviðnámsmælinga á efnistöðum. Mælingarnar hafa allar verið gerðar í tengslum við möguleg jarðstrengsverkefni.	39
Mynd 3.21. Sýni af úrgangskvarsi frá Elkem á Grundartanga.	40
Mynd 3.22. Varmaviðnám fylliefnis úr Eyjafirði (rauð lína) og varmaviðnám efnisins eftir íblöndun 20% kvars (græn lína). Bláa línan er viðmiðunarlína sem notuð hefur verið í 66 kV verkefnum hérlandis.	41
Mynd 4.1. Verð í verðgrunni Landsnets á tímabilinu 2008-2013, innifalið er strengur, samsetningar og samsetningavinna fyrir XLPE-AL strengi. Verðin eru einkum byggð á verðupplýsingum framleiðenda (budget price) til Landsnets.	43
Mynd 4.2. Strengverð (XLPE-AL) úr samningum á Íslandi og Danmörku frá árunum 2009 - 2014. Innifalið er: strengir, samsetningar, vinna við samsetningar, flutningur að hafnarbakka, hluti af prófunum o.s.frv. Svört brotalína sýnir viðmiðunarlínu frá mynd 4.1 og grænar línur sýna áætlað strengverð sem unnið er út frá í þessari skýrslu.	44
Mynd 4.3. Samband kostnaðar samsetninga (efni og samsetningavinna) sem hlutfalls af strengverði og strenglengdar á kefli. Endatengingar jarðstrengs eru ekki innifaldar.	45
Mynd 4.4. Dæmigert kostnaðarsvið við lagningu eins setts af jarðstreng á Íslandi, meðalkostnaður er sýndur sem blá lína. Kostnaður er án VSK.	46
Mynd 5.1. Einfölduð mynd af hugsanlegri tengingu yfir Sprengisand.	49
Mynd 5.2. Sprengisandur. Strengleiðin er sýnd með rauðri brotalínu en fyrirhuguð loftlína með heilli rauðri línu. Stærri kort er í viðauka A.	51
Mynd 5.3. Myndræn framsetning á niðurstöðum greiningar á krítískri lengd.	54
Mynd 5.4. Dreifing kostnaðar á helstu verkþætti.	56
Mynd 5.5. Einfölduð mynd af tengingunni Akureyri – Krafla.	58
Mynd 5.6. Eyjafjörður. Strengleiðirnar sem skoðaðar voru við Eyjafjörð, eru sýndar með rauðri brotalínu. Heil rauð lína hægra megin í jaðri myndarinnar sýnir hvar loftlína tekur við. Stærri kort er í viðauka A.	59
Mynd 5.7. Útfærsla B, gegnum Kjarnaskóg, dreifing kostnaðar á helstu verkþætti.	63

TEIKNINGASKRÁ

2509-337-4_21_001

Yfirlitskort

Tilvik I

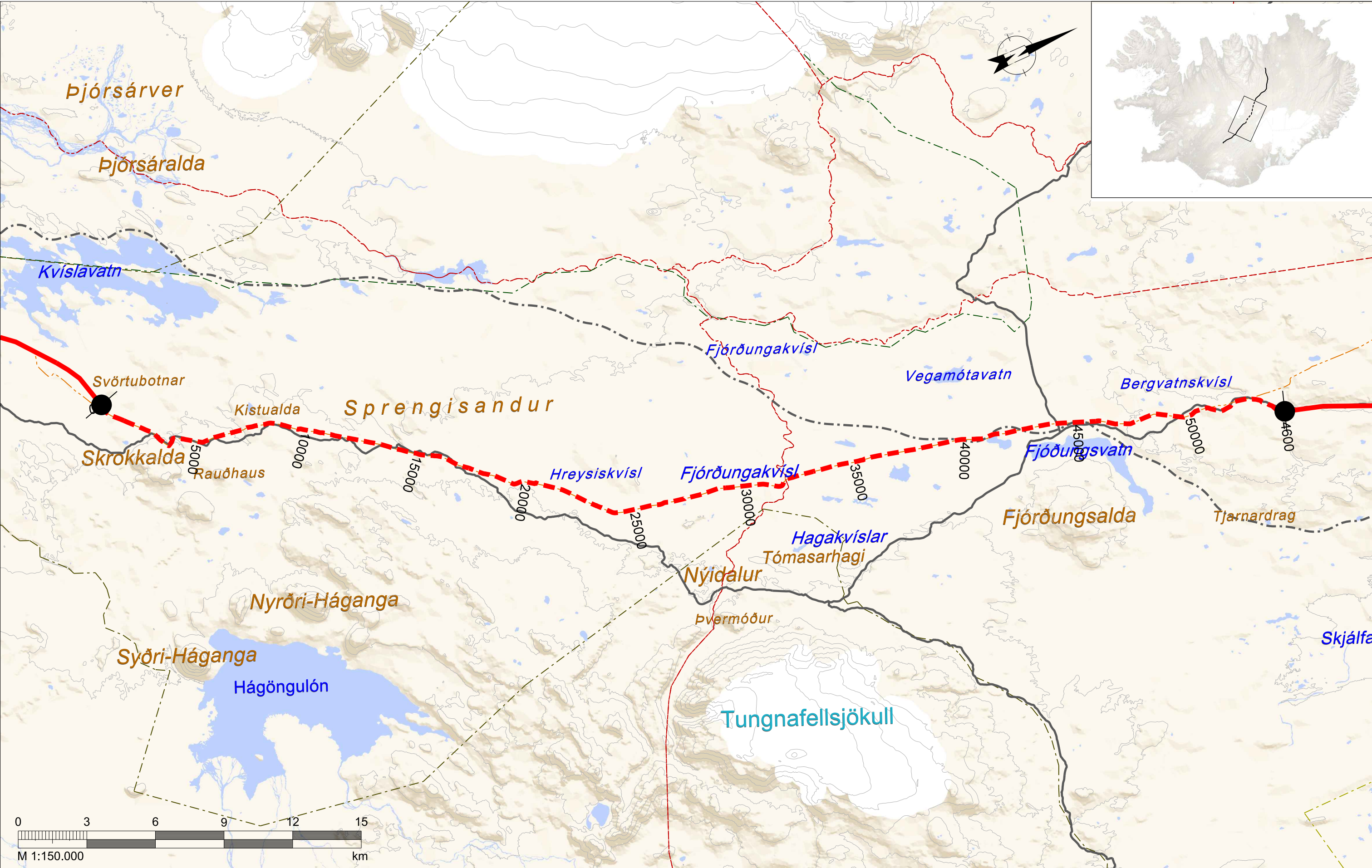
SPRENGISANDUR

2509-337-4_21_002

Yfirlitskort

Tilvik II

EYJAFJÖRÐUR



Skýringar											ÚTGÁFA	BREYTING	DAGSETNING	DAGSETNING	GERT	SAMÞYKKT	DAGSETNING		YFIRLITSKORT TILVIK I SPRENGISANDUR	FERLI	SETI	STADUR																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
																	=			+	+																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
																	LYK-1			LYKO																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
																	NUMER			2509-337	ÚTGÁFA	BLAD																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
																						NÚMER																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					



Skýringar		ÚTGÁFA	BREYTING	DAGSETNING	GERT	SAMÞYKKT	DAGSETNING	YFIRLITSKORT		FERLI	S/ETI	STADUR
— Akureyri/Eyjafjörður - Jarðstrengur	— Sveltarfélagamörk						05.02.2015			=	+	+
— Akureyri/Eyjafjörður - Loftlína	— Svæði á Náttúruminjaskrá						ÖS	TILVIK II		LYK-1	LYKO	
— Vegir	— Ljósleiðari						FM	EYJAFJÖRÐUR		NÚMER	2509-337	ÚTGÁFA
— Núverandi kerfi - Loftlína	— Áætlaðir tengistaðir						BLADSTÆRD					BLAD
— Núverandi kerfi - Jarðstrengur	— 20m hæðarlínur						A3	JARÐSTRENGSLAGNIR Á ÍSLANDI		EFLA VERKFRÆÐISÍÐA		4_21_002



Landsnet // Gylfafiöt 9 // 112 Reykjavík // Sími 563 9300 // landsnet@landsnet.is // landsnet.is