

# **Jarðstrengir í flutningskerfi raforku**

**Takmarkanir og áhrif notkunar jarðstrengja á hæstu spennustigum flutningskerfa raforku**

Rannsóknar- og greiningarverkefni

*Hjörtur Jóhannsson*

*September, 2019*



# Samantekt

---

Skýrsla þessi fjallar um áhrif þess að aukið hlutfall flutningskerfis raforku verði lagt í jörðu, með tilliti til áhrifa á raforkuverð, afhendingaröryggi, byggðaðróun og umhverfiskostnað. Fyrst var fjallað um þær meginlausnir sem notast má við þegar styrkja þarf flutningskerfi raforku. Fjallað var um jafnstraums- og riðstraumslausnir fyrir bæði loftlínur og jarðstrengi. Jafnstraumstæknin er helst notuð til flutnings mikils afls um langa vegalengd, til dæmis sem tenging milli landa eða landssvæða. Slík tækni hentar ekki sem burðarstykki möskvaðra flutningskerfa raforku og eru helstu ástæður þess:

- Mjög hátt tæknilegt flækjustig, minni áreiðanleiki og aukinn viðhaldstími.
- Nánast enginn sveigjanleiki fyrir frekari tengingum eða breytingum eftir að jafnstraumslína er komin í rekstur.
- Mjög hár stofnkostnaður miðað við riðstraumslausnir.

Frekari umfjöllun skýrslunnar afmarkaðist við notkun riðstraumsloftlína og -jarðstrengja til styrkingar flutningskerfisins.

Farið var yfir helstu ástæður raffræðilegra lengdatakmarkana fyrir notkun jarðstrengja á hæstu spennustigum flutningskerfa raforku. Helsta orsök lengdatakmarkana er að launafisframléiðsla jarðstrengja er margföld á við loftlínur, sem getur leitt til þess að spenna innan línuleiðar haldist ekki innan  $\pm 10\%$  vikmarka frá málspennu og að spennuprep verði of hátt við rofhreyfingar (sem eru skilyrði fyrir spennugæðum sem skilgreind eru í reglugerð nr. 1048/2004). Þar sem raffræðilegir eiginleikar jarðstrengja eru frábrugðnir eiginleikum loftlína geta langir strengir breytt raffræðilegum eiginleikum raforkukerfisins í heild sinni og aukið hættu á of hárrí mögnun yfirtóna og þar með of mikillar bjögunar á spennu.

Framkvæmd var greining á hve stórum hluta núverandi 132kV loftlína mætti koma í jörðu. Af þeim rúmlega 1000km af 132kV loftlínunum sem skoðaðar voru, benda niðurstöður til þess að koma mætti um 10% í jörðu, sé tekið er tillit til þeirra neikvæðu samlegðaráhrifa sem jarðstrengskafli á einum stað innan kerfisins hefur á hámarkslengdir jarðstrengskafli innan annarra flutningslína. Hámarkslengdir mögulegra jarðstrengskafli eru mismunandi eftir staðsetningu innan flutningskerfisins. Lengstu köflunum er hægt að koma fyrir þar sem raffræðilegur styrkur kerfisins er mestur (í nánd við suðvesturhornið og Fljótsdal), á meðan einungis er mögulegt að koma mjög lágu hlutfalli 132kV lína á Norðurlandi og Vestfjörðum í jörðu.

Ennfremur var framkvæmd umfangsmikil greining á hversu háu hlutfalli nýrra 220kV lína, sem væru lagðar til styrkingar íslenska flutningskerfisins, mætti koma í jörðu. Niðurstöður greiningar á einni sviðsmyndanna, þar sem 220kV hringtenging var skoðuð, gáfu til kynna að ekki væri mögulegt að koma hærra hlutfalli en um 5% af heildarlengd nýrra lína í jörðu. Einnig kom í ljós að hámarkslengdir strengkafla innan 132kV línanna myndu aukast mjög mikið í nánd við hinar nýju 220kV línur.

Þegar búið var að varpa ljósi á umfang raffræðilegra lengdatakmarkana sem eru fyrir notkun jarðstrengja við styrkingu íslenska flutningskerfisins, var kominn grundvöllur fyrir mati á áhrifum notkunar jarðstrengja með tilliti til afhendingaröryggis, raforkuverðs, umhverfiskostnaðar og byggðaþróunar. Helstu niðurstöður voru:

**Afhendingaöryggi:** Þar sem ekki er mögulegt að leggja jarðstrengi alla línuleið nýrra 220kV flutningslína, myndi notkun jarðstrengs innan flutningslínu leiða til þess að línan væri blönduð; að hluta til loftlína og að hluta til jarðstrengur. Áhættusamt er að beita sjálfvirkri eða skjótri endurlokun á blandaða línu. Hafi bilun orðið í jarðstrengshluta línunnar og sjálfvirk endurlokun setur línuna aftur inn, getur skammhlaupsstraumurinn valdið frekari skemmdum á strengnum eða skemmt endabúnaðinn. Sé horfið frá því að beita sjálfvirkri eða skjótri endurlokun innan blandaðra lína, hefur það í för með sér mikla hækkun á útítíma línunnar og þar með neikvæð áhrif á afhendingaöryggi í samanburði við tilfelli þar sem aðeins er notast við loftlínu.

Hafa ber í huga að styrking flutningskerfisins, sem hlytist af lagningu nýrrar línu, hefði mjög jákvæð áhrif á afhendingaöryggi hvort sem notast yrði við blandaða lausn eða ekki. Vægi aukins útítíma innan blandaðra lína er því hverfandi í samanburði við ávinninginn af kerfisstyrkingunni þegar horft er til áhrifa á afhendingaöryggi.

**Raforkuverð:** Flutningur raforku er sérleyfis skyld starfsemi og því ákveður flutningsfyrirtækið gjaldskrá sína í samræmi við þau tekjumörk sem Orkustofnun setur fyrirtækinu. Til að meta áhrif notkunar jarðstrengja við styrkingu á íslenska flutningskerfinu á raforkuverð, er nærtækast að meta hver áhrifin yrðu á sett tekjumörk Landsnets. Eignastofninn er hinn ráðandi þáttur til tekjumarka, en í heildina nemur framlag eignastofns til tekjumarka um 75%.

Til að bera saman áhrif notkunar jarðstrengjakafila í stað loftlína á eignastofn flutningsfyrirtækisins, var stuðst við nýlegar upplýsingar um kostnaðarhlutfall milli lagningar jarðstrengja og loftlína við íslenskar aðstæður. Því viðmiði var beitt að lagning jarðstrengja sé um það bil tvisvar sinnum dýrari en lagning loftlína við íslenskar aðstæður, og því var áætlað að allsherjar styrking flutningskerfis með nýjum 220kV línunum sé um 105% af kostnaði við kerfisstyrkingar þar sem eingöngu er notast við loftlínur (miðað við að 5% sé lagt í jörðu). Miðað var við að vægi nýrra 220kV fram-

kvæmda til styrkingar flutningskerfisins myndi vera um 25 – 50% af uppfærðum eignastofni og því leiðir notkun jarðstrengskafla við kerfisstyrkingu til 1,3 – 2,5% hækkunar eignastofns og þar með 1 – 2% hækkunar á tekjumörkum.

Á raforkureikningi almennra notenda telur flutningur raforku um það bil 10% og því má áætla að raforkuverð til almennings væri um það bil 0,1 – 0,2% herra ef möguleikar á notkun jarðstrengja væru fullnýttir við uppbyggingu flutningskerfi raforku samanborið við tilfelli þar sem aðeins væri notast við loftlínu.

**Umhverfiskostnaður:** Vinna við þróun aðferða til mats á umhverfiskostnaði flutningslína við íslenskar aðstæður er ennþá á rannsóknastigi. Helst hefur verið litið til aðferðafræði skilyrts verðmætamats við þá vinnu, þar sem áhersla er lögð á að meta greiðsluvilja almennings til mildunar sjónrænna áhrifa loftlína. Þar sem aðeins er mögulegt að leggja um 5% nýrra flutningslína í jörðu, mun umhverfiskostnaður vegna 95% línuleiðanna vera sá sami. Aðeins væri mögulegt að lækka umhverfiskostnað á útvöldum köflum, en ekki á allri línleið nýrrar 220kV flutningslínu.

**Byggðapróun:** Möguleikar fyrir fjölbreyttri atvinnuuppbyggingu og þróun byggða, meðal annars með tilliti til rafvæðingar fiskiðnaðar, skipa og bíla, eru háð því hvort flutningsgeta inn á tiltekið svæði sé nægjanleg, það er að segja hvort flutningskerfið sé nægilega sterkt. Skiptir þar engu máli hvort notast sé við jarðstrengi eða loftlínu við styrkingu flutningskerfisins.

Hvað varðar ferðamennsku og möguleg neikvæð áhrif loftlína á ásýnd náttúru, má ljóst vera að hinar miklu lengdatakmarkanir jarðstrengja leiða af sér að takmörkuðu máli skiptir hvort styrking flutningskerfisins fari fram með loftlínunum eingöngu, eða hvort nýttir séu jarðstrengskaflar við slíka styrkingu. Þar sem að jafnaði er aðeins hægt að leggja um 5% nýrra flutningslína í jörðu, er ekki hægt að notast við jarðstrengi til að koma í veg fyrir neikvæð áhrif nýrra 220kV flutningslína á ásýnd náttúru.

Meginniðurstaða þessa verkefnis er að hinar miklu lengdatakmarkanir jarðstrengja á hæstu spennustigum flutningskerfa raforku leiðir af sér að notkun svo stuttra jarðstrengskafla mun ekki hafa veruleg áhrif á afhendingaröryggi, raforkuverð, umhverfiskostnað eða byggðapróun.



# Efnisyfirlit

---

<b>Samantekt</b>	<b>I</b>
<b>1 Inngangur, yfirlit og nálgun</b>	<b>1</b>
1.1 Nálgun . . . . .	1
1.2 Uppbygging skýrslu . . . . .	2
<b>2 Tæknilegar lausnir til styrkingar flutningskerfis raforku</b>	<b>3</b>
2.1 Yfirlit tæknilegra lausna . . . . .	3
2.1.1 Háspenntar riðstraumsloftlínur . . . . .	3
2.1.2 Háspenntir riðstraumsjarðstrengir . . . . .	5
2.1.3 Háspenntir jafnstraumsjarðstrengir . . . . .	7
2.2 Afmörkun valkosta . . . . .	8
<b>3 Raffræðilegar lengdatakmarkanir jarðstrengja</b>	<b>11</b>
3.1 Raffræðilegar orsakir lengdatakmarka jarðstrengja . . . . .	11
3.1.1 Áhrif launafllmyndunar í jarðstrengjum á spennu . . . . .	12
3.1.2 Áhrif raffræðilegs kerfisstyrks á spennuhækkun . . . . .	14
3.1.3 Útjöfnun launaflls til takmörkunar á spennurisi . . . . .	16
3.2 Jarðstrengir í flutningskerfum raforku annarra þjóða . . . . .	19
3.2.1 Danmörk - Energinet . . . . .	19
3.2.2 Önnur lönd . . . . .	20
<b>4 Greining á hámarks lengdum jarðstrengja í íslenska flutningskerfinu</b>	<b>23</b>
4.1 Forsendur greiningar . . . . .	23
4.2 Nálgun . . . . .	24
4.3 Yfirlit sviðsmynda . . . . .	25
4.3.1 Framsetning niðurstaðna . . . . .	27
4.4 Niðurstöður greininga . . . . .	30
4.4.1 Sviðsmynd 1: Núverandi kerfi . . . . .	30
4.4.2 Sviðsmynd 2: 220kV styrking á Norðurlandi . . . . .	33
4.4.3 Sviðsmynd 3: 220kV hringtenging . . . . .	40
4.5 Samanburður við fyrri greiningaverkefni . . . . .	40
4.6 Afmörkun frekari greininga vegna lengdatakmarkana jarðstrengja . . . . .	45
<b>5 Áhrif jarðstrengja á afhendingaröryggi íslenska flutningskerfisins</b>	<b>47</b>

5.1	Bakgrunnur: Skilgreiningar á afhendingaröryggi . . . . .	47
5.1.1	Helstu áhrifapættir á afhendingaröryggi . . . . .	49
5.1.2	Bilanatíðni og útitími loftlína og jarðstrengja . . . . .	50
5.1.3	Stöðugleiki . . . . .	51
5.2	Áhrif af notkun jarðstrengja við styrkingu íslenska flutningskerfisins á afhendingaröryggi . . . . .	52
<b>6</b>	<b>Áhrif notkunar jarðstrengja við styrkingu flutningskerfisins á raforkuverð</b>	<b>55</b>
6.1	Verðmyndun og raforkuverð . . . . .	55
6.2	Tekjumörk flutningsfyrirtækisins . . . . .	56
6.3	Áhrif nýtingu jarðstrengja á tekjumörk . . . . .	57
6.3.1	Áhrif jarðstrengskafla á flutningstöp . . . . .	58
6.3.2	Áhrif notkun jarðstrengja á eignastofn . . . . .	58
6.3.3	Áhrif á tekjumörk og raforkuverð almennra notenda . . . . .	59
<b>7</b>	<b>Umhverfiskostnaður og jarðstrengir</b>	<b>61</b>
7.1	Umhverfisáhrif loftlína og jarðstrengja . . . . .	61
7.2	Yfirlit aðferða við mat á umhverfiskostnaði . . . . .	61
7.3	Áhrif jarðstrengskafla á umhverfiskostnað . . . . .	63
<b>8</b>	<b>Byggðapróun</b>	<b>65</b>
8.1	Aðgengi að raforku og áhrif á byggðapróun . . . . .	65
8.2	Áhrif loftlína og jarðstrengja á byggðapróun . . . . .	66
	<b>Heimildaskrá</b>	<b>67</b>
	<b>Viðauki</b>	<b>69</b>







# Kafi 1

## Inngangur, yfirlit og nálgun

---

Þann 11. júní 2018 var þingsályktun nr. 26/148, um stefnu stjórnvalda um uppbyggingu flutningskerfis raforku, samþykkt á Alþingi. Ályktunin er efnislega þrískipt, þar sem A-liður snýr að almennum atriðum er varða flutningskerfis raforku og hvernig skuli staðið að uppbyggingu þess til lengri tíma litið. B- og C-liðir ályktunarinnar snúa að rannsóknnum, meginreglum og viðmiðum tengdum lagningu flutningslína í jörð, þar sem í B-lið kemur eftirfarandi fram um óháðar og sjálfstæðar rannsóknir á áhrifum mismunandi tæknilegra lausna við lagningu raflína:

*„Að tilhlutan atvinnuvega- og nýsköpunarráðuneytis skulu sérfróðir aðilar gera óháðar og sjálfstæðar rannsóknir á áhrifum mismunandi tæknilegra lausna við lagningu raflína. Jafnframt fari fram óháð greining á þjóðhagslegri hagkvæmni þess að aukið hlutfall flutningskerfis raforku verði lagt í jörð, með tilliti til áhrifa á raforkuverð, afhendingaröryggis, hagkvæmni, byggðaðróunar, tæknilegra lausna og umhverfiskostnaðar.“*

Með vísan í B-lið þingsályktunarinnar, er markmið þessa verkefnis að:

- Veita yfirlit yfir mismunandi tæknilegar lausnir til styrkingar á flutningskerfum raforku og leggja mat á hverjar þeirra henti til umfangsmikilla styrkinga á íslenska flutningskerfinu.
- Rannsaka umfang þeirra takmarkana sem eru fyrir notkun slíkra lausna við styrkingu íslenska kerfisins.
- Greina áhrif notkunar jarðstrengja, til styrkingar íslenska flutningskerfisins, á þá þætti tengda þjóðhagslegri hagkvæmni er snúa að afhendingaöryggi, raforkuverði, byggðaðróun og umhverfiskostnaði.

### 1.1 Nálgun

Þau viðfangsefni sem nefnd eru í B-lið þingsályktunar nr. 26/148 tengdum rannsóknum á því að aukið hlutfall flutningskerfis raforku verði lagt í jörðu spanna breitt svið. Til að tryggja markvissa umfjöllun um þessi atriði er mikilvægt af afmarka efnistökin. Umfjöllun um kosti og ókosti nýtingu jarðstrengja til styrkingar flutningskerfi raforku er gagnleg ef

## **Kafli 1. Inngangur, yfirlit og nálgun**

---

hún er sett fram í samhengi við tæknilegar hámarkslengdir jarðstrengja. Verkefni þar sem fjallað væri um hve neikvæð eða jákvæð áhrif það hefði á raforkuverð, afhendingaöryggi eða umhverfiskostnað ef allt flutningskerfi raforku væri lagt í jörðu hefði mjög takmarkað gildi ef ekki væri tæknilega mögulegt að leggja nema takmarkaðan hluta kerfisins í jörðu.

Því er í þessu verkefni lögð áhersla á að meta fyrst hversu stóran hluta flutningskerfis raforku mætti koma í jörðu. Þegar hámarkshlutfall jarðstrengja hefur verið ákvarðað, er leitast við að meta áhrif þess að nýta jarðstrengi við styrkingu flutningskerfis raforku. Eru áhrifin alltaf metin í samanburði við tilfelli þar sem sambærileg styrking hefði farið fram með loftlínunum.

Með slíkri nálgun er hægt að meta áhrif notkunar jarðstrengja á fyrrgreinda þætti þar sem umfjöllunin afmarkast við þær raffræðilegu takmarkanir sem er fyrir notkun jarðstrengja á hæstu spennustigum flutningskerfa raforku.

### **1.2 Uppbygging skýrslu**

Í kafla 2 er þeim tæknilegu valkostum sem notast má við til styrkingar flutningskerfisins lýst, og lýkur kaflanum með afmörkun þeirra valkosta sem unnið er nánar með.

Kafli 3 veitir útskýringar á þeim raffræðilegu þáttum sem takmarka hámarkslengdir riðstraums jarðstrengja á hæstu spennustigum flutningskerfa. Einnig verður litið til reynslu annarra þjóða varðandi notkun riðstraums jarðstrengja í flutningskerfum raforku.

Kafli 4 lýsir umfangsmikilli greiningu á hámarkslengdum mögulegra jarðstrengjakafila innan íslenska flutningskerfisins, þar sem leitast var við að fá raunhæfa mynd af hversu háu hlutfalli nýrra 220kV línunum, sem lagðar væru til styrkingar flutningskerfisins, mætti koma í jörðu. Niðurstöður þessarar greiningar afmarka umfjöllun seinni kafla varðandi áhrif jarðstrengja á þá þætti sem þar er fjallað um.

Kafli 5 lýsir áhrifum notkunar jarðstrengja innan íslenska flutningskerfisins á afhendingaröryggi og kafli 6 lýsir áhrifum á raforkuverð. Í kafla 7 og 8 er fjallað um notkun jarðstrengja með tilliti til áhrifa á umhverfiskostnað og byggðapróun.

## Kafi 2

# Tæknilegar lausnir til styrkingar flutningskerfis raforku

---

Þessi kafli veitir yfirlit yfir helstu tæknilegu lausnir sem notast má við til styrkingar á flutningskerfi raforku.

## 2.1 Yfirlit tæknilegra lausna

Þær tæknilegu lausnir sem notast hefur verið við víða um heim þegar kemur að lagningu nýrra flutningslína má skipta í eftirfarandi flokka:

- Riðstraumslausnir við háspennu (HVAC):
  - Loftlínur
  - Jarðstrengir
  - Gas-einangraðar flutningslínur (e. gas-insulated transmission lines (GIL))
- Jafnstraumslausnir við háspennu (HVDC):
  - Loftlínur
  - Jarðstrengir

Ekki verður fjallað nánar um valkosti sem eru óraunhæfir til styrkingar á íslensks flutningskerfinu líkt og gas-einangraðar flutningslínur, en slík tækni er ekki notuð fyrir raforkuflutning um langar vegalengdir. Að sama skapi verður ekki fjallað um jafnstraumsloftlínur, þar sem slíkar lausnir hafa sambærileg sjónræn áhrif og hefðbundnar loftlínur, sem er helsta orsök deilna tengdum styrkingu flutningskerfisins og eru að auki dýrari og með lakara rekstraröryggi[1, 2]. Því mun umfjöllunin um jafnstraumslausnir einskorðast við jarðstrengi.

Í næstu undirköflum verður fjallað lauslega um þá riðstraums- og jafnstraumsvalkosti sem geta hentað til styrkingar flutningkerfis raforku.

### 2.1.1 Háspenntar riðstraumsloftlínur

Allt frá árdögum flutningskerfa raforku til dagsins í dag hafa riðstraumsloftlínur verið langalgengasti valkostur fyrir flutning raforku á hærri spennustigum flutningskerfa. Loftlínur

## **Kafli 2. Tæknilegar lausnir til styrkingar flutningskerfis raforku**

---

eru flestum tilvikum hagkvæmasti og tæknilega einfaldasti valkosturinn þegar kemur að lagningu nýrra flutningslína.

Loflína samanstendur í grunninn af leiðurum, einöngurum og möstrum, og í sumum tilvikum auka jarðvírum til varnar eldingum. Leiðararnir eru samansettir úr álþráðum sem undnir eru utan um stálkjarna sem veitir leiðaranum aukinn styrk. Einangrararnir eru ýmist úr gleri eða postulíni og einangra leiðarann frá mastri. Möstur flutningslína við hærri spennur,  $220kV$  og hærri, eru nær undantekningalaust byggð úr stáli.

Eftir því sem málsþenna loftlína hækkar, þarf fjarlægðin á milli leiðara að aukast til að tryggja nægjanlega einangrun þeirra á milli, og einnig þarf fjarlægðin frá leiðurum til jarðar að aukast. Af þeim sökum verða möstrin stærri með tilheyrandi auknum sjónrænum áhrifum. Hæð mastra fer eftir aðstæðum á línuleið, en sem dæmi er algeng hæð á  $220kV$  möstrum í Kröflulínu 4 um  $23m$ , lægstu um  $14m$  og þau hæstu um  $30m$  [3]. Í seinni tíð hefur verið reynt að draga úr sjónrænum áhrifum mastra með aukinni notkun röramastra í stað stálgrindamastra.

Út frá tæknilegu sjónarmiði er hægt að nota loftlínur nær allstaðar innan flutningskerfisins. Loftlínulausnir hafa þróast áratugum saman og eru í dag áreiðanleg og hagkvæm lausn til flutnings mikils magns raforku um langar vegalengdir. Auðvelt er að bæta nýjum flutningslínunum inn í flutningskerfi sem samanstendur af loftlínunum og veita þær því góðan sveigjanleika til kerfisstyrkinga á svæðum þar sem búist er við að flutningsþörf raforku muni aukast með tímanum.

Loftlínur verða bæði fyrir skammtíma- og varanlegum bilunum. Ástæður skammtímabilanna má yfirleitt rekja til veðurskilyrða. Til dæmis geta slíkar bilanir orsakast af sterkum vindi sem veldur því að fasaleiðari nálgist aðra leiðara eða mastur nægjanlega mikið til að skammhlaup eigi sér stað, eða vegna eldingar sem lýstur niður í loftlínu með tilheyrandi skammhlaupi milli leiðara. Skammtímabilanirnar hverfa þegar varnarbúnaður rýfur línuna. Hægt er að beita sjálfvirkri endurinnsetningu eftir rof á línunum, svo að lína sem varð fyrir skammtíma bilun komist aftur í rekstur á mjög skömmum tíma. Varanlegar bilanir eru mun fátíðari en gera þarf við línuna í kjölfar slíkrar bilunar til þess að koma henni aftur í rekstur, sem getur verið tímafrek aðgerð.

Skammtímabilanir eru mun algengari en varanlegar bilanir í loftlínunum, og hefur það í för með sér að útí tími loftlína (sá tími sem línan er ónothæf sökum bilunar) er mjög lítill. Þar af leiðandi þykja loftlínur, sem tæknileg lausn fyrir flutning raforku, vera mjög áreiðanlegar.

### 2.1.2 Háspenntir riðstraumsjarðstrengir

Jarðstrengir á hærri spennustigum flutningskerfa raforku hafa einna helst verið notaðir innan þéttbýlis og á svæðum þar sem taka skal tillit til sérstaks landslags eða annarra umhverfislegra þátta.

Reynsla af rekstri jarðstrengja við hærri spennustig flutningskerfa (220kV og hærri) bendir til þess að líkunar á bilunum í jarðstrengjum séu algengastar í upphafi rekstrartímabils þeirra, fari svo lækkandi en hækki aftur er þeir nálgast lok líftíma [4] (hefðbundin U-kúrva). Bilanatíðni jarðstrengja er lægri en fyrir loftlínur, en aftur á móti eru nær allar bilanir varanlegar og þarf að ræsa út viðgerðarteymi til að koma biluðum streng aftur í rekstur. Það getur verið tímafrekt að staðsetja bilanir í jarðstrengjum og komast að þeim til að gera við, þar af leiðandi er algengt að miðað sé við 2-4 vikna viðgerðatíma. Slíkt hefur í för með sér að meðal útítími jarðstrengja á ári er lengri en loftlína þrátt fyrir lægri bilanatíðni.

Sjónræn áhrif jarðstrengjakerfa eru mun minni en loftlína, þó eru vissir hlutar jarðstrengjakerfa vel sýnilegir. Á þetta sérstaklega við um launafslútfjölfunarsstöðvar sem geti þurft að reisa með vissu millibili á línuleið langra jarðstrengja. Jarðstrengir hafa í för með sér rask á yfirborði lands en í flestum tilfellum minnka þau áhrif með árunum ef mögulegt er að græða upp skurðstæðið.

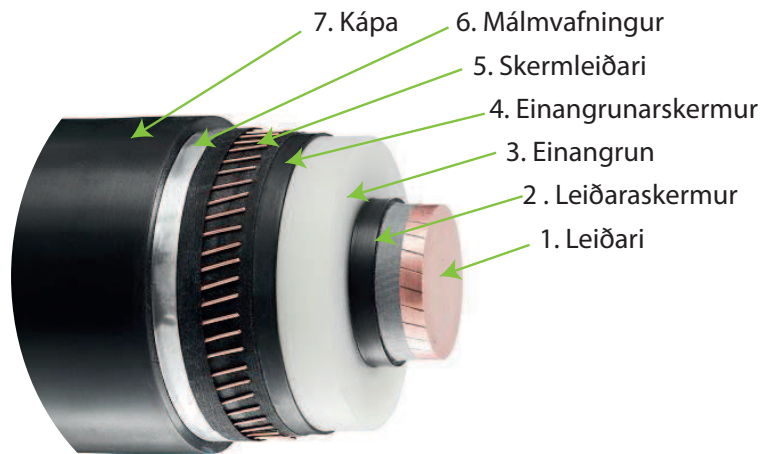
Kostnaður við lagningu jarðstrengja á hærri spennustigum flutningskerfa er almennt hærri en kostnaður við lagningu sambærilegrar loftlínu. Þar vegur kostnaður jarðstrengsins þyngst. Almennt hefur verð á jarðstrengjum á hærri spennustigum lækkað umtalsvert á undanförunum áratug, eru þeir þó enn umtalsvert dýrari valkostur en loftlína.

Skýringamynd hefðbundins einfasa jarðstrengs er að finna á mynd 2.1. Til eru mismunandi útfærslur á jarðstrengjum, sem geta hentað mismunandi aðstæðum hverju sinni. Hefðbundinn jarðstrengur samanstendur af (númer vísa til myndar 2.1):

1. Leiðara úr kopar eða áli. Kopar hefur betri leiðni en ál, sem hefur í för með sér að hægt er að notast við grennri koparleiðara en samsvarandi álleiðara. Að sama skapi eru koparstrengir dýrari og þyngri en álstrengir sem getur gert lagningu þeirra erfiðari.
2. Innri hálfleiðaraskermur (leiðaraskermur)
3. Einangrun, algengast er að notast sé við krossbundið pólýetýlen, (e. cross-linked polyethylene) skammstafað XLPE, sem hefur hátt einangrunargildi, er sveigjanlegt og endingargott.
4. Ytri hálfleiðaraskermur (einangrunarskermur).

## Kafli 2. Tæknilegar lausnir til styrkingar flutningskerfis raforku

---



**Mynd 2.1:** Skýringamynd hefðbundins einfasa jarðstrengs.

5. Skermleiðari utan um einangrunina til þess að skerma umhverfið fyrir rafsviði, mynda bakrás fyrir rýmdar- og bilanastrauma.
6. Málmvafningur til varnar að raki komist að skermleiðara
7. Kápa til varnar ytra álagi, svo sem raka og tæringu, ásamt því að einangra skermleiðarana frá jörðu.

Þessi uppbygging jarðstrengsins veldur því að raffræðilegir eiginleikar strengsins eru mjög frábrugðnir eiginleikum loftlína.

### **Samanburður raffræðilegra eiginleika riðstraumsloftlína og -jarðstrengja**

Helsti munur loftlína og jarðstrengja þegar kemur að rekstri þeirra tengist mismunandi raffræðilegum eiginleikum þeirra. Þessi munur á raffræðilegum eiginleikum loftlína annars vegar og jarðstrengja hins vegar stafar einkum af því að:

- Fjarlægð milli leiðara er miklu minni í jarðstrengjum en í loftlínunum.
- Leiðarar loftlínu eru einangraðir með andrúmslofti, meðan leiðarar jarðstrengja eru einangraðir með einangrandi efni (til dæmis krossbundnu pólýetýleni).

Raffræðilegum eiginleikum flutningslína má lýsa út frá líkani sem samanstendur af fjórum breytum: Raðtengdri mótstöðu  $R$  vegna mótstöðu leiðara, raðtengds spans  $L$  vegna segulsviðs umhverfis leiðarana, hliðtengdrar rýmdar  $C$  vegna rafsviðs milli leiðarar og



## 2.1 Yfirlit tæknilegra lausna

hliðtengdrar leiðni  $G$  vegna tapa tengdum lekstraumum frá fösum til jarðar. Venjulega er gildi  $G$  það lítið að lítið er framhjá því við líkanagerð.

Í töflu 2.1 er að finna samanburð á hefðbundnum gildum fyrir loftlínur annars vegar og jarðstrengi hins vegar fyrir málsþennur  $132kV$  og  $220kV$ . Algengt er að viðnámið  $R$  í jarðstrengjum sé lægra en í loftlínunum þar sem lögð er mikil áhersla á að takmarka flutningstöp til að halda hitamyndun í skefjum við hönnun jarðstrengja. Algengt er að spanviðnámið  $X_L$  í loftlínunum sé um 2,5 - 3,0 sinnum hærra en í jarðstrengjum vegna þess að fjarlægð milli leiðara loftlína er margfalt meiri en í jarðstrengjum.

Veigamesti þátturinn hvað varðar mismunandi raffræðilega eiginleika strengja og loftlína er tengdur rýmdinni  $C$  sem er um 25-35 sinnum hærri í jarðstrengjunum samanborið við loftlínurnar í töflu 2.1. Hin mikla rýmd jarðstrengja útskýrist fyrst og fremst af hinni stuttu fjarlægð milli leiðara og skerms, ásamt rafsvörunarstuðli (e. permittivity) einangrunarinnar.

**Tafla 2.1:** Hefðbundin gildi raffræðilegra breyta loftlína og jarðstrengja við  $132kV$  og  $220kV$

			Loftlínur		Jarðstrengir	
			132kV	220kV	132kV	220kV
Raunviðnám	$R$	$[\Omega/km]$	0,087	0,035	0,019	0,015
Spanviðnám	$X_L = \omega L$	$[\Omega/km]$	0,406	0,427	0,151	0,154
Launleiðni	$B_C = \omega C$	$[\mu s/km]$	2,812	2,797	100,5	75,40
Launafsfraamleiðsla		$[MVA/km]$	0,049	0,135	1,752	3,649

Hin mikla rýmd jarðstrengja veldur mikilli launafsfraamleiðslu, sem er ein helsta orsök þess að verulegar lengdatakmarkanir er fyrir notkun riðstraumsjarðstrengja á hæstu spennustigum flutningskerfa raforku, eins og nánar verður lýst í köflum 3 og 4.

### 2.1.3 Háspenntir jafnstraumsjarðstrengir

Háspenntir jafnstraumsjarðstrengir (e. High Voltage Direct Current, HVDC) eru víða notaðir erlendis. Helstu kostir jafnstraumstækninnar eru möguleikar á flutningi mikillar raforku langar vegalengdir með lægri töpum en sambærileg riðstraumslausn og möguleiki á að samtengja áður ótengd ósamfasa raforkukerfi.

Sveigjanleiki til breytinga og aðlögunar flutningskerfisins að breyttum þörfum er mun minni þegar um er að ræða jarðstrengi, og eru þeir ennþá minni ef um jafnstraumsjarðstrengi er að ræða. Til dæmis er auðvelt að bæta við tengipunktum á línuleið mjög langrar loftlínu, sem ekki er mögulegt ef notast er við jafnstraumslausn. Ef orkuþörf innan vissra svæða verður meiri en hönnunarforsendur flutningslínu sögðu til um, er tiltölulega auðvelt að styrkja möstur og skipta um leiðara í loftlínunum án mjög mikils tilkostnaðar.

## **Kafli 2. Tæknilegar lausnir til styrkingar flutningskerfis raforku**

---

Útfærslur jafnstraumsflutningslína eru af þrennu tagi: Einpóla tenging, tvíþóla tenging og sampóla tenging. Við einpóla tengingu er notast við einn leiðara og jarðvegur eða sjór notaður sem bakleiðari. Tvíþóla tengingar hafa tvo leiðara, annan fyrir neikvæða spennu og hinn fyrir jákvæða, og þar af leiðandi þarf ekki að leiða bakstrauminn í gegnum jörð eða sjó. Kostur tvíþóla tenginga er að hægt er að halda línunni í rekstri með um helmings aflgetu sem einpóla tengingu ef bilun verður í öðrum strengjanna.

Jafnstraumstæknin býður upp á fjölmarga tæknilega kosti sem geta haft jákvæð áhrif á kerfisstöðugleika og rekstur kerfisins almennt. Dæmi er um að endabúnaður sé stilltur þannig að hann dempi aflsveiflur í kerfinu, bæti tíðnisvörðun kerfisins í kjölfar truflunar eða hafi áhrif á aflflæði innan annara flutningslína til að koma í veg fyrir yfirlestun.

Jafnstraumstengingum er jafnan beitt við sérstök kerfisskilyrði, til dæmis:

1. Ef tengja þarf saman tvö ósamfasa raforkukerfi
2. Ef vegalengd línunnar er mjög löng (nær einnig til sæstrengja)
3. Fyrir mjög mikinn orkuflutning um langa vegalengd, þar sem jafnstraumslausnin er hagkvæmari kostur, og jafnvel eini tæknilega mögulegi kosturinn (ef vegalengdin er nægjanlega mikil)

Í öðrum tilfellum, sérstaklega ef um styttri vegalengdir er að ræða, eru riðstraumslausnir venjulegra hagkvæmari en jafnstraumslausnir. Er hlutur hás kostnaðar af- og áriðunnar endabúnaðar veigamikill. Greiningar á því hvenær jafnstraumslausn verði hagkvæmari en samsvarandi riðstraumsloftlína benda til þess að vegalengd línu þurfi að vera 600km eða lengri<sup>1</sup>.

Jafnstraumslínur og endabúnaður auka flækjustig við rekstur flutningskerfa og minnka sveigjanleika gagnvart tenginu nýrra notenda/svæða á línuleiðinni. Vegna þessa eru háspenntar jafnstraumslausnir helst notaðar ef tæknilegar takmarkanir eða hagkvæmnissjónarmið útiloka tilsvarende riðstraumslausn.

## **2.2 Afmörkun valkosta**

Háspenntir jafnstraumsjarðstrengir eru helst notaðir fyrir flutning raforku langar vegalengdir (til dæmis milli landa, eða landsvæða) eða milli tveggja ósamfasa raforkukerfa. Helst er notast við jafnstraumslausnir ef tilsvarende riðstraumslausnir eru ekki tæknilega

---

<sup>1</sup>Samkvæmt upplýsingum frá ABB strengframléiðandanum: <https://new.abb.com/systems/hvdc/why-hvdc/economic-and-environmental-advantages> (sótt 12.06.2019).

mögulegar. Mögulegt er að leggja mun lengri jafnstraumsjarðstrengi heldur en riðstraumsjarðstrengi.

Ef horft er til íslenska flutningskerfisins, þá væri notkun jafnstraumsjarðstrengja einna helst vænlegur kostur ef koma ætti á tengingu milli landa eða ef tengja ætti landsvæði með mjög löngum jarðstreng (til dæmis frá Þjórsársvæði til Norðurlands).

Þrátt fyrir fjölmarga tæknilega kosti jafnstraumsjarðstrengja, henta þeir ekki sem lausn sem hægt er að notast við sem burðarstykki í flutningskerfi raforku á Íslandi. Helstu ástæður þess að ekki er hægt að byggja flutningskerfi upp með jafnstraumstækni eru:

- Hátt tæknilegt flækjustig, minni áreiðanleiki og aukinn viðhaldstími.
- Nánast enginn sveigjanleiki fyrir frekari tengingum eða breytingum eftir að línan er komin í rekstur. Ekki er hægt að tengja nýja notendur eða bæta við tengipunktum á línuleið langs jafnstraumsjarðstrengjar.
- Mjög hár stofnkostnaður miðað við sambærilegar lausnir byggðar á riðstraumsloftlín-um eða -strengjum.

Vegna ofangreindra ástæðna munu þeir kaflar skýrslunnar sem hér á eftir fylgja ekki greina kosti þess að notast við jafnstraumsjarðstrengi til almennrar styrkingar íslenska flutningskerfisins. Aðeins verða bornir saman kostir riðstraumsloftlína og riðstraumsjarðstrengja.

## **Kafli 2. Tæknilegar lausnir til styrkingar flutningskerfis raforku**

---

## Raffræðilegar lengdatakmarkanir jarðstrengja

---

Í þessum kafla er farið yfir helstu ástæður raffræðilegra lengdatakmarkana fyrir notkun jarðstrengja á hæstu spennustigum flutningskerfa raforku og einnig verður fjallað um reynslu annarra þjóða af notkun jarðstrengja í flutningskerfum.

Í kafla 4 eru niðurstöður umfangsmikilla greininga á hámarkslengdum mögulegra jarðstrengjakafila innan íslenska flutningskerfisins birtar. Þær útskýringar á raffræðilegum ástæðum fyrir lengdatakmörkunum jarðstrengja, sem veittar eru í þessum kafla, er bakgrunnsefni slíkrar greiningar.

### 3.1 Raffræðilegar orsakir lengdatakmarka jarðstrengja

Markmið reglugerðar 1048/2004 um gæði raforku og afhendingaöryggi [5] er að tryggja, svo sem kostur er, fullnægjandi gæði og afhendingaröryggi raforku í íslenska raforku-kerfinu. Einn af þeim þáttum sem reglugerðin tekur til eru skilyrði fyrir spennugæðum. Eftirfarandi skilyrði, sem skilgreind eru í reglugerðinni, eru sérstaklega veigamikil þegar finna skal hámarkslengdir mögulegra jarðstrengskafila innan íslenska flutningskerfisins:

- Sístæð spenna í rekstri og við opinn enda spennusettrar línu (sem getur verið samsett af loftlínu og jarðstreng) verður að vera innan  $\pm 10\%$  vikmarka frá nafnspennu kerfisins.
- Spennuþrep<sup>1</sup> vegna rofahreyfinga eiga að vera innan  $\pm 5\%$ .
- Bjögun rekstrarspennu af völdum einstakra yfirsveiflna spennu með tíðni sem er frábrugðin rekstartíðni skal vera innan 3% fyrir rekstrarspennu frá 35kV að 200kV og innan 2% ef spennan er hærri en 200kV.
- Heildarbjögun (e. Total Harmonic Distortion, THD) rekstrarspennu af völdum allra spennusveiflna með tíðni sem er frábrugðin rekstartíðni skal vera innan 5% fyrir rekstrarspennu frá 35kV að 200kV og innan 3% ef spennan er hærri en 200kV.

Vegna mismunandi raffræðilegra eiginleika loftlína og jarðstrengja valda ofangreind skilyrði því að miklar takmarkanir eru á hámarkslengd mögulegra jarðstrengskafila á hæstu

---

<sup>1</sup>Spennuþrep er skilgreint sem skyndileg stök breyting spennu milli tveggja sístæðra spennugilda.

### **Kafli 3. Raffræðilegar lengdatakmarkanir jarðstrengja**

---

spennustigum flutningskerfa raforku. Munar þar mestu um margfalda rýmd jarðstrengja samanborið við loftlínur. Helstu orsakir fyrir lengdatakmörkum jarðstrengja eru:

- Mikil rýmd jarðstrengja veldur mikilli launafslmyndun:
  - Getur leitt til þess að sístæð spenna innan línuleiðar haldist ekki innan  $\pm 10\%$  vikmarkanna.
  - Ef skammhlaupsafl tengipunktum línenda er of lágt, getur launafslmyndunin valdið of háu spennuþrepi við rofhreyfingar.
- Raffræðilegir eiginleikar jarðstrengja eru frábrugðnir eiginleikum loftlína og breyta raffræðilegum eiginleikum raforkukerfisins í heild sinni
  - Getur leitt til of hárrar mögnunar yfirtóna og þar með of mikillar bjögunar á spennu.
  - Hætta á því að svipul (e. transient) svörun kerfisins haldist ekki innan ásættanlegra marka.

Í næstu undirköflum er leitast við að útskýra nánar nokkrar helstu orsakir fyrir raffræðilegum lengdatakmörkum jarðstrengja.

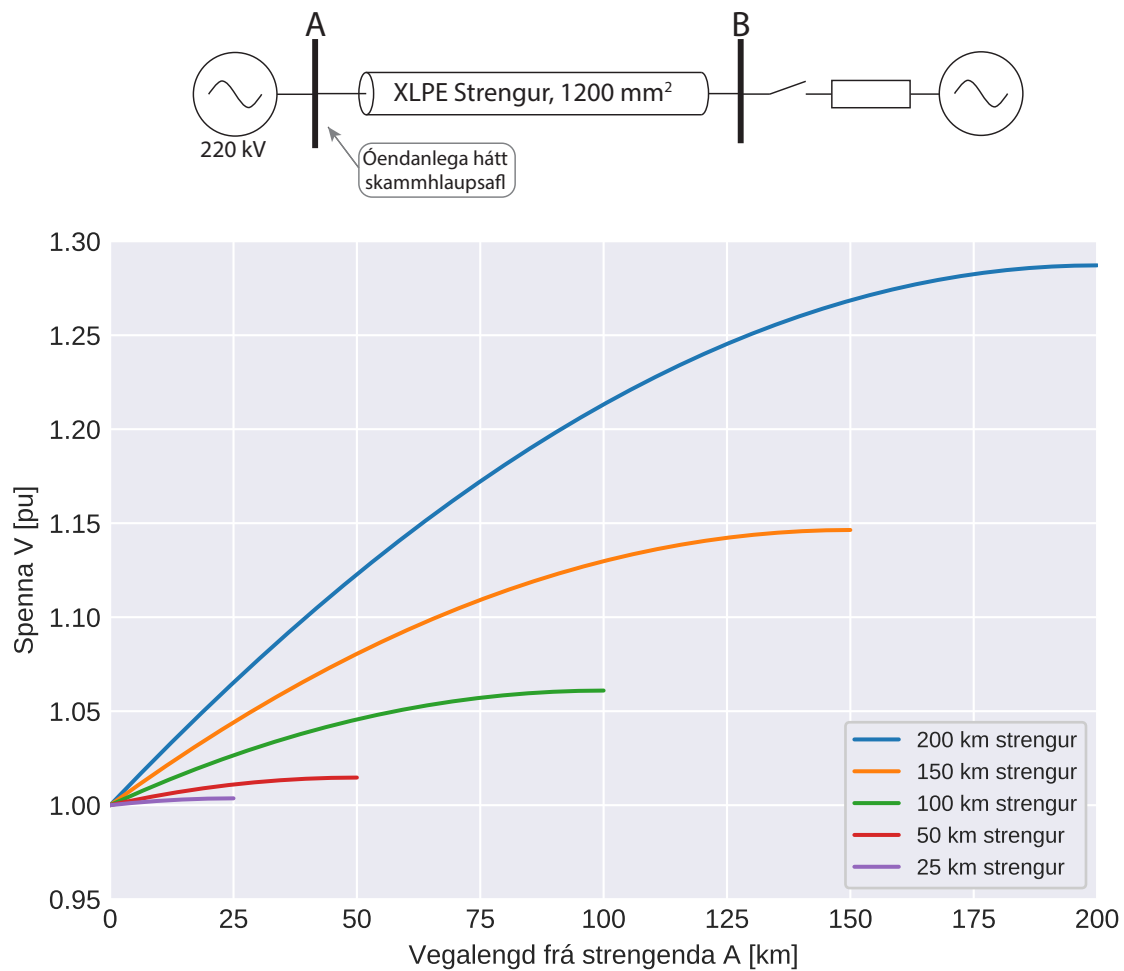
#### **3.1.1 Áhrif launafslmyndunar í jarðstrengjum á spennu**

Líkt og fram kom í kafla 2 eru raffræðilegir eiginleikar jarðstrengja frábrugðnir eiginleikum loftlína, sem leiðir til þess að launaflið sem myndast í spennusetnum jarðstreng án álags er margfalt á við það sem myndast í sambærilegri loftlínu við sömu aðstæður. Launafslmyndunin eykst með aukinni lengd jarðstrengsins, og ef lengd jarðstrengsins er nægjanlega mikil getur launafslmyndunin haft óæskileg áhrif á rekstur kerfisins og valdið of miklu spennurisi við lágt álag eða mögnun yfirtóna sem geta í valdið skemmdum á búnaði.

Mynd 3.1 er til útskýringar á áhrifum launafslframleiðslu mislangra jarðstrengja á spennuna í raforkukerfum. Efst á myndinni er teikning af einfölduðu raforkukerfi þar sem jarðstrengur er á milli tveggja tengipunkta (A og B). Spennan í enda A er fasti (svarar til óendanlega hás skammhlaupsafls í enda A) á meðan endi B er opinn. Með þessu einfalda kerfi má einangra þau áhrif sem launafslframleiðsla strengsins hefur á ris spennunnar á línuleið strengsins við ekkert álag. Á neðri hluta myndar 3.1 er að finna sniðmynd spennu á línuleið strengsins frá enda A að enda B við mismunandi strenglengdir (*25km, 50km, 100km, 150km og 200km*).

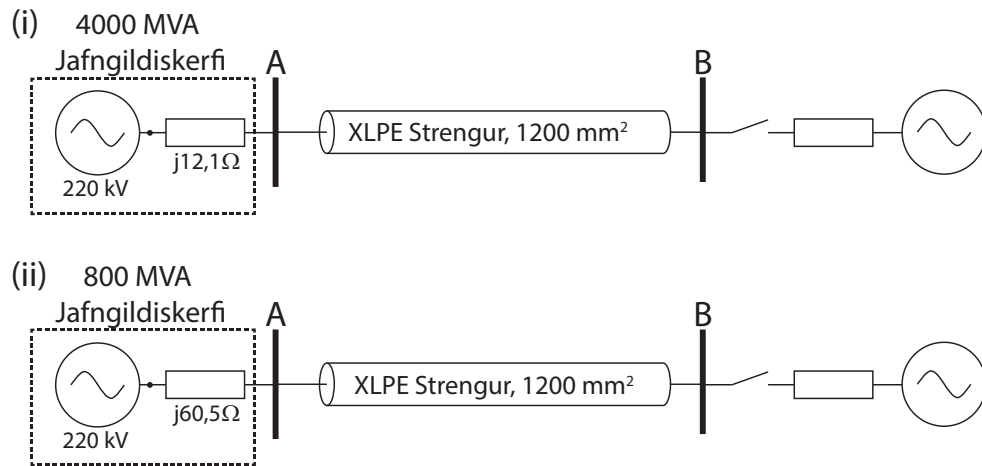
Í öllum fimm tilvikum er spennan á opna endanum B hærri en spennan í lokaða endanum A. Þegar strengurinn er *25km* nemur spennuhækkunin  $0,3\%$ , við *50km* streng er hækkunin

### 3.1 Raffræðilegar orsakir lengdatakmarka jarðstrengja



**Mynd 3.1:** Áhrif launafmsmyndunar jarðstrengja á spennuris á línuleið. Spennan er sýnd sem fall af vegalengd frá enda A, þegar endi B er opinn og spennan í enda A fasti (óendanlegt skammhlupsafl). Spennuhækkun í enda B er frá 0,3% fyrir 25 km streng að 28,7% fyrir 200 km streng.

### Kafli 3. Raffræðilegar lengdatakmarkanir jarðstrengja



**Mynd 3.2:** Tvö kerfi sem notast er við til að sýna áhrif launafsframleiðslu strengja og skammhlaupsafls á spennu. Í dæmunum tengist strengendi A (i) sterku kerfi og (ii) veiku kerfi.

1,5%, 6,1% hækkun í 100km strengnum, 14,6% í 150km og í 200km strengnum nemur hækkunin 28,7%.

Slíkt spennuris við tómgangsálag nefnist Ferranti áhrif (e. Ferranti effect) og orsakast spennurisið af rýmdarströumum (e. capacitive currents) sem fara í gengum spanviðnám (e. inductive reactance) strengsins. Það má lesa úr ofangreindum tölum að ekki er línulegt sambengi á milli hækkun spennunnar í opna endanum og lengdar strengsins. Sem dæmi má nefna að fræðilega spennan í opna endanum yrði um það bil 1300% hærri en spennan í lokaða endanum ef lengd strengsins væri 460km (um það bil fjórðungur af bylgjulengd 50Hz sínussveiflu).

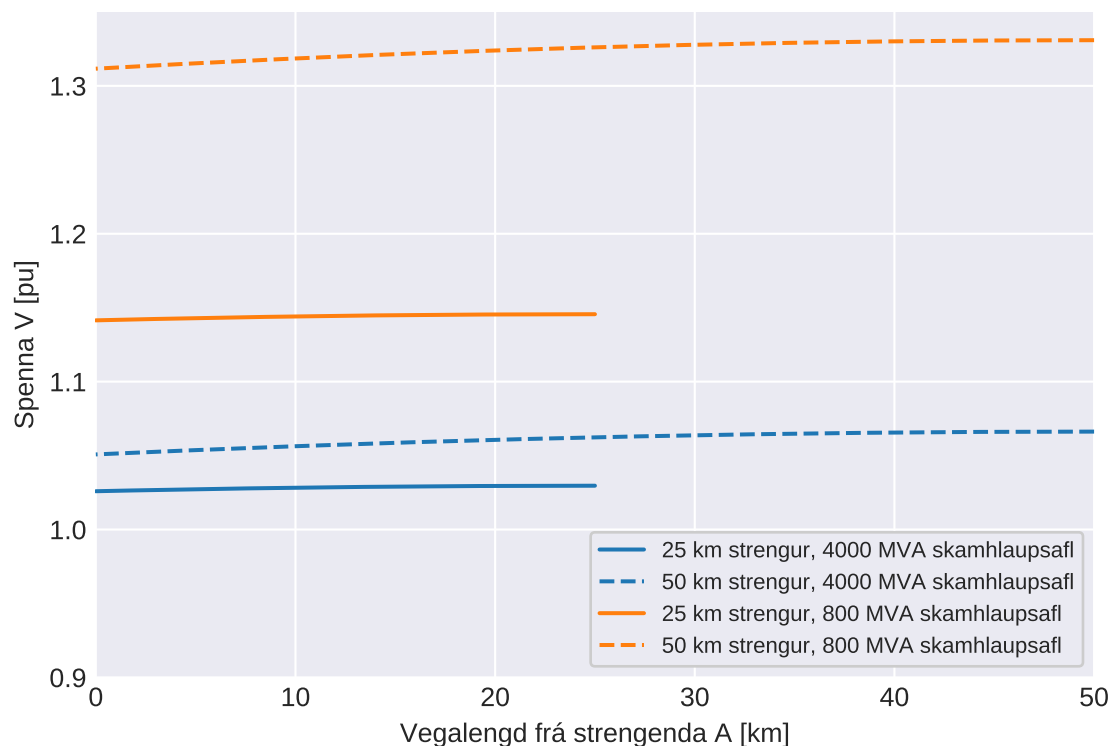
#### 3.1.2 Áhrif raffræðilegs kerfisstyrks á spennuhækkun

Launafismyndun jarðstrengja veldur ekki aðeins spennuhækkun í jarðstrengjunum sjálfum, heldur getur spennan í kerfinu hækkað vegna of mikils launafis sem flæðir um kerfið. Raffræðilegur styrkur flutningskerfisins í tengipunkti jarðstrengsins ræður miklu um hversu mikið spennan hækkar vegna rýmdaráhrifa jarðstrengja. Raffræðilegur styrkur raforkukerfis í tengipunkti strengs má meta út frá skammhlaupsafla tengipunktsins, og ræðst styrkurinn einna helst af raffræðilegri fjarlægð tengipunktsins frá stórum rafölum og rekstrarspennu tengipunktsins.

Til að skoða nánar áhrif kerfisstyrks á spennuhækkun er notast við kerfin tvö á mynd 3.2, þar sem skammhlaupsaflíð í punkti A er hátt í kerfi (i) (4000 MVA, sterkt kerfi) en í kerfi (ii) er skammhlaupsaflíð í punkti A lágt (800 MVA, veikt kerfi). Hægt er að notast við



### 3.1 Raffræðilegar orsakir lengdatakmarka jarðstrengja



**Mynd 3.3:** Tómgangsspennusnið 25km og 50km strengja (endi B opinn), sem eru tengdir annars vegar sterku kerfi (4000MVA skammhlaupsafl) og hins vegar veiku kerfi (800MVA).

Thevenin jafngildiskerfi sem líkan af raforkukerfinu séð frá punkti A. Thevenin viðnámið er að stærstum hluta spanviðnám, og því lægra skammhlaupsafl, þeim mun stærra er Thevenin viðnámið (líkt og sjá má með samanburði á kerfum (i) og (ii).

Á mynd 3.3 má sjá hvaða áhrif launafisframléiðsla jarðstrengs hefur á spennu þegar strengurinn er tengdur við sterkt kerfi annars vegar og veikt kerfi hins vegar. Myndin sýnir spennusnið línuleiða 25km og 50km jarðstrengja í kerfum (i) og (ii).

Það má sjá að spennan í enda A með 25km streng í sterka kerfinu er 1,03pu, á meðan hún er tæplega 1,15pu í veika kerfinu. Þetta hefur í för með sér að spennusnið strengsins í veika kerfinu væri of hátt á meðan spennusnið strengsins í sterka kerfinu er vel innan  $\pm 10\%$  vikmarkanna. Áhrif strenglengdar á spennuhækkun koma einnig vel í ljós þegar strengurinn er 50km. Þá er spennan í enda A 1,06pu í sterka kerfinu en 1,33pu í veika kerfinu. Lengri strengur hefur í för með sér hærri rýmdarstraum sem leiðir til aukins spennuris í flutningskerfinu.

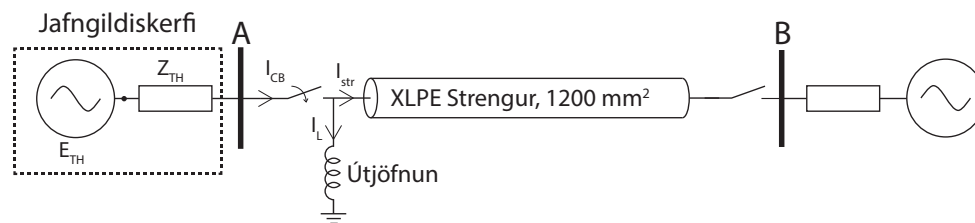
### Kafli 3. Raffræðilegar lengdatakmarkanir jarðstrengja

Myndir 3.1 og 3.3 sýna fram á augljósar áskoranir tengdar spennurisi vegna launafslsframleiðslu í löngum jarðstrengjum. Til þess að koma í veg fyrir of mikið spennuris og tryggja að kerfisspennan haldist innan skilgreindra vikmarka, er nauðsynlegt að beita launafslsútjöfnun.

#### 3.1.3 Útjöfnun launafsls til takmörkunar á spennurisi

Með uppsetningu á hliðtengdum spólum (e. shunt reactors) til launafslsútjöfnunar, má minnka þann rýmdarstraum sem færir frá strengjum út í kerfið og þar með takamarka það spennuris sem yrði í flutningskerfinu. Stærð og staðsetningu útjöfnunarspóla þarf að velja vandlega. Spólurnar þurfa að veita nauðsynlega útjöfnun við lágálagstilvik jafnt sem háálagstilvik. Sérstaklega þarf að huga vel að spennusetningu strengsins þar sem annar endinn er tengdur á meðan hinn endinn er opinn. Spennan á opna endanum getur orðið mjög há við slíkar aðstæður, jafnvel hærrí en búnaður þess enda þóllir. Ef allt það launafsl sem strengirnir á mynd 3.3 hefði verið útjafnað með spólu í enda A (100% útjöfnun) þá hefði rýmdarstráurinn ekki valdið neinni spennuhækkun í kerfinu. Þar af leiðandi hefðu spennusnið strengjanna verið þau sömu og á mynd 3.1 þegar strengirnir voru tengdir óendanlega sterku kerfi.

Það er þó vandkvæðum bundið að beita svo hárrí útjöfnun vegna annars raffræðilegs fyrirbæris, sem nefnist á ensku „zero-miss“ (einnig kallað „zero-missing“ í mörgum vísindagreinum og fræðibókum) og getur átt sér stað ef útjöfnunin fer yfir 50% af launafslsframleiðslu strengsins.



**Mynd 3.4:** Einlínnumynd af kerfi með jarðstreng, útjöfnun og rofbúnaði sem notast er við til útskýringar á „zero-miss“ fyrirbærinu.

#### Takmarkanir launafslsútjöfnunar og „zero-miss“ fyrirbærið

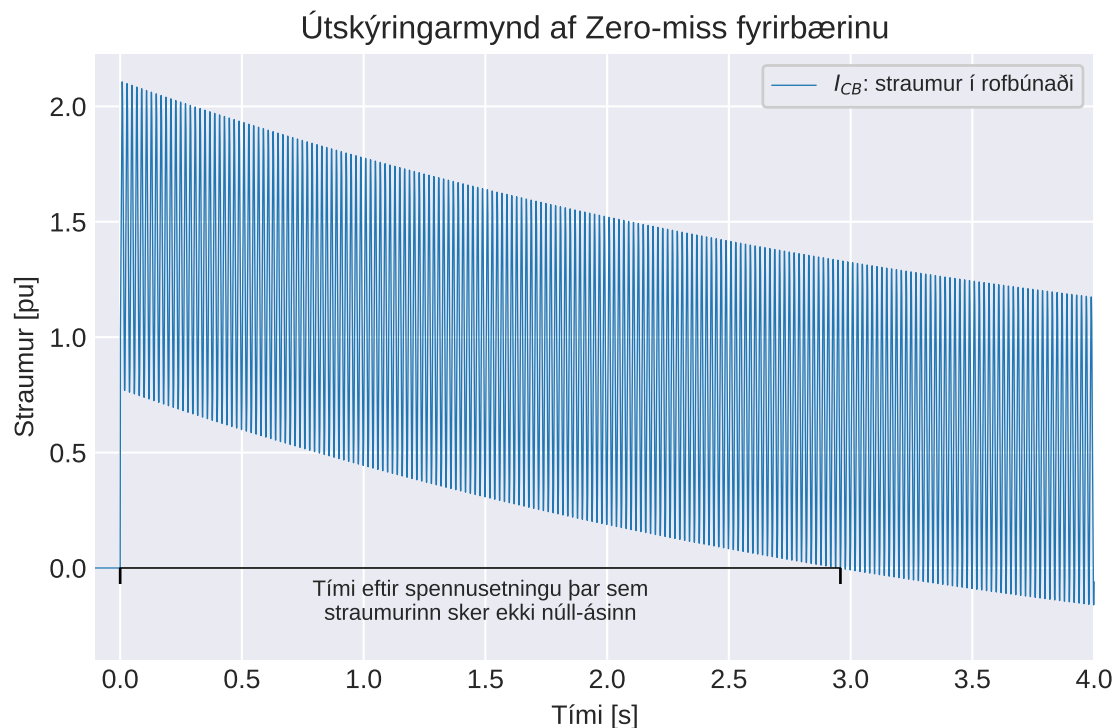
Notast er við kerfið á mynd 3.4 til að útskýra nánar þau vandamál sem fylgja of hárrí launafslsútjöfnun jarðstrengja. Myndin sýnir jarðstreng sem er tengdur útjöfnunarspólu í enda A og er strengurinn einnig spennusetur frá enda A með því að loka rofanum.

Við samtímis spennusetningu útjöfnunarspólu og langs jarðstrengs getur „zero-miss“ átt sér stað ef span spólunnar yfirstígur 50% af rýmd jarðstrengsins. Með „zero-miss“ er vísað

### 3.1 Raffræðilegar orsakir lengdatakmarka jarðstrengja

til þess að augnabliksgildi straumsins í gengnum rofbúnað nær ekki núllgildi í nokkurn tíma eftir spennusetningu strengs (getur verið nokkrar sekúndur). Það getur getur valdið því að ekki er hægt að opna rofbúnað án þess að eiga á hættu á að skemmdir verði á rofbúnaðinum. Þar af leiðandi getur „zero-miss“ valdið því að varnarbúnaður getur ekki varið strenginn eins og upphaflega var gert ráð fyrir. Dæmi um þetta er spennusetning á biluðum streng, sem getur leitt til þess að ekki er hægt að rjúfa strauminn án þess að eiga á hættu að valda skemmdum á rofbúnaðinum og samtímis frekari skemmdum á strengnum.

Mynd 3.5 sýnir „zero-miss“ fyrirbærið í straumnum  $I_{CB}$  (straumurinn í gegnum rofbúnaðinn), þegar strengurinn og útjöfnunarbúnaðurinn eru spennusettt samtímis frá sendianda. Nokkrar sekúndur líða eftir spennusetningu uns  $I_{CB}$  nær núllgildi



**Mynd 3.5:** Skýringarmynd af „zero-miss“ fyrirbærinu. Ef útjöfnun launafis yfirstígur 50% þess launafis sem strengurinn framleiðir, getur það valdið því að augnabliksgildi straumsins í gegnum rofbúnaðinn muni ekki rjúfa núll-ásinn í nokkurn tíma eftir spennusetningu strengsins

Vegna samspils rýmdarinnar í jarðstrengnum og spanviðnámi útjöfnunarspólunnar samanstendur straumurinn  $I_{CB}$  af stöðugum riðstraumshluta og jafnstraumshluta sem fjarar út. Það er jafnstraumshlutinn sem veldur hliðruninni á straumkúrvunni, og ef útjöfnunin

### **Kafli 3. Raffræðilegar lengdatakmarkanir jarðstrengja**

---

yfirstígur 50%, verður jafnstraumshliðrunin það stór að „zero-miss“ fyrirbærið getur átt stað.

Við notkun hliðtengdar útjöfnunarspólu á endum jarðstrengs, getur það tekið jafnstraumshlutann nokkrar sekúndur að fjara út, allt eftir mótstöðu spanspólunnar og strengsins, og augnabliksgildi spennunnar þegar strengurinn er spennusettur. Hættan á „zero-miss“ fyrirbærinu leiðir því til takmarkanna á hversu mikilli launaflsútjöfnun er hægt að beita til að takmarka spennuris vegna launaflsframleiðslu jarðstrengja.

#### **Tæknilegar lausnir til að koma í veg fyrir „zero-miss“ fyrirbærið**

Í nýlegum fræðibókum, greinum og doktorsritgerðum (til dæmis [6, 7, 8, 9, 10]), hefur verið stungið upp á nokkrum mögulegum lausnum til að takmarka eða koma í veg fyrir „zero-miss“ fyrirbærið þegar launaflsútjöfnunin yfirstígur 50%. Dæmi um tæknilegar lausnir eru:

- Stýrð innsetning (e. sequential switching) sem byggir á því að rjúfa fasa og spólur í vissri röð við einfasa bilun í streng. Fyrst er bilaði fasinn rofinn, þar á eftir eru spólur heilbrigðu fasanna rofnar og að endingu eru heilbrigðu fasarnir rofnir. Við þessa lausn er þörf á einpóla aflrofum með aukinni rofgetu ásamt mismunastraumvörn ásamt einpóla aflrofum fyrir útjöfnunarspólur.
- Samhæfð innsetning (e. synchronized switching) sem byggir á því að spennusetja hvern fasa fyrir sig þegar augnabliksgildi spennunnar er í hámarki (á toppi sínusbylgjunnar). Slík innsetning jarðstrengja getur valdið hærri yfirspennum og þörf er fyrir einpóla rofa.
- Aflrofi með forinnsetningarviðnámi (e. breaker with pre-insertion resistor) sem er fræðileg lausn sem enn hefur ekki verið beitt í raforkukerfum. Þörf er á að þróa nýja og öflugri aflrofa ef beita á þessari lausn.

Hafa ber í huga að allar ofangreindar aðferðir til þess að koma í veg fyrir „zero-miss“ auka tæknilegt flækjustig og líkur á bilunum, og leiða þar af leiðandi til minni áreiðanleika þar sem fleiri einingum, sem ekki mega bregðast, er bætt inn í lausnina. Ef bilun yrði í þeim búnaði sem koma á í veg fyrir „zero-miss“, er sá möguleiki fyrir hendi að fyrirbærið geti átt sér stað. Það er því álitlegri kostur að reyna að haga hönnun þannig að „zero-miss“ fyrirbærið geti yfir höfuð ekki átt sér stað. Það er gert með því að takmarka launaflsútjöfnun við 50%.

Danska flutningsfyrirtækið Energinet fylgir til dæmis þessu viðmiði við lagningu háspenntra jarðstrengja [11], með vísan til áreiðanleika og mögulegra neikvæðra áhrifa ofangreindra aðferða á samhæfi kerfisvarna.

## 3.2 Jarðstrengir í flutningskerfum raforku annarra þjóða

### 3.2.1 Danmörk - Energinet

Í takt við stórauðna nýtingu endurnýjanlegra orkugjafa til raforkuframleiðslu á fyrsta áratug 21. aldarinnar í Danmörku ásamt aukinni andstöðu almennings gangvart lagningu nýrra loftlína, var þörf á endurskoðun stefnu þarlendrar stjórnvalda varðandi styrkingu flutningskerfisins. Orku- og samgönguráðherra Dana setti því á fót nefnd árið 2007 sem tók til endurskoðunar fyrri stefnu og skilaði skýrslu um framtíðaruppbyggingu flutningskerfisins [12]. Í skýrslunni voru kynntar sex sviðsmyndir fyrir framtíðaruppbyggingu flutningskerfisins, allt frá því að vera alfarið byggt á jarðstrengjum yfir í það að byggja ekki frekar við flutningskerfið.

Þann 4. nóvember 2008 samþykktu stjórnvöld í Danmörku stefnu um að flutningskerfi raforku yrði að miklu leyti byggt upp á jarðstrengjum. Ákveðið var að fylgja sviðsmynd C úr áðurnefndri skýrslu þar sem áætlaður kostnaður var upp á 2,3 milljarða evra. Helstu einkenni sviðmynda C voru:

- Nýjar 400kV línur skulu að jafnaði lagðar í jörð.
- Þær loftlínur sem mynda burðarstykki 400kV flutningsnetsins á Jótlandi verða styrktar þar sem notast er við nýrri og nútímalegri gerð mastra.
- Aðrar línur 400kV netsins fá að standa, þó á að skoða hvort fegra skuli ákveðna línukafla, með notkun nýrra mastra eða lagningu í jörð.
- Allar núverandi og nýjar 132kV og 150kV línur skyldu lagðar í jörð.

Vegna þessarar ákvörðunar danska þingsins ákvað danska flutningsfyrirtækið Energinet að koma á laggirnar DANPAC<sup>2</sup> rannsóknarverkefninu sem átti að einblína á megin áskoranir tengdar svo róttækum breytingum á flutningskerfinu. DANPAC verkefnið var mjög umfangsmikið og fjármagnaði í allt 29 undirverkefni. Verkefnið skiptist í tvo meginþætti og í öðrum þeirra var áherslan á hagnýta hlið jarðstrengja og lauk með útgáfu yfirgripsmikillar handbókar um viðfangsefnið [13]. Hinn meginþáttur verkefnisins snéri að akademískum rannsóknum á fræðilegri vandamálum tengdri notkun jarðstrengja í flutningskerfum raforku. Innan akademíska hluta verkefnisins voru fjármögnuð fimm doktorsverkefni og var niðurstöðum rannsókna lóst í 32 ritrýndum fræðigreinum ásamt fimm doktorsritgerðum [14, 15, 10, 16, 17].

Með aukinni þekkingu og skilningi á þeim áskorunum sem fylgja lagningu og rekstri jarð-

---

<sup>2</sup>Skammstöfun fyrir „Danish Power System with AC Cables“

### **Kafli 3. Raffræðilegar lengdatakmarkanir jarðstrengja**

---

strengja á hæstu spennustigum flutningskerfisins, var hægt að framkvæma markvissari og betri greiningar á mögulegum hámarks lengdum jarðstrengjakafla í flutningskerfinu.

Í mars 2016 lagði Energinet fram áætlun um lagningu nýrra 400kV línu frá þýsku landamærunum norður að Endrup og uppfærslu 132kV línu frá Endrup til Idomlund upp í 400kV. Greiningar leiddu í ljós að einungis væri mögulegt að leggja um það bil 17km í jörðu eða um 10% af línuleiðinni í jörðu [11]. Ljóst mátti vera að ekki væri hægt að framfylgja fyrri stefnu stjórnvalda um lagningu jarðstrengja við lagningu þessarar línu.

Brugðist var við þessu í þverpólítísku samkomulagi um að leggja skyldi af PSO<sup>3</sup>-gjöld í skrefum í nóvember 2016. Sem hluti af samkomulaginu var mörkuð ný stefna varðandi notkun jarðstrengja í flutningskerfi raforku. Hin nýja stefna kveður meðal annars á um eftirfarandi:

- Allar núverandi 132kV og 150kV loftlínur skulu öllu að jöfnu standa áfram sem loftlínur.
- Jarðstrengir verða lagðir á sérvöldum köflum til verndar ásýndar náttúru og í nánd við þéttbýli.
- Nýjar 400kV línur skulu lagðar sem loftlínur, með möguleika á jarðlagningu sérvaldra kafla línunnar og möguleika á lagningu nálægra 132kV og 150kV lína í jörðu.
- Nýjar 132kV og 150kV línur skulu lagðar í jörðu.

Með samþykkt hinnar nýju stefnu danskra stjórnvalda, er horfið frá þeim metnaðarfulla markmiðum um jarðstrengjavæðingu danska flutningskerfisins sem voru að finna í fyrri stefnu frá 2008.

#### **3.2.2 Önnur lönd**

Höfundur er ekki kunnugt um að stjórnvöld annarra ríkja hafi mótað álíka metnaðarfulla stefnu um notkun jarðstrengja í flutningskerfum raforku, líkt og dönsk stjórnvöld gerðu 2008. Aftur á móti hefur aukin áhersla á nýtingu endurnýjanlegra orkugjafa við raforkuframleiðslu og samhliða fjölgun vindmyllugarða sem reistir eru á hafi úti, leitt til þess að flutningsfyrirtæki skoða nánar þann valkost að notast háspennna jafnstraumsjarðstrengi til að flytja unna vindorku til lands.

Írski flutningsfyrirtækið EirGrid lét framkvæma ítarlega greiningu [18] á möguleikum þess að notast við jarðstrengi við flutning raforku frá svæðum á norðvestur-hluta Írlands, þar sem nýting vindorku er mikil, að sterkum tengipunktum írski flutningskerfisins um 120km leið. Markmið greiningarinnar var að ákvarða hámarks lengdir 220kV jarðstrengja

---

<sup>3</sup>PSO er skammstöfun fyrir „Public Service Obligation“.

### 3.2 Jarðstrengir í flutningskerfum raforku annarra þjóða

---

við slíkar samtengingar vinnslusvæða raforku og meginflutningskerfisins. Greiningarnar leiddu í ljós að ekki var hægt að notast við jarðstreng alla leið við samtengingu svæðanna. Metið var að 20 – 30km leiðarinnar mætti leggja í jörðu ef notast var við eitt strengsett [18].

Samkvæmt skýrslu um lagningu jarðstrengja á hærri spennu [19], kemur fram að franska flutningsfyrirtækið RTE hafi tilkynnt að það væri ekki vegna tæknilegra hindrana að notkun háspennta jarðstrengja væri eins takmörkuð og raun ber vitni, heldur væri það vegna andstöðu meðal almennings gagnvart jarðstrengjum. Þetta á einkum við í dreifbýli þar sem bændur vilja oft frekar fá loftlínu en háspenntan jarðstreng í gegnum akra sína.

#### Dæmi um jarðstrengjaverkefni í Evrópu

Dæmi um langa jarðstrengi (á landi) við háa spennu:

- National Grid Bretlandi, „London tunnel“ verkefnið (400kV), 32km jarðstrengur með 1700MVA flutningsgetu.
- TenneT Hollandi, Randstadt verkefnið (380kV), í nokkrum köflum eru samtals 20km af 85km línu lagðir í jörðu. Flutningsgeta  $2 \times 2635MVA$ .
- Energinet Danmörk, strengur frá Grenaa til Trige (220kV) leið. Samtals 60km jarðstrengur með 400MVA flutningsgetu. Fyrsti 220kV jarðstrengur Dana á landi, var lagður til að flytja raforku frá 400MW vindorkuveri á hafi úti við eyjuna Anholt.

Dæmi um langa neðarsjávarstrengi við háa spennu:

- Ítalía (400kV), tenging Sikileyjar með 400kV sæstreng. Heildarlengd 42km með flutningsgetu upp á  $2 \times 1000MVA$ .
- Malta-Sikiley (230kV), 100km sæstrengur með flutningsgetu upp á 225MVA. Til að halda spennurisi í skefjum er beitt 96% launafslúttjöfnun með tilheyrandi hættu á „zero-miss“ fyrirbærinu við spennusetningu. Til að takamarka hættuna á „zero-miss“ er samhæfðri innsetningu beitt [20]. Þar sem strengurinn er eina tengingin milli eyjanna (ekki möskvað net milli eyjanna), var komist hjá vandamálum tengdum samhæfi varnarbúnaður vegna of hárrar úttjöfnunar.

### **Kafli 3. Raffræðilegar lengdatakmarkanir jarðstrengja**

---



## Greining á hámarkslengdum jarðstrengja í íslenska flutningskerfinu

---

Markmið þessa verkefnis er að varpa ljósi á ávinning þess að aukið hlutfall hins íslenska flutningskerfis raforku verði lagt í jörðu með tilliti til áhrifa á raforkuverð, afhendingaröryggis, hagkvæmni, byggðarþróunar og umhverfiskostnað. Til þess að geta lagt mat á ávinning þess að nota jarðstrengi fremur en loftlínur með tilliti til þessara þátta, þá er nauðsynlegt að hafa raunhæfa mynd af því hversu stórum hluta lína á hæstu spennustigum flutningskerfisins mætti koma í jörðu. Í eftirfarandi undirköflum er að finna lýsingu á nálgun og niðurstöðum slíkrar lengdagreiningar.

### 4.1 Forsendur greiningar

Leitast var við að ákvarða hámarkslengdir jarðstrengja í íslenska flutningskerfinu út frá áhrifum þeirra á spennuris og spennuþrep. Notast er við eftirfarandi skilyrði varðandi þessa þætti úr reglugerð 1048/2004 um gæði raforku og afhendingaröryggi [5]:

- Sístæð spenna í rekstri og við opinn enda spennusettrar línu (sem getur verið samsett af loftlínu og jarðstreng) verður að vera innan  $\pm 10\%$  vikmarka frá nafnspennu kerfisins.
- Spennuþrep<sup>1</sup> vegna rofahreyfinga eiga að vera innan  $\pm 5\%$ .

Að auki er sett skilyrði um að launaflsútfjöfnun skuli ekki vera meiri en nemur 50% af launaflsframleiðslu línunnar til þess að komast hjá „zero-miss“ vandamálum. Greiningin tekur ekki til áhrifa jarðstrengja á spennubjögum.

Í greiningunni er miðað við að nýjar 220kV línur til styrkingar flutningskerfisins hafi flutningsgetu upp á 550MVA hið minnsta, líkt og miðað er við í kerfisáætlun Landsnets [21]. Einnig er miðað við að nota þurfi tvöfalt strengsett með 1200mm<sup>2</sup> alleiðara sem gefur um 600MVA flutningsgetu. Hafa ber í huga að notkun tvöfalds strengsetts við lagningu 220kV jarðstrengskafla leiðir af sér hærri launaflsframleiðslu per lengdareiningu sem hefur áhrif á mögulegar hámarkslengdir jarðstrengskafla.

---

<sup>1</sup>Spennuþrep er skilgreint sem skyndileg stök breyting spennu milli tveggja sístæðra spennugilda.

## Kafli 4. Greining á hámarkslengdum jarðstrengja í íslenska flutningskerfinu

Þverskurðarflatarmál 132kV og 220kV jarðstrengja eru yfirleitt staðlaðar stærðir, þar sem í Evrópu er notast við  $300mm^2$ ,  $400mm^2$ ,  $500mm^2$ ,  $630mm^2$ ,  $800mm^2$ ,  $1000mm^2$ ,  $1200mm^2$ ,  $1400mm^2$ ,  $1600mm^2$  og  $2000mm^2$ . Fram kemur í skýrslu um lagningu jarðstrengja á hærri spennu [19] að sumir framleiðendur geti einnig boðið upp á strengi með  $2500mm^2$  þverskurðarflatarmál, Þessi stærð er þó ekki notuð nema í sérstökum tilvikum enda eru svo stórir strengir þungir og erfiðir í meðförum sem getur aukið verkkostnaðinn.

Í [19] er einnig yfirlit um hámarksflutningsgetu strengja með ál- og koparleiðara og kemur þar fram að hámarksflutningsgeta  $2000mm^2$  álstrengs við 220kV sé um 370MVA en um 500MVA ef um koparstreng er að ræða. Það er því ekki hægt að mæta flutningsþörf upp á 550MVA með aðeins einu strengsetti af staðlaðri stærð. Af þeim sökum er notast við tvöfalt strengsett fyrir 220kV jarðstrengi í greiningunni.

Við mat á strenglengdum innan 132kV lína var miðað við að strengurinn væri  $1600mm^2$  með álleiðara sem gefur um 180MVA flutningsgetu. Notast er við eitt strengsett við 132kV.

### 4.2 Nálgun

Til þess að ákvarða hámarkslengdir mögulegra jarðstrengskafla í íslenska flutningkerfinu, var greiningaforrit útbúið. Með ítrunarferli ákvarðaði forritið hámarkslengdir jarðstrengskaflanna út frá uppgefnum kerfisforsendum. Að neðan er meginferli greiningaforritsins lýst.

Ef við látum  $\mathcal{L}$  tákna mengi/lista allra þeirra lína sem eru til skoðunar (þær línur þar sem finna skal hámarkslengd jarðstrengs) þá var eftirfarandi framkvæmt:

1. Fyrir hverja línu  $L_0$  í menginu  $\mathcal{L}$  er hámarkslengd jarðstrengs  $l_{max,0}$  fundinn með ítrunarferli fyrir þrjár mismunandi staðsetningar jarðstrengsins (í sitthvorum endanna og fyrir miðju).
2. Fyrir hverja fundna hámarkslengd strengs  $l_{max,0}$  innann línu  $L_0$  er eftirfarandi framkvæmt fyrir strenglengdir sem eru  $x_{pct} = \{50\%, 60\%, \dots, 100\%\}$  af  $l_{max,0}$ :
  - (a) Kerfislíkanið er uppfært með jarðstreng að lengd  $x_{pct}l_{max,0}$  innan línu  $L_0$ .
  - (b) Hámarkslengdir jarðstrengja  $l_{max,1}$  eru fundnar innan allra annara lína  $L_1$  í menginu  $\mathcal{L}$  með ítrunarferli. Hámarkslengd er fundin við hverja af þremur fyrrnefndum staðsetningum jarðstrengs innan línunnar  $L_1$ .

Sjálft ítrunarferlið sem ákvarðar hámarkslengdir jarðstrengja, miðar að því að ákvarða breytingar á sístæðri spennu við rofhreyfingar. Fylgst er með því hvort spennan haldist

innan  $\pm 10\%$  vikmarka og hvort spennuþrepið sé undir 5%. Ítrunarferlið stoppar þegar strenglengd  $l_{max}$  er fundin sem kemst næst þessum skilyrðum án þess að brjóta þau.

Með slíku ferli fást bæði upplýsingar um hámarks lengd stakra jarðstrengskafla á mismunandi stöðum í kerfinu, en einnig er hægt að greina hvernig lagning jarðstrengja á einum stað í kerfinu hefur áhrif á hámarks lengdir jarðstrengja annars staðar í kerfinu. Sé miðað við að teknar séu 20 línur til athugunar, mun ofangreint ferli ákvarða 21.600 mismunandi hámarks lengdir jarðstrengskafla til að varpa ljósi á samlegðaráhrif jarðstrengja á mismunandi stöðum innan kerfisins.

Hafa ber í huga að greiningaforritið ákvarðar hámarks lengdir út frá sama grunntilfellinu þar sem álag og framleiðsla rafala helst óbreytt. Það eru margir þættir sem geta haft áhrif á útreikninga hámarks lengda ber þar helst að nefna:

- Heildarálag og framleiðsla kerfisins
- Álagsmynstur
- Framleiðslumynstur
- Línur og búnaður sem ekki eru í rekstri

Til að ákvarða endanlega hámarks lengdir jarðstrengja innan íslenska flutningskerfisins þyrfti að greina fjöldann allan af mismunandi álagstilfellum og tryggja að fyrrnefndar forsendur haldi. Þrátt fyrir að forritið greini eitt álagstilfelli, ættu niðurstöðurnar að gefa góða vísbendingu um hámarks lengdir mögulegra jarðstrengjakafla innan flutningskerfisins.

Einnig þyrfti að framkvæma nánari greiningu á áhrifum jarðstrengskaflanna á mögnun yfirtóna og hvort svipul svörun kerfisins haldist innan ásættanlegra marka. Niðurstöður slíkrar greiningar gætu leitt til enn frekari lækkunar á mögulegum hámarks lengdum jarðstrengjanna. Slíkar greiningar geta verið mjög tímafrekar og mun umfangsmeiri en tíma- og kostnaðarrámmi þessa verkefnis leyfir.

## 4.3 Yfirlit sviðsmynda

Markmið greininganna var að leita svara varðandi raffræðilegar takmarkanir á hámarks lengdum mögulegra jarðstrengskafla í íslenska flutningskerfinu. Meðal annars var leitast við að svara eftirfarandi:

- Hverjar væru hámarks lengdir jarðstrengskafla í núverandi flutningskerfi?
- Hvaða áhrif hefði styrking kerfisins með 220kV línunum á þessar hámarks lengdir?

## **Kafli 4. Greining á hámarks lengdum jarðstrengja í íslenska flutningskerfinu**

---

- Hverjar eru lengdatakmarkanir jarðstrengskafla í nýju 220kV flutningslínunum sem notaðar væru til styrkingar kerfisins?
- Hver eru samlegðaráhrif jarðstrengskafla á mismunandi stöðum í kerfinu? Hversu mikil áhrif hefur jarðstrengslögn á einum stað á hámarks lengdir jarðstrengja annars staðar í kerfinu?
- Hversum stórum hluta nýrra 220kV lína mætti koma í jörðu að teknu tilliti til samlegðaráhrifa jarðstrengja?

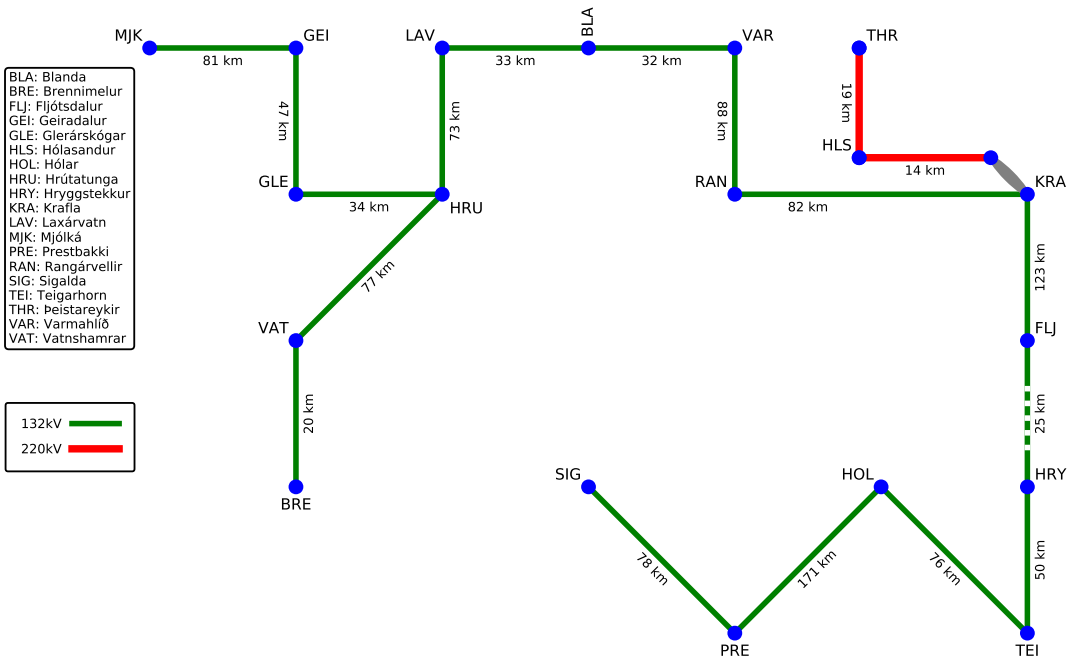
Til að svara ofangreindu, var ákveðið að notast við þrjár mismunandi sviðsmyndir. Til að afmarka umfang greininganna, voru aðeins línur utan sterkasta hluta kerfisins teknar með (hluti flutningskerfisins frá þjórsársvæði til og með suðvesturhorninu er ekki tekinn með). Sviðsmyndunum þremur er lýst að neðan:

**Sviðsmynd 1 - núverandi kerfi:** Á mynd 4.1 er að finna yfirlit þeirra lína sem eru partur af þessari sviðsmynd (mestmegnis 132kV línur). Með greiningu á þessari sviðsmynd fást niðurstöður sem notaðar verða sem viðmiðunargildi þegar meta skal áhrif styrkingar kerfisins á hámarks lengdir innan 132kV línanna.

**Sviðsmynd 2 - 220kV styrking flutningskerfisins á Norðurlandi:** Notuð til greiningar á hámarks lengdum mögulegra jarðstrengskafla innan nýrra lína sem eru nú þegar á framkvæmdaráætlun Landsnets [22] ásamt 220kV línu frá Rangárvöllum að Blönduvirkjun (sjá mynd 4.2). Greining á þessari sviðsmynd má notast við til að leggja óháð mat á niðurstöður fyrri greiningavinnu á hámarks lengdum jarðstrengja innan nýrra 220kV lína til styrkingar flutningskerfisins á Norðurlandi.

**Sviðsmynd 3 - 220kV hringtenging:** Á mynd 4.3 er að finna yfirlitsmynd sviðsmyndar 3 og svarar hún til sviðsmyndar B.1 úr kerfisáætlun Landsnets 2019-2028 [21]. Með greiningu á þessu kerfi er mögulegt að fá hugmynd um hversu stóran hluta 220kV styrkingu byggðalínuhringsins frá Brennimerl að Sigöldu mætti leggja í jörðu. Svar við þeirri spurningu mun afmarka alla nánari umfjöllun um hagkvæmni þess að nota jarðstrengi umfram loftlínur til styrkingar íslenska flutningskerfisins.

## 4.3 Yfirlit sviðsmynda



**Mynd 4.1:** Yfirlitsmynd sviðsmyndar 1 - núverandi kerfi. Myndin sýnir þær 132kV og 220kV línur sem teknar voru með í útreikningum á hámarks lengdum mögulegra strengkafla. Línan milli Fljótsdals og Hryggstekkjar var þó undanskilin þar sem nú þegar er 7km strengkafi á línuleiðinni.

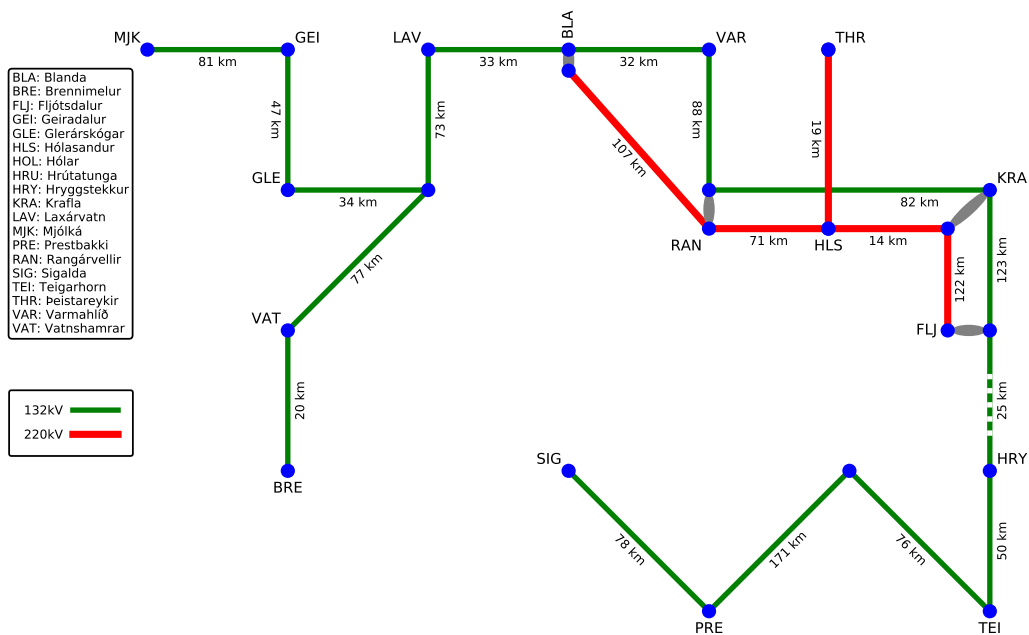
### 4.3.1 Framsetning niðurstaðna

Á mynd 4.4 er að finna skýringamynd um framsetningu niðurstaðna. Efst á myndinni (i) er dæmi um framsetningu á hámarks lengdum mögulegra stakra jarðstrengskafla innan mismunandi lína. Sýndar eru hámarks lengdir miðað við þrjár staðsetningar innan hvers línu (í sitthvorum endanna og um miðja línu).

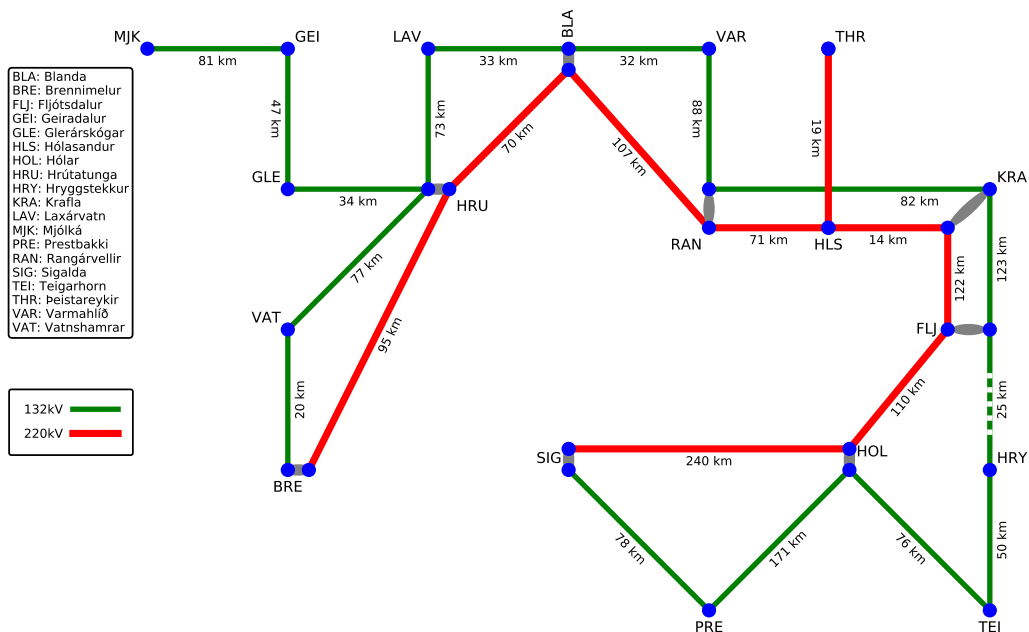
Á miðri mynd (ii) er dæmi um framsetningu á niðurstöðum um hvernig jarðstrengskaffi á einum stað í kerfinu hefur áhrif á hámarksstrenglengdir jarðstrengskafla innan annarra lína. Með samanburði á (i) og (ii) er hægt að sjá breytinguna á mögulegum hámarks lengdum við það eitt að bæta jarðstreng í kerfið.

Dæmi (iii) sýnir framsetningu upplýsinga á töfluformi um samlegðaráhrif jarðstrengskafla á einum stað á hámarksstrenglengdir innan annarra lína. Upplýsingarnar sýndar í dæmi (ii) eru fengnar úr einni röð slíkrar töflu. Út frá töfluforminu má einnig lesa hver hinn takmarkandi þáttur var fyrir hámarks lengd strenglagnarinnar. Hér merkir  $\nabla$  að krafan um að spennuþrepið mætti ekki yfirstíga 5% hafi verið hinn takmarkandi þáttur,  $\Delta$  þýðir krafan um að spennan væri innan  $\pm 10%$  vikmarka frá málspennu hafi verið takmarkandi þáttur,

## Kafli 4. Greining á hámarks lengdum jarðstrengja í íslenska flutningskerfinu

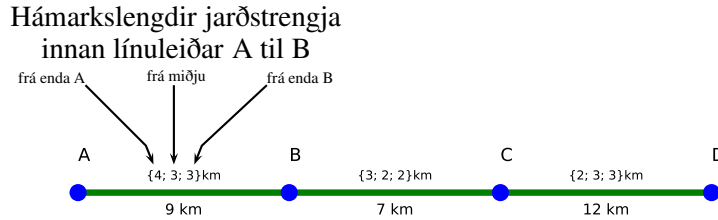


**Mynd 4.2:** Yfirlitsmynd sviðsmyndar 2 - 220kV styrking flutningskerfisins á Norðurlandi. Inni-heldur 220kV línur sem eru nú þegar á framkvæmdaráætlun Landsnets 2019-2022 ásamt 220kV línu frá Rangárvöllum að Blönduvirkjun.

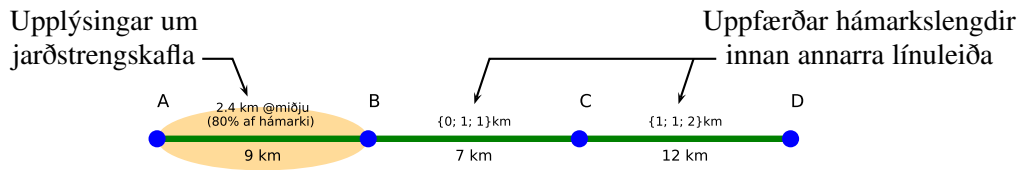


**Mynd 4.3:** Yfirlitsmynd sviðsmyndar 3 - 220kV hringtenging. Myndin samsvarar sviðsmynd B.1 fyrir möglega styrkingu flutningskerfisins frá kerfisáætlun Landsnets 2019-2028.

(i) Framsetning hámarks lengda stakra strengja innan hvernar línuleiðar fyrir sig



(ii) Framsetning á samlegðaráhrifum strengkafla á hámarks lengdir innan annarra lína



(iii) Framsetning niðurstaðna um samlegðaráhrif á töfluformi

Fyrri strengur @ M			Hámarks lengdir seinni strengs (km)		
$L_{str} = 80.0\% \cdot L_{str,max}$					
L	$L_{str,max}$	$L_{str}$	A-B	B-C	C-D
9.0	$3.0_{\nabla_F}$	2.4	A-B	$[0.00, 1.15, 1.18]$ $\Delta_F \quad \Delta_F \quad \nabla_T$	$[1.30, 1.38, 1.98]$ $\nabla_{F_0} \quad \nabla_{F_0} \quad \nabla_{F_0}$
7.2	$2.1_{\Delta_T}$	1.7	B-C	$[1.02, 0.68, 0.72]$ $\nabla_F \quad \Delta_T \quad \Delta_T$	$[1.02, 0.40, 0.34]$ $\Delta_F \quad \Delta_F \quad \Delta_T$
12.1	$3.2_{\Delta_F}$	2.6	C-D	$[1.40, 1.20, 1.16]$ $\Delta_T \quad \Delta_T \quad \Delta_T$	$[0.28, 0.88, 0.34]$ $\Delta_F \quad \Delta_T \quad \Delta_T$

Mismunandi framsetning á sömu niðurstöðum

L : heildarlengd línu.

$L_{max, str}$  : hámarks lengd strengs í punkti M

$L_{str}$  : lengd fyrri strengs í punkti M ( $L_{str} = 80\% \cdot L_{str,max}$ )

Mynd 4.4: Skýringamynd um framsetningu niðurstaðna greiningarinnar.

## **Kafli 4. Greining á hámarks lengdum jarðstrengja í íslenska flutningskerfinu**

---

$F$  og  $T$  er notað til að staðsetja hinar takmarkandi aðstæður annaðhvort í „frá“ eða „til“ enda línunnar. Þannig myndi  $\nabla_F$  gefa til kynna að takmarkandi þáttur fyrir hámarks lengd strengsins væri of hátt spennuþrep í „frá“ enda línunnar.

### **4.4 Niðurstöður greininga**

#### **4.4.1 Sviðsmynd 1: Núverandi kerfi**

Greindar voru hámarks lengdir mögulegra jarðstrengskafla innan 15 132kV lína og tveggja 220kV lína. Miðað var við þrjár mismunandi staðsetningar innan hvernar línu. Yfirlit hámarks lengda jarðstrengskafla innan einstakra lína er að finna mynd 4.5. Taka skal fram að hámarks lengdirnar eiga aðeins við um stakan jarðstrengskafla og taka ekki mið af samlegðaráhrifum annarra strengkafla.

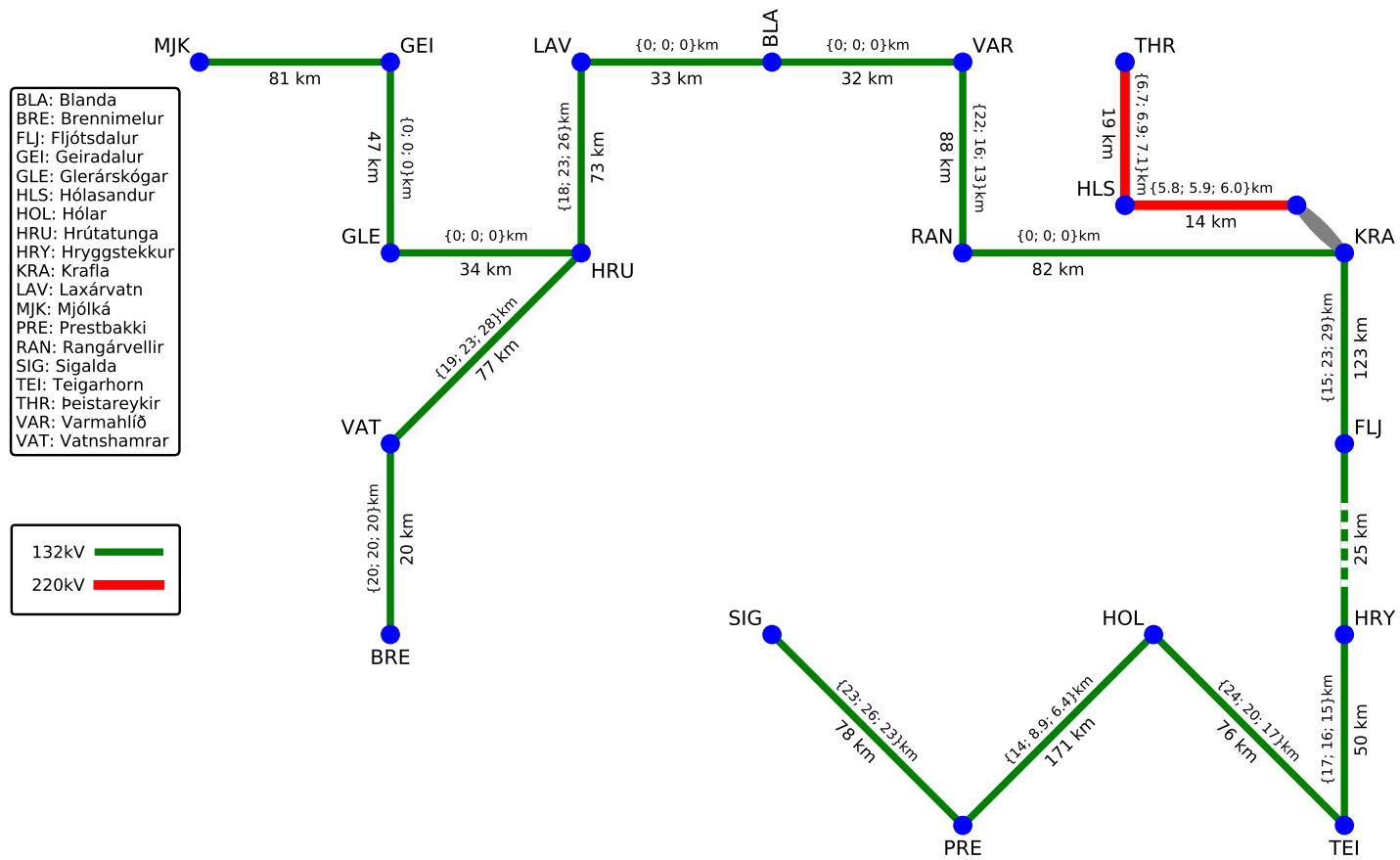
Sjá má að á sumum línuleiðum er ekki mögulegt að leggja jarðstreng (hámarks lengd sýnd sem 0km). Ástæða þessa er að línan (sem er loftlína alla leið) uppfyllir ekki forsendur greiningarinnar til að byrja með. Annaðhvort er spennuþrepið of hátt eða spennan helst ekki innan  $\pm 10\%$  vikmarka frá málspennu. Línurnar út á Vestfirði (HRU-GLE-GEI-MJK) eru dæmi um línur sem munu ekki uppfylla fyrirnefndar forsendur vegna þess að kerfið á þessum stað uppfyllir ekki N-1 skilyrði fyrir afhendingaröryggi (ekki er hægt að rjúfa línurnar til þess að kanna áhrif á spennu).

Rétt er að gefa gaum að hámarks lengdum 132kV jarðstrengja á þeim stöðum þar sem 132kV er hæsta spennustig flutningsnetsins. Þessar lengdir breytast umtalsvert þegar 220kV tengingum er bætt við í sviðmyndum 2 og 3.

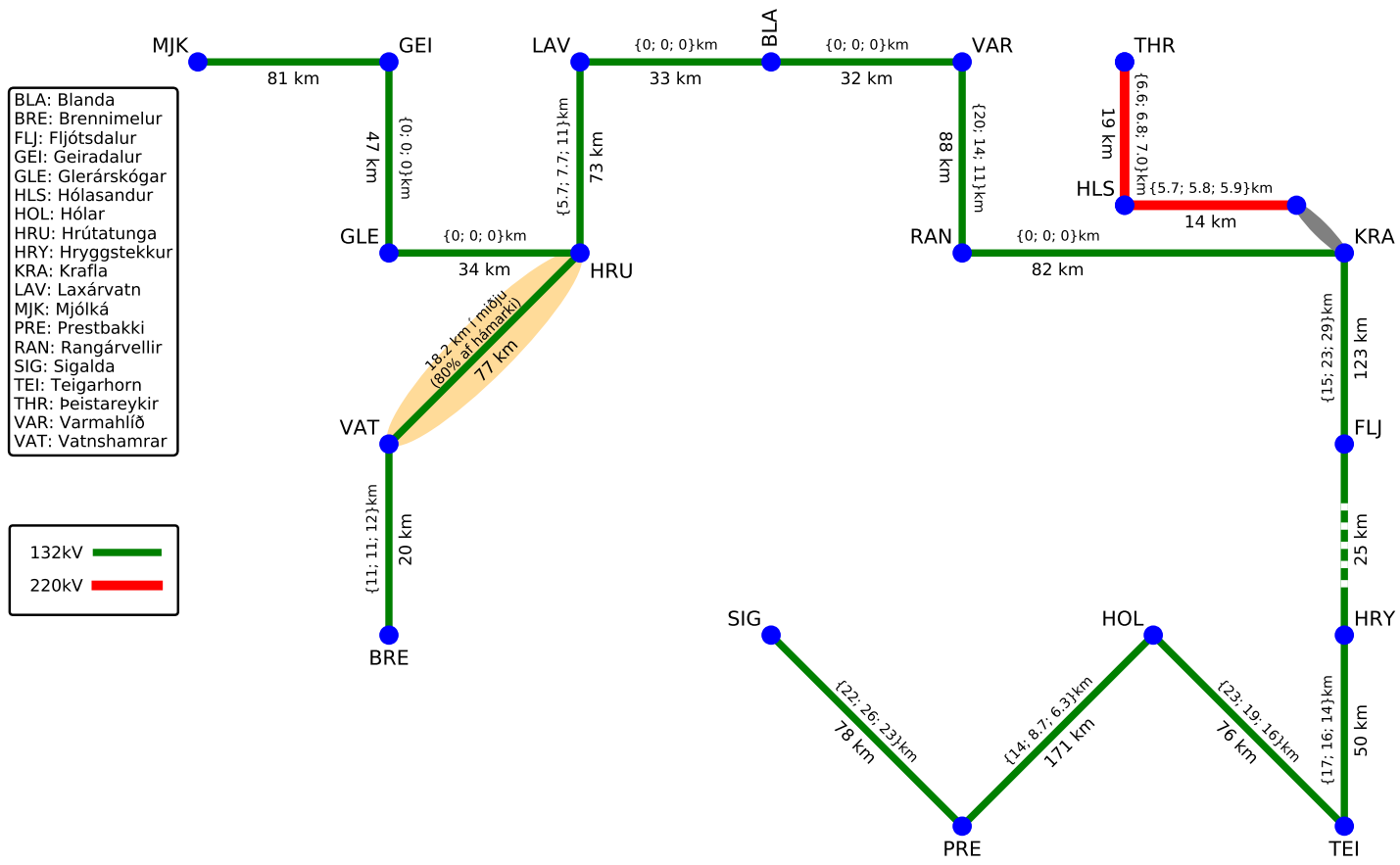
Mynd 4.6 sýnir áhrif þess að nýta 80% af mögulegri hámarks lengd 132kV jarðstrengs milli Vatnshamra og Hrutatungu (VAT-HRU) á hámarks lengd jarðstrengja innan annarra línuleiða. Áhrifin eru mest á línurnar sem eru næst jarðstrengnum, þar sem hámarks lengdirnar með jarðstrengnum eru um það bil 30-60% af hámarks lengdunum án strengsins.

Af þeim rúmlega 1000km af 132kV loftlínunum sem skoðaðar voru, benda niðurstöður til þess að koma mætti um 10% í jörðu, sé tekið er tillit til þeirra neikvæðu samlegðaráhrifa sem jarðstrengskafla á einum stað innan kerfisins hefur á hámarks lengdir jarðstrengskafla innan annarra flutningslína.





Mynd 4.5: Sviðsmynd 1: núverandi kerfi. Hámarkslengdir stakra strengkafla innan flutningslína.



**Mynd 4.6:** Sviðsmynd 1: núverandi kerfi. Hámarks lengdir strengkafli innan stakra lína, þegar jarðstrengskafli er á línuleiðinni frá Vatnshömrum að Hrutatungu sem er 80% af mögulegri hámarks lengd. Með samanburði við mynd 4.5 sjást vel hin takmarkandi áhrif jarðstrengskafans á hámarks lengdir innan annara lína.

### 4.4.2 Sviðsmynd 2: 220kV styrking á Norðurlandi

Á mynd 4.7 er að finna niðurstöður greiningar á hámarkslengd stakra kafla í flutningskerfinu fyrir sviðsmynd 2. Samanburður við niðurstöður sviðsmyndar 1 á mynd 4.5 sýnir að hámarkslengdir strengkafla í 132kV kerfinu myndu aukast mjög mikið í nánd við hinar nýju 220kV línur. Helsta ástæða þess er að með lagningu 220kV línanna ykist skammhlaupsafl í endapunktum 132kV línanna til muna sem hefði í för með sér þessa hækkun á hámarkslengd þeirra. Einnig má sjá takmarkaðar breytingar hámarkslengd strengja innan 132kV lína á svæðum sem ekki væru styrkt með nýjum 220kV línunum.

Við skoðun hámarkslengda 220kV strengja, má sjá að hámarkslengd staks jarðstrengskafla er 16km og því er aðeins mögulegt nota jarðstrengi á takmörkuðum hluta þeirra nýju 220kV lína sem bættust við í þessari sviðsmynd.

Á mynd 4.8 er hægt að sjá neikvæð samlegðaráhrif þess að leggja jarðstrengskafla innan RAN-HLS (Rangárvellir -Hólasandur) línunnar á hámarkslengdir jarðstrengja innan annarra lína. Á myndinni hefur jarðstrengur verið lagður í Rangárvalla enda línunnar sem er 80% af fundinni hámarkslengd, eða 11,9km. Sjá má að með tilkomu strengsins lækka hámarkslengdir strengkafla innan annarra lína (bæði 132kV og 220kV lína). Staðsetning strengkafla á þessum stað innan RAN-HLS línunnar er í nágrenni Akureyrarflugvallar og samkvæmt framkvæmdaráætlun Landsnet [22] er fyrirhugað að sá hluti línuleiðarinnar verði lagður í jörðu.

Út frá niðurstöðunum á mynd 4.8 má sjá að ekki sé mögulegt að leggja meira en 22km af 300km nýrra 220kV lína í jörðu í þessari sviðsmynd, eða um 7% leiðarinnar, sé miðað við þessa nýtingu jarðstrengs við Rangárvelli.

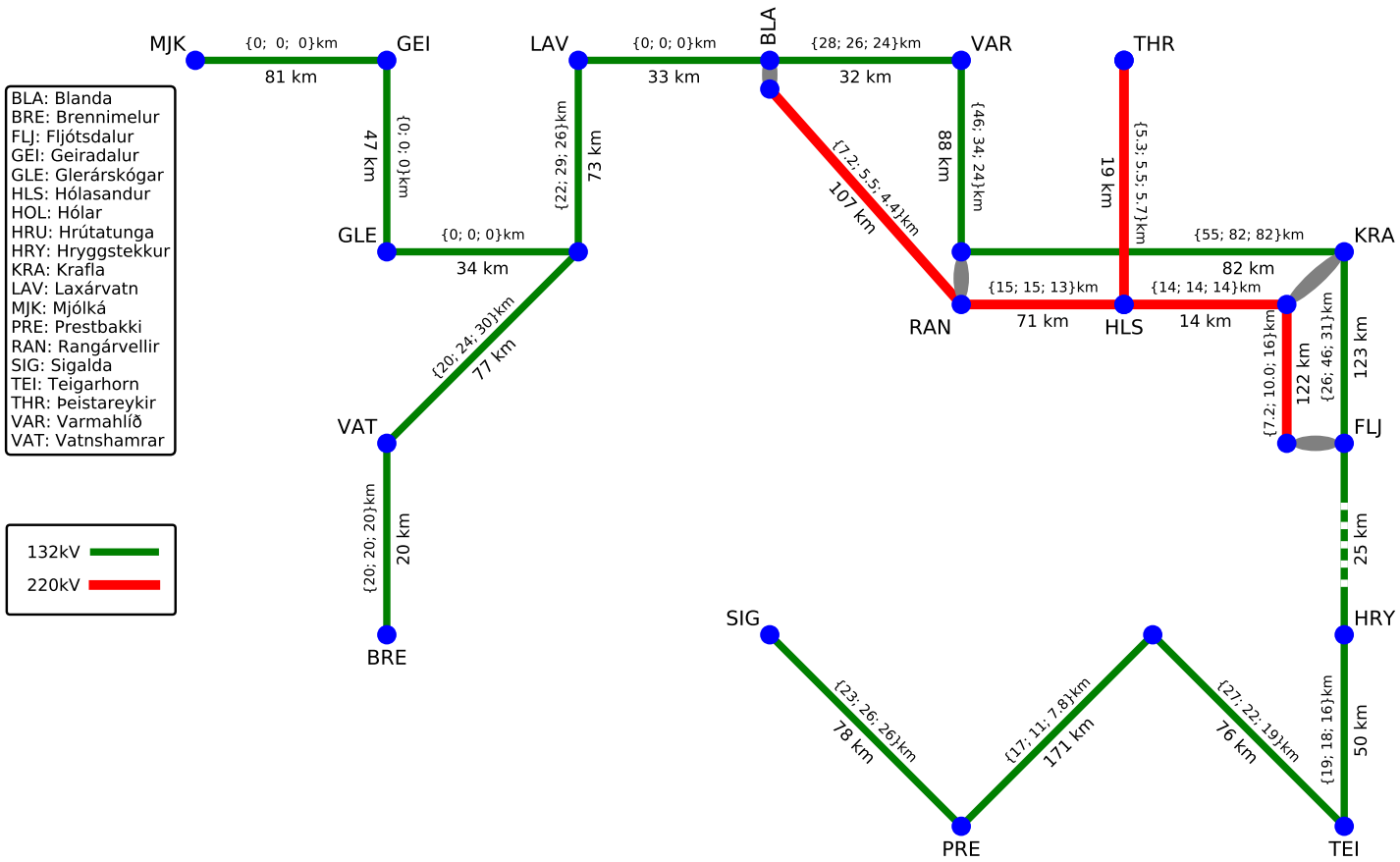
Mynd 4.9 sýnir áhrif þess að leggja jarðstreng sem er 80% af fundnu hámarki Blöndumegin á línunni BLA-RAN. Strengurinn hefur minni áhrif á hámarkslengdir innan annarra 220kV lína en strengurinn á mynd 4.8, sem útskýrist af styttri streng og aukinni fjarlægð frá hinum 220kV línunum.

#### **Aukadæmi:**

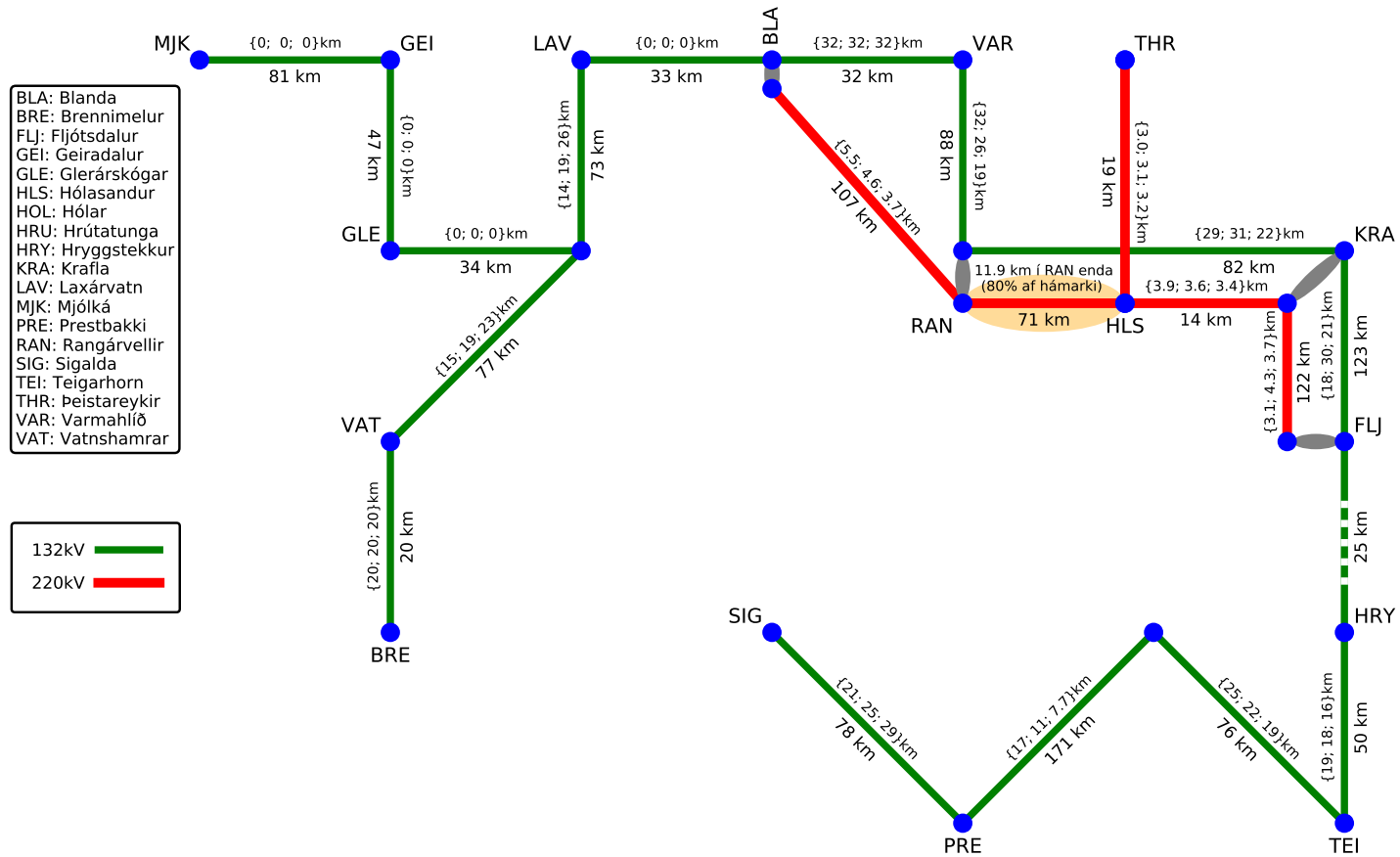
#### **11,9km 220kV jarðstrengur við flugvöll Akureyrar, hvert er hámarkið í Skagafirði?**

Til þess að sannreyna niðurstöður greiningaforritsins, var unnið nánar með niðurstöðurnar frá mynd 4.8 þar sem sýndar voru hámarkslengdir jarðstrengja innan kerfisins þegar 11,9km jarðstrengur er lagður Rangárvallarmegin í línunni RAN-HLS. Til sannreyingar var framkvæmd greining á kvikri (e. dynamic) svörun kerfisspennu í kjölfar rofhreyfinga á línunum frá Blöndu að Rangárvöllum og frá Rangárvöllum að Hólasandi.

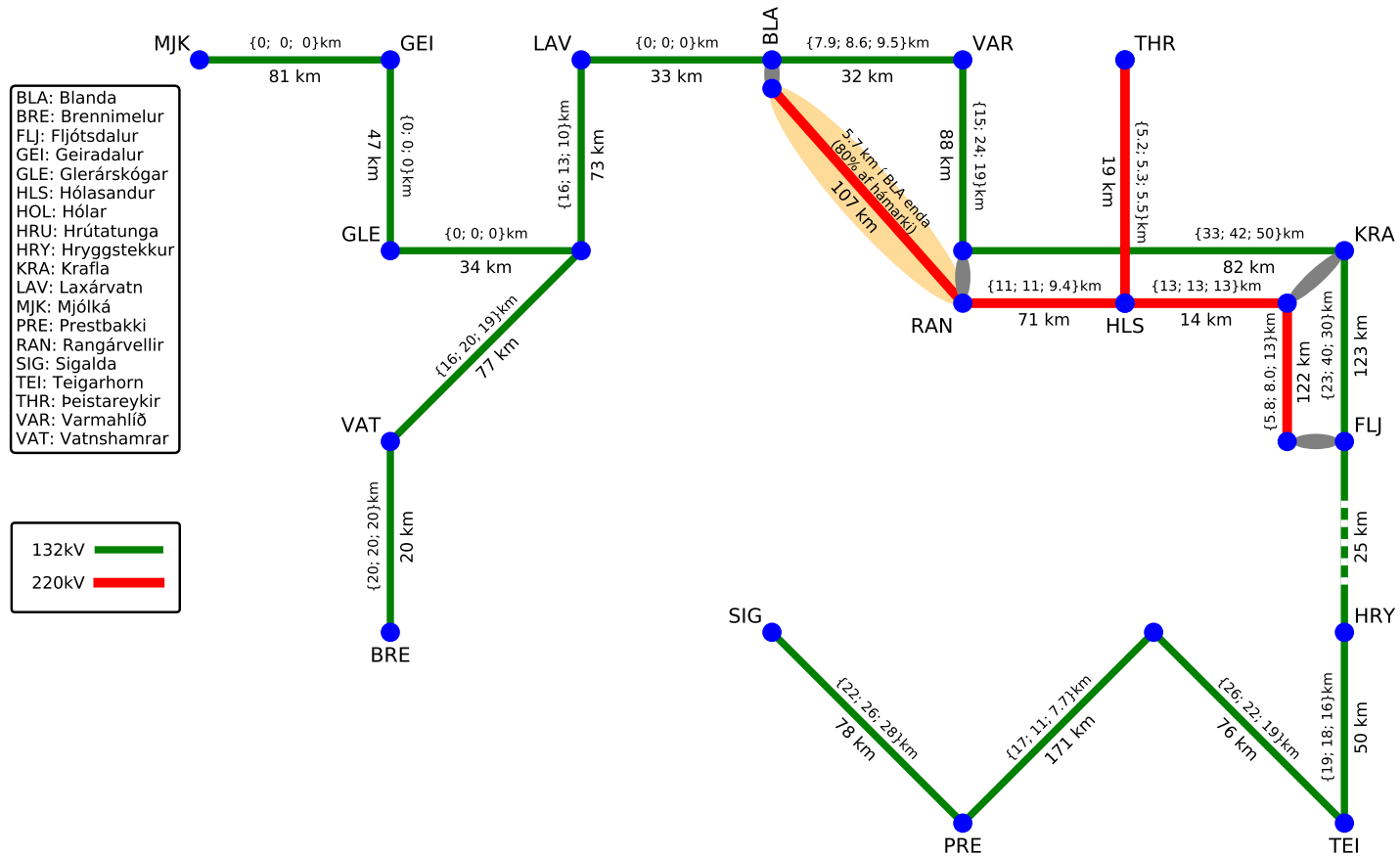
Á mynd 4.8 mátti sjá að fundin hámarkslengd strengkafla frá Blönduenda línunnar BLA-



Mynd 4.7: Sviðsmynd 2: 220kV styrking flutningskerfisins á Norðurlandi. Hámarksleingdir stakra strengkafla innan flutningslína.



**Mynd 4.8:** Sviðsmynd 2: 220kV styrking flutningskerfisins á Norðurlandi. Hámarks lengdir strengkafla innan stakra lína, þegar jarðstrengskaffi á línuleiðinni frá Rangárvöllum að Hólasandi væri 11,9 km eða 80% af mögulegri hámarks lengd með upphafspunkt frá tengivirki á Rangárvöllum.



**Mynd 4.9:** Sviðsmynd 2: 220kV styrking flutningskerfisins á Norðurlandi. Hámarks lengdir strengkafla innan stakra lína, þegar jarðstrengskaffi á línuleiðinni frá Blöndu að Rangárvöllum væri 5,7 km eða 80% af mögulegri hámarks lengd með upphafspunkt frá tengivirki við Blönduvirkjun.

#### 4.4 Niðurstöður greininga

RAN er 5,5 km. Ákveðið var að greina tvö tilfelli nánar, það fyrra með streng sem er 80% af hámarkslengd (4,4 km) og það seinna með streng örlítið lengri en hámarkslengd, eða 101% (5,6 km).

Til þess að geta metið áhrif strenglagna á spennuris og spennuþrep, var spennan bæði í línuenda og á teini skoðuð í kjölfar rofhreyfinga. Þær rofhreyfingar sem hin kvika greining náði til voru eftirfarandi:

- a:** BLA endi BLA-RAN línu opnaður við 5s
- b:** BLA enda BLA-RAN línu lokað við 20s
- c:** RAN endi BLA-RAN línu opnaður við 35s
- d:** RAN enda BLA-RAN línu lokað við 50s
- e:** RAN endi RAN-HLS línu opnaður við 65s
- f:** RAN enda RAN-HLS línu lokað við 80s
- g:** HLS endi RAN-HLS línu opnaður við 95s
- h:** HLS enda RAN-HLS línu lokað við 110s

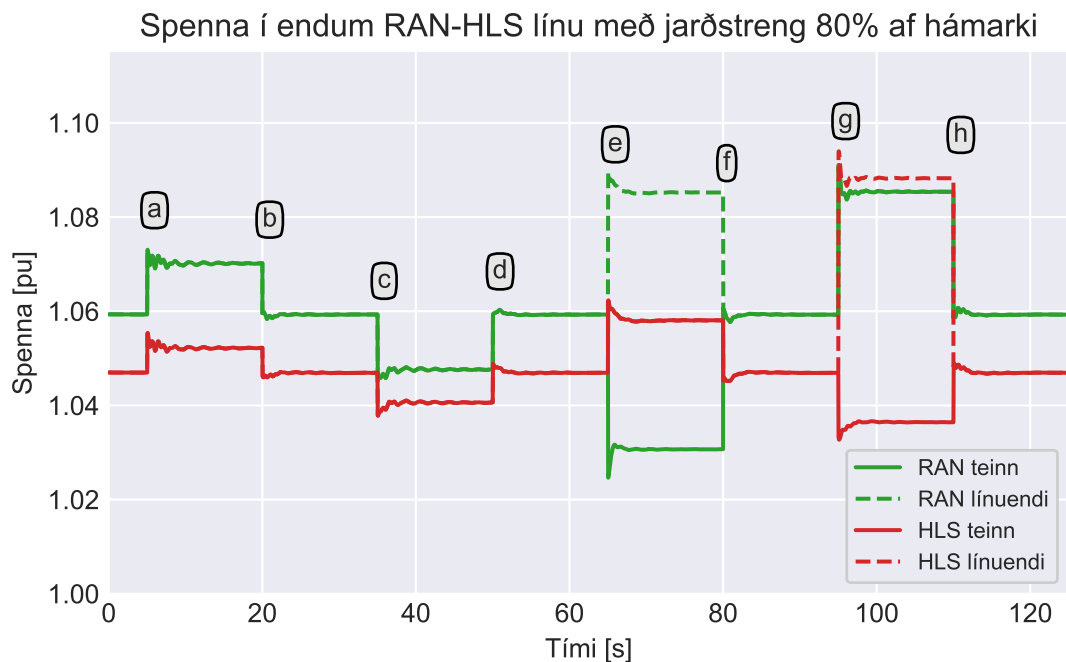
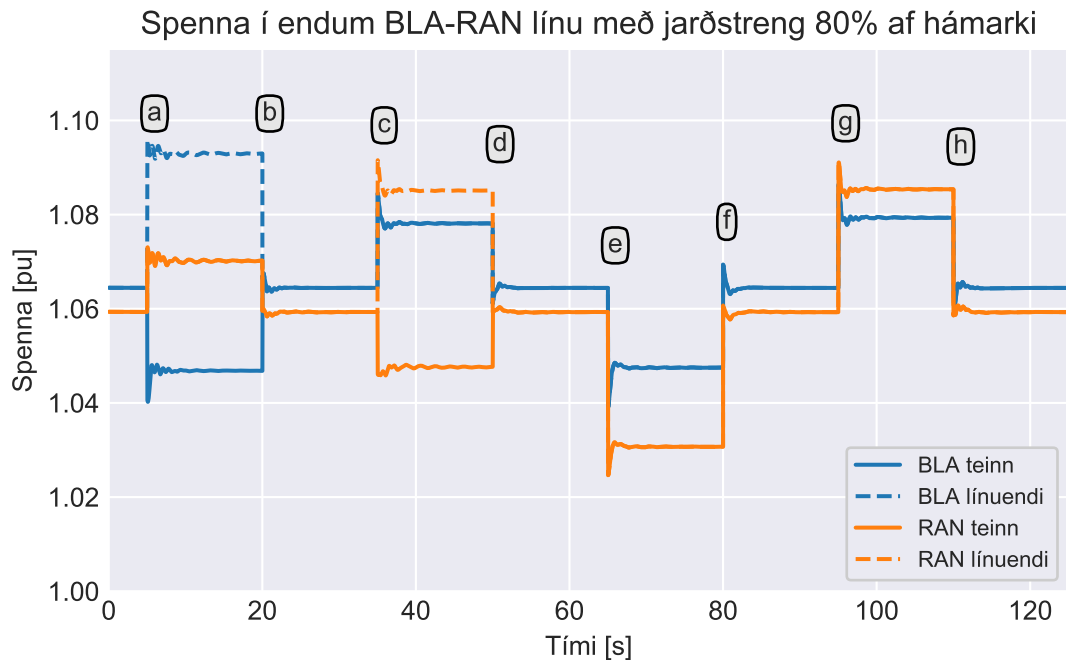
Myndir 4.10 og 4.11 sýna spennuna á endum línanna BLA-RAN og RAN-HLS fyrir strenglengdir í Blönduenda sem eru annars vegar 80% og hins vegar 101% hlutfall hámarksstrenglengdar.

Þegar notast er við jarðstreng sem er 80% af hámarkslengd, má sjá á mynd 4.10 að spennan helst innan  $\pm 10\%$  frá málspennu við allar rofhreyfingar og hámarksspennuþrep er einnig vel innan 5%. Þetta tilfelli uppfyllir því fyrrgreind skilyrði.

Aftur á móti má sjá að skilyrðið um að spennan ætti að vera innan  $\pm 10\%$  frá málspennu er ekki uppfyllt ef jarðstrengurinn er 101% af fundinni hámarkslengd. Það er spennan Blöndumegin á línuenda BLA-RAN línunnar sem helst ekki innan markanna þegar línan er rofin í þeim enda. Öll spennuþrep eru samt sem áður innan ásættanlegra marka.

Þessar niðurstöður staðfesta, með annari greiningaaðferð, fyrri niðurstöður um að ekki sé hægt að notast við lengri streng en um 5,5 km, miðað við það álagstílfelli sem unnið var út frá. Tekið skal fram að ekki voru greind áhrif jarðstrengjanna á mögnun yfirtóna í kerfinu eða hvort umfang undirsegulmögnunar nærliggjandi rafala sé komið að þolmörkum, sem gæti takmarkað ennfrekar hámarkslengd jarðstrengjanna.

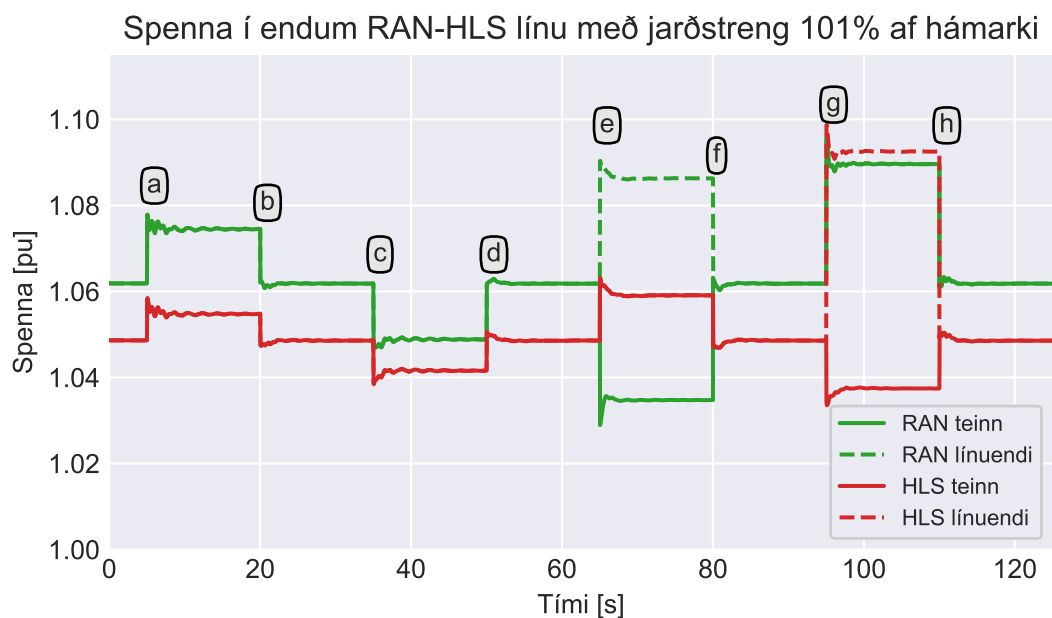
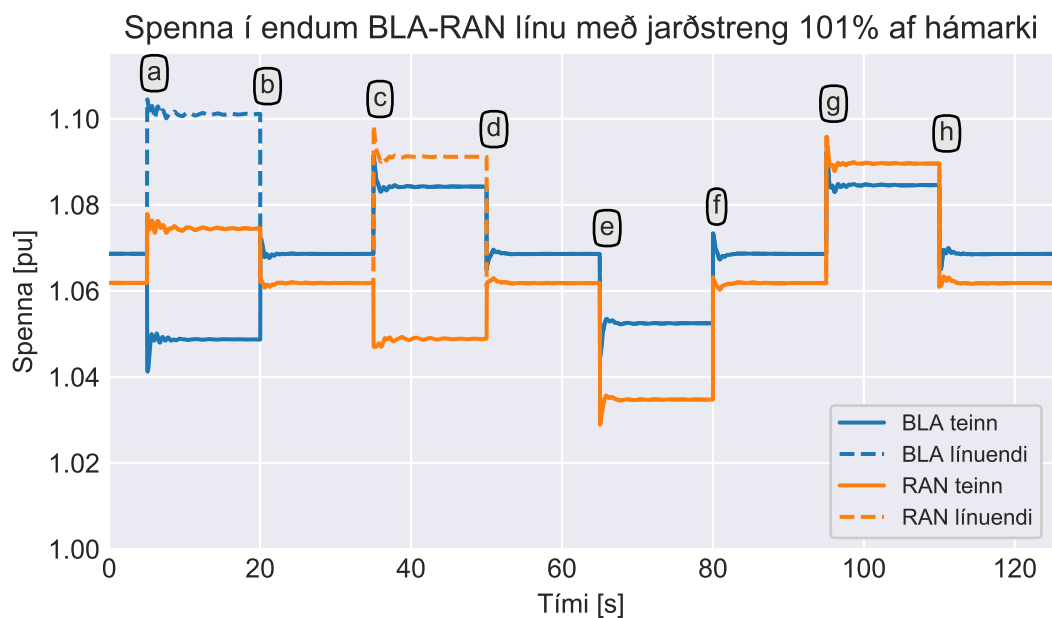
#### Kafli 4. Greining á hámarks lengdum jarðstrengja í íslenska flutningskerfinu



**Mynd 4.10:** Breytingar spennu við rofhreyfingar þegar strengur milli BLA og RAN er 80% af fundnu hámarki frá mynd 4.8 (4,4 km í BLA enda) og 11,9 km strengur er í RAN enda línunnar RAN-HLS. Þetta dæmi uppfyllir skilyrði um hámarks spennuþrep og viktörk frá málspennu.



#### 4.4 Niðurstöður greininga



**Mynd 4.11:** Sömu rofhreyfingar og á mynd 4.10, nú með streng sem er 101% eða 5,6km af fundnu hámarki. Sístæð spenna á opnum línuenda BLA megin fer rétt yfir 10% af málspennu (sjá rofhreyfingar a-b) og þar af leiðandi eru skilyrði um hámarksvíkmörk frá málspennu ekki uppfyllt

## **Kafla 4. Greining á hámarkslengdum jarðstrengja í íslenska flutningskerfinu**

---

### **4.4.3 Sviðsmynd 3: 220kV hringtenging**

Niðurstöður greiningar á hámarkslengdum stakra jarðstrengja fyrir sviðsmynd 3 er að finna á mynd 4.12. Sjá má að hámarkslengdir 220kV strengja innan lengri línanna er aðeins takmarkaður hluti heildarlengda línanna. Einnig má sjá mikil áhrif 220kV styrkingar á hámarkslengdir 132kV strengkafla með samanburði við mynd 4.5.

Á mynd 4.13 er að finna niðurstöður hámarkslengda innan 220kV kerfisins þegar 80% hámarkslengdar mögulegs jarðstrengskafla við Akureyrarflugvöll er kominn í jörðu. Með samanburði við fyrri mynd sjást vel neikvæð samlegðaráhrif lagningar jarðstrengs á hámarksstrenglengdir innan annarra lína. Sé haldið áfram að bæta við jarðstrengjaköflum, takamarkast hámarkslengdir innan annarra lína enn frekar. Ítarlegri niðurstöður sem sýna hvernig strenglögn á einum stað hefur áhrif á hámarkslengdir innann annarra lína er að finna í töflu 4.1. Taflan sýnir hvernig strenglögn sem er 80% af fundinni hámarkslengd fyrir tiltekna 220kV línu hefur áhrif á hámarkslengdir strengkafla innan annarra lína.

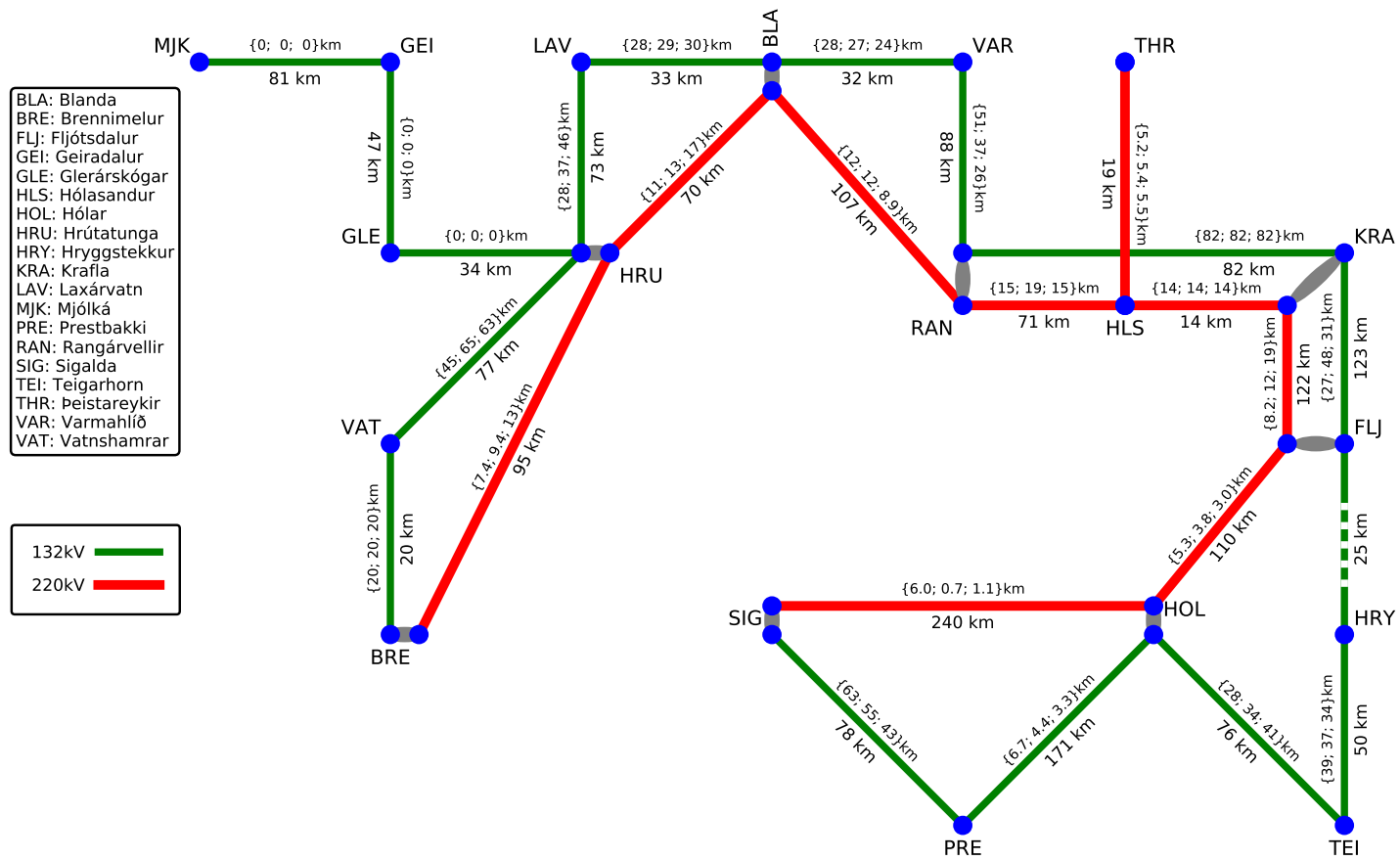
Notast má við niðurstöðurnar á mynd 4.13 til að leggja mat á hversu stórt hlutfall nýrra 220kV lína má leggja í jörðu. Sé notast við meðaltal hámarksstrenglengda innan hvernar línu fyrir sig, fæst að rétt um 40km af rúmlega 800km nýrra 220kV lína megi leggja í jörðu, eða um 5%. Sé hugað að því að nýjar strenglagnir munu sennilegast valda frekari takmörkunum hámarkslengda innan annara lína, mætti ætla að hlutfallið væri enn lægra en 5%. Sem fyrr segir skal hafa í huga að ekki var framkvæmd greining á áhrifum jarðstrengskafla á mögnun yfirtóna og hvort svipul svörun kerfisins haldist innan ásættanlegra marka. Niðurstöður slíkrar greiningar gæti leitt til enn frekari lækkunar á hlutfallinu.

## **4.5 Samanburður við fyrri greiningaverkefni**

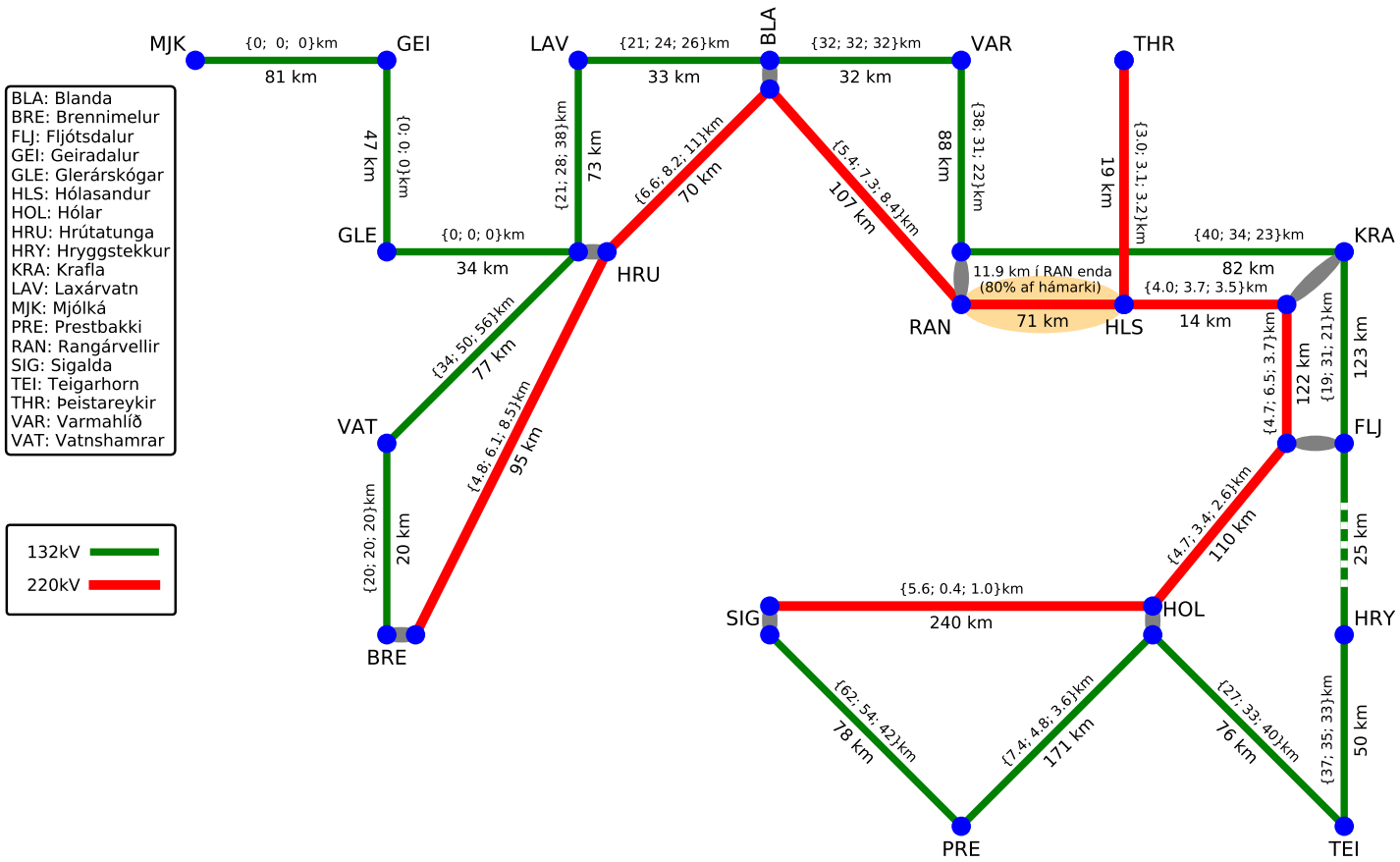
Áhugavert er að setja fengnar niðurstöður í samhengi við önnur verkefni þar sem metnar hafa verið hámarkslengdir mögulegra jarðstrengjakafla í íslenska flutningskerfinu.

Í greiningaskýrslu Landsnets, „jarðstrengslengdir í meginflutningskerfinu“, var lagt mat á mögulegar jarðstrengslengdir í nýju 220kV flutningskerfi á Norðurlandi [23]. Skoðað var tilfelli þar sem búið var að styrkja kerfið með þremur 220kV háspennulínum, sú fyrsta frá Blöndu að Rangárvöllum (Blöndulína 3), önnur frá Rangárvöllum að Hólasandi (Hólasandslína 3) og svo lína frá Kröflu að Fljótsdal (Kröflulína 3). Þetta tilfelli er því hið sama og notast var við í sviðsmynd 2 (sjá mynd 4.2).

Greiningarvinnan í [23] var ítarleg, þar sem notast var við aflflæðiútreikninga og hermun á kvikri hegðun kerfisins með kerfislíkani Landsnets í PSS/E forritinu til að meta takmarkanir strenglengda með tilliti til spennuriss og spennuþreps. Til ákvörðunar á því hvort



Mynd 4.12: Sviðsmynd 3: 220kV hringtenging. Hámarks lengdir stakra strengkafla innan flutningslína.



**Mynd 4.13:** Sviðsmynd 3: 220kV hringtenging. Hámarks lengdir strengkafla innan stakra lína, þegar jarðstrengskafli á línuleiðinni frá Rangárvöllum að Hólasandi sem væri 90% af mögulegri hámarks lengd.

Fyrri strengur @ M			Hámarks lengdir seinni strengs (km)									
$L_{str} = 80.0\% \cdot L_{str,max}$			$[L_{str,max,F}, L_{str,max,M}, L_{str,max,T}]$ ; $\Delta$ = spennuprep takmarkandi; $\Lambda$ = utan 10% vikmarka málgildis spennu									
L	$L_{str,max}$	$L_{str}$		SIG-HOL <sub>220</sub>	HRU-BLA <sub>220</sub>	HLS-THR <sub>220</sub>	HLS-RAN <sub>220</sub>	HLS-KRA <sub>220</sub>	FLJ-KRA <sub>220</sub>	FLJ-HOL <sub>220</sub>	BRE-HRU <sub>220</sub>	BLA-RAN <sub>220</sub>
240.0	0.7 $\Lambda_T$	0.5	SIG-HOL <sub>220</sub>		[4.34, 5.08, 6.18] $\Lambda_{T_0} \Lambda_{T_0} \Lambda_{T_0}$	[5.20, 5.36, 5.54] $\Lambda_F \Lambda_F \Lambda_F$	[13.84, 11.72, 10.20] $\Lambda_{T_0} \Lambda_{T_0} \Lambda_{T_0}$	[14.00, 14.00, 14.00]	[8.32, 11.76, 15.58] $\Lambda_F \Lambda_F \Lambda_{T_0}$	[4.48, 5.72, 7.40] $\Lambda_F \Lambda_F \Lambda_{T_0}$	[2.98, 3.52, 4.32] $\Lambda_{T_0} \Lambda_{T_0} \Lambda_{T_0}$	[6.48, 7.98, 9.14] $\Lambda_{T_0} \Lambda_{T_0} \Lambda_T$
70.0	13.7 $\Lambda_F$	10.9	HRU-BLA <sub>220</sub>	[5.72, 0.18, 0.86] $\Lambda_F \Lambda_T \Lambda_T$		[5.04, 5.20, 5.38] $\Lambda_F \Lambda_F \Lambda_F$	[7.94, 5.94, 4.72] $\Lambda_{F_0} \Lambda_{F_0} \Lambda_{F_0}$	[8.40, 8.58, 8.76] $\Lambda_{F_0} \Lambda_{F_0} \Lambda_{F_0}$	[6.94, 9.80, 9.14] $\Lambda_F \Lambda_F \Lambda_{F_0}$	[2.58, 3.30, 4.56] $\Lambda_F \Lambda_F \Lambda_F$	[2.12, 2.76, 3.88] $\Lambda_F \Lambda_F \Lambda_F$	[2.56, 3.38, 4.68] $\Lambda_{F_0} \Lambda_{F_0} \Lambda_T$
19.0	5.3 $\Lambda_F$	4.3	HLS-THR <sub>220</sub>	[5.76, 0.62, 1.10] $\Lambda_F \Lambda_T \Lambda_T$	[10.08, 12.48, 16.02] $\Lambda_F \Lambda_F \Lambda_F$		[15.10, 15.90, 12.16] $\Lambda_F \Lambda_T \Lambda_T$	[14.00, 14.00, 14.00]	[6.54, 9.24, 15.28] $\Lambda_F \Lambda_F \Lambda_F$	[2.82, 3.62, 5.02] $\Lambda_F \Lambda_F \Lambda_F$	[6.88, 8.82, 12.18] $\Lambda_F \Lambda_F \Lambda_F$	[10.36, 12.12, 8.88] $\Lambda_F \Lambda_T \Lambda_T$
71.0	18.7 $\Lambda_F$	14.9	HLS-RAN <sub>220</sub>	[5.44, 0.40, 0.98] $\Lambda_F \Lambda_T \Lambda_T$	[6.60, 7.30, 5.84] $\Lambda_F \Lambda_{F_0} \Lambda_{F_0}$	[3.96, 4.10, 4.24] $\Lambda_{T_0} \Lambda_{T_0} \Lambda_{T_0}$		[4.68, 4.98, 5.30] $\Lambda_{T_0} \Lambda_{T_0} \Lambda_{T_0}$	[3.10, 4.38, 4.92] $\Lambda_F \Lambda_F \Lambda_{T_0}$	[2.58, 3.30, 4.58] $\Lambda_F \Lambda_F \Lambda_F$	[4.78, 6.16, 8.58] $\Lambda_F \Lambda_F \Lambda_F$	[5.38, 3.88, 2.92] $\Lambda_F \Lambda_{F_0} \Lambda_{F_0}$
14.0	14.0	11.2	HLS-KRA <sub>220</sub>	[5.46, 0.50, 1.04] $\Lambda_F \Lambda_T \Lambda_T$	[8.68, 10.78, 13.94] $\Lambda_F \Lambda_F \Lambda_F$	[5.00, 5.16, 5.34] $\Lambda_F \Lambda_F \Lambda_F$	[6.42, 7.96, 9.00] $\Lambda_{T_0} \Lambda_{T_0} \Lambda_T$		[3.56, 5.06, 8.60] $\Lambda_F \Lambda_F \Lambda_F$	[2.64, 3.36, 4.68] $\Lambda_F \Lambda_F \Lambda_F$	[6.02, 7.76, 10.74] $\Lambda_F \Lambda_F \Lambda_F$	[8.42, 11.30, 8.64] $\Lambda_F \Lambda_F \Lambda_T$
122.0	11.6 $\Lambda_F$	9.3	FLJ-KRA <sub>220</sub>	[5.36, 0.56, 1.06] $\Lambda_F \Lambda_T \Lambda_T$	[9.88, 12.26, 10.96] $\Lambda_F \Lambda_F \Lambda_{F_0}$	[3.76, 3.88, 4.00] $\Lambda_{F_0} \Lambda_{F_0} \Lambda_{F_0}$	[3.82, 4.48, 5.40] $\Lambda_{F_0} \Lambda_{F_0} \Lambda_{F_0}$	[3.86, 3.68, 3.54] $\Lambda_{F_0} \Lambda_{F_0} \Lambda_{F_0}$		[2.68, 3.42, 4.76] $\Lambda_F \Lambda_F \Lambda_F$	[6.74, 8.66, 11.96] $\Lambda_F \Lambda_F \Lambda_F$	[10.10, 7.02, 5.32] $\Lambda_F \Lambda_{F_0} \Lambda_{F_0}$
110.0	3.8 $\Lambda_F$	3.0	FLJ-HOL <sub>220</sub>	[5.42, 0.62, 1.10] $\Lambda_F \Lambda_T \Lambda_T$	[10.88, 13.46, 17.20] $\Lambda_F \Lambda_F \Lambda_F$	[5.16, 5.34, 5.50] $\Lambda_F \Lambda_F \Lambda_F$	[15.38, 18.56, 14.46] $\Lambda_F \Lambda_F \Lambda_T$	[14.00, 14.00, 14.00]	[8.16, 11.52, 18.88] $\Lambda_F \Lambda_F \Lambda_F$		[7.34, 9.42, 12.96] $\Lambda_F \Lambda_F \Lambda_F$	[11.50, 12.24, 8.96] $\Lambda_F \Lambda_T \Lambda_T$
95.0	9.6 $\Lambda_F$	7.6	BRE-HRU <sub>220</sub>	[5.80, 0.18, 0.84] $\Lambda_F \Lambda_T \Lambda_T$	[2.08, 2.54, 3.26] $\Lambda_{F_0} \Lambda_{F_0} \Lambda_{F_0}$	[5.12, 5.30, 5.46] $\Lambda_F \Lambda_F \Lambda_F$	[9.34, 7.10, 5.70] $\Lambda_{F_0} \Lambda_{F_0} \Lambda_{F_0}$	[10.06, 10.20, 10.34] $\Lambda_{F_0} \Lambda_{F_0} \Lambda_{F_0}$	[7.84, 11.08, 10.90] $\Lambda_F \Lambda_F \Lambda_{F_0}$	[2.60, 3.32, 4.60] $\Lambda_F \Lambda_F \Lambda_F$		[3.22, 4.16, 5.86] $\Lambda_{F_0} \Lambda_{F_0} \Lambda_{F_0}$
107.0	12.3 $\Lambda_T$	9.9	BLA-RAN <sub>220</sub>	[5.66, 0.40, 0.98] $\Lambda_F \Lambda_T \Lambda_T$	[5.02, 3.76, 3.00] $\Lambda_{T_0} \Lambda_{T_0} \Lambda_{T_0}$	[4.98, 5.14, 5.30] $\Lambda_F \Lambda_F \Lambda_F$	[9.94, 9.70, 7.66] $\Lambda_F \Lambda_{F_0} \Lambda_{F_0}$	[13.80, 13.78, 13.78] $\Lambda_T \Lambda_T \Lambda_T$	[6.02, 8.52, 14.16] $\Lambda_F \Lambda_F \Lambda_F$	[2.64, 3.38, 4.70] $\Lambda_F \Lambda_F \Lambda_F$	[4.46, 5.74, 5.08] $\Lambda_F \Lambda_F \Lambda_{T_0}$	

**Skýringar:**

L : heildarlengd línu

 $L_{max, str}$  : hámarks lengd strengs innan línu í punkti M $L_{str}$  lengd fyrri strengs í punkti M ( $L_{str} = 80\% \cdot L_{str,max}$ )

F = frá-endi línu; M = miðbik línu; T = til-endi línu.

 $\Lambda$  : spennuris takmarkandi $\nabla$  : spennuprep takmarkandi $\Lambda_0/\nabla_0$  : spennuris/spennuprep fyrri línu takmarkar lengd seinni línu

**Tafla 4.1:** Sviðsmynd 3: 220kV hringtenging. Hámarks lengdir strengkafla innan allra 220kV lína (seinni línur), þegar búið er að leggja jarðstreng um miðbik fyrri línu sem er 80% af fundinni hámarks lengd. Með samanburði við mynd 4.12 má sjá hvernig hámarks lengdirnar breytast háð staðsetningu og lengd fyrri strengs.

## Kafli 4. Greining á hámarks lengdum jarðstrengja í íslenska flutningskerfinu

svípul svörun spennu haldist innan ásættanlegra marka við rofhreyfingar var notast við hermiforritið PSCAD.

Niðurstöður greiningarinnar varðandi hámarks lengdir voru:

- Í Blöndulínu 3 var hægt að leggja um  $10\text{ km}$  (af rúmlega  $100\text{ km}$ ) í jörðu.
- Í Hólasandslínu 3 var hámarkið  $12\text{ km}$  og nefnt var að huga þyrfti vel að einangrunar-samhæfi búnaðar.
- Innan Kröflulínu 3 var metið að  $15\text{ km}$  af  $120\text{ km}$  mætti leggja í jörðu.

Séu þessar niðurstöður bornar saman við fundnar hámarks lengdir stakra strengja fyrir sviðsmynd 2 (sjá mynd 4.7), sést að góður samhljómur er á milli niðurstaðanna. Hafa ber í huga, að fundnar hámarks lengdir geta breyst eftir þeim rekstraraðstæðum (kerfisálagi og álagsmynstri) sem unnið er með í greiningunum.

Í annari skýrslu Landsnets [24] er framkvæmd greining á því hvort unnt sé að leggja hluta af núverandi  $132\text{ kV}$  flutningskerfi á Norður- og Norðausturlandi í jörðu í kjölfar fyrrnefndrar uppbyggingar nýrra  $220\text{ kV}$  raflína. Beitt var samskonar aðferðafræði og í fyrri greiningunni.

Skoðaðir voru möguleikar á því að leggja einstaka hluta  $132\text{ kV}$  loftlína á svæðinu í jörðu ásamt samverkandi áhrifum af því að leggja hluta fleiri lína í jörðu þar sem eftirfarandi tvö tilfelli voru skoðuð:

- Nýjar  $220\text{ kV}$  raflínur byggðar alfarið sem loftlínur
- Nýjar  $220\text{ kV}$  raflínur byggðar sem loftlínur að undanskildum  $12\text{ km}$  kafla í Hólasandslínu 3 (Rangárvellir-Hólasandur) sem er lagður í jörðu næst tengivirki á Rangárvöllum.

Niðurstöður í fyrra tilvikinu voru á þá leið að í Blöndulínu 2 (BLA-VAR) mætti leggja  $31\text{ km}$  í jörðu, í Rangárvallalínu 1 (VAR-RAN)  $38,5\text{ km}$ , í Kröflulínu 1 (RAN-KRA)  $82\text{ km}$  og innan Kröflulínu 2 (KRA-FJL) mátti leggja  $72\text{ km}$ . Séu þessar lengdir bornar saman við niðurstöðurnar fyrir sviðsmynd 2 á mynd 4.7 fást mjög sambærilegar niðurstöður. Helsta frávikði er í Kröflulínu 2, sem gæti útskýrst af mismunandi stillingum spennureglunar og álagi stórra véla í Fljótsdal.

Niðurstöður seinni liðar greiningar Landsnets í [24], þar sem  $12\text{ km}$  strengur var við Akureyrarflugvöll, leiddu í ljós frekari takmarkanir á hámarks lengdum strengkafla innan  $132\text{ kV}$  línanna, eins og tilfellið var við greiningu á sviðsmynd 2 (sjá mynd 4.8). Sambærilegar niðurstöður fengust fyrir Rangárvallalínu 2 og Blöndulínu 2, meðan strenglengdir innan

#### **4.6 Afmörkun frekari greininga vegna lengdatakmarkana jarðstrengja**

---

Kröflulínanna voru metnar lengri í Landsnetsskýrslunni. Mögulega má útskýra þann mun út frá mismunandi álagstílfellum sem notast var við í greiningunum.

Út frá samanburði þeirra niðurstaðna sem kyntar eru í þessum kafla og niðurstaðna annara sambærilegra greiningarverkefna, þar sem lengdatakmarkanir jarðstrengskafla innan íslenska flutningskerfisins eru greindar, má sjá að góður samhljómur er á milli niðurstaðanna. Rennir það frekari stöðum undir áreiðanleika fyrri greininga [23, 24] og þessarar greiningar hvað varðar lengdatakmarkanir háspennta jarðstrengja.

#### **4.6 Afmörkun frekari greininga vegna lengdatakmarkana jarðstrengja**

Aðrar greiningar innan þessa verkefnis snúa að þáttum tengdum notkun jarðstrengja við styrkingu íslenska flutningskerfisins og áhrifa þeirra á afhendingaröryggi, raforkuverð, umhverfiskostnað og byggðarþróun. Til þess að geta metið þessa þætti á raunsæjan hátt, er mikilvægt að hafa góða hugmynd hversu stóran hluta nýrra 220kV lína er mögulegt að leggja í jörðu. Engin ástæða þykir til að greina jákvæð og neikvæð áhrif þess að leggja allt flutningskerfið í jörðu eða mjög stóran part þess, ef ekki er tæknilega mögulegt að reka slíkt kerfi.

Út frá niðurstöðum greiningar á sviðsmynd 3, þar sem 220kV hringtenging var skoðuð var raunhæft að áætla að ekki væri mögulegt að koma hærra hlutfalli en um 5% af heildarlengd nýrra lína í jörðu. Við umfjöllun um aðra þætti þessa verkefnis er snúa að notkun jarðstrengja í flutningskerfinu verður greiningavinnan afmörkuð út frá þessum lengdatakmörkunum.

#### **Kafli 4. Greining á hámarkslengdum jarðstrengja í íslenska flutningskerfinu**

---



# Kafi 5

## Áhrif jarðstrengja á afhendingaröryggi íslenska flutningskerfisins

---

Í þessum kafla verða áhrif notkunar jarðstrengskafla við styrkingu flutningskerfisins á afhendingaröryggi metin í samanburði við tilfelli þar sem eingöngu væru notaðar loftlínur.

### 5.1 Bakgrunnur: Skilgreiningar á afhendingaröryggi

Reglugerð nr. 1048/2004 um gæði raforku og afhendingaröryggi, skilgreinir eftirfarandi stuðla sem notast skal við þegar meta á afhendingaröryggi flutningskerfis og dreifiveitna[5]:

1. Stuðull um rofið álag (SRA): Hlutfall samanlagðrar aflskerðingar og mesta álags á kerfið. *SRA* er lýst með eftirfarandi jöfnu:

$$SRA = \frac{\sum P_i}{P_{max}} \quad [-]$$

þar sem:

$$P_i = \text{Aflskerðing í skerðingartilviki } i \text{ [MW]}$$

$$P_{max} = \text{Hámarksafli heildarinnmötunar ársins á flutningskerfið [MW]}$$

2. Stuðull um meðallengd skerðingar, straumleysismínútur (SMS): Stuðullinn metur hve lengi skerðing hefur staðið miðað við hlutfall orkuskerðingar af heildarorkuafhendingu. *SMS* stuðullinn er ákvarðaður á eftirfarandi hátt:

$$SMS = \frac{\sum E_i}{E_{Alls}} \cdot 8760 \cdot 60 \quad [\text{mínútur/ár}]$$

þar sem:

$$E_i = \text{Orkuskerðing við rekstrartruflun } i \text{ [MWh]}$$

$$E_{Alls} = \text{Heildarorkuafhending til viðskiptavina [MWh]}$$

3. Kerfismínútur (KM): Stuðull til að meta hve alvarlegt hvert einstakt tilvik skertrar orkuafhendingar er. *KM* eru fundnar með eftirfarandi jöfnu:

$$KM = \frac{E \cdot 60}{P_{max}} \quad [\text{mínútur}]$$

## Kafli 5. Áhrif jarðstrengja á afhendingaröryggi íslenska flutningskerfisins

---

þar sem:

$$E = \text{Orkuskerðing í rekstrartruflun [MWh]}$$

$$P_{max} = \text{Hámarksafli flutningskerfis [MW]}$$

Landsnet hefur að auki notast við þrjá stuðla við mat á áreiðanleika flutningskerfisins, og eru þeir:

4. Stuðull um skerta orkuafhendingu (SSO): Hlutfall orkuskerðingar ef miðað við óbreytt afl allan skerðingartímann og hámarks álags orkuöflunarveitu. Eftirfarandi jafna gildir fyrir SSO:

$$SSO = \frac{\sum T_i P_i}{P_{max}} \quad [\text{mínútur}]$$

þar sem:

$$T_i = \text{Tímalengd skerðingartilviks } i \text{ [klst.]}$$

$$P_i = \text{Aflskerðing í skerðingartilviki } i \text{ [MW]}$$

$$P_{max} = \text{Klukkustundarhámarksálag orkuöflunarveitu [MW]}$$

5. Stuðull um meðalskerðingu álags (SMA): Mælikvarði á meðalskerðingu hvernar truflunar sem er fundinn með eftirfarandi jöfnu:

$$SMA = \frac{\sum_{i=1}^N P_i}{N} \quad [\text{MW/truflun}]$$

Þar sem:

$$P_i = \text{Aflskerðing í skerðingartilviki } i \text{ [MW]}$$

$$N = \text{Fjöldi truflana}$$

6. Áreiðanleikastuðull (AS): Stuðull sem sýnir áreiðanleika kerfis sem hlutfall straumleysisminútna (reiknaðar yfir á klukkustundir) og fjölda klukkustunda ársins.

$$AS = \frac{8.760 - (SMS \text{ í klst.})}{8.760} \quad [-]$$

Í hlaupaári er fjöldi klukkustunda 8.784 í stað 8.760.

Flutningsfyrirtækið skal setja sér markmið hvað varðar þessa stuðla og þarf Orkustofnun að veita samþykki sitt fyrir þeim. Komi upp tilvik þar sem stuðlar eru utan skilgreindra

## 5.1 Bakgrunnur: Skilgreiningar á afhendingaröryggi

---

marka á flutningsfyrirtækið að senda skýrslu til Orkustofnunar með upplýsingar um tilvik og aðgerðir til endurbóta.

Flutningsfyrirtækinu er þó heimilt að rjúfa afhendingu raforku til viðskiptavinar vegna nauðsynlegra breytinga, viðhalds, bilanaleitar og lagfæringa. Rof í slíkum tilgangi telst ekki vera skert afhendingaröryggi.

### 5.1.1 Helstu áhrifaþættir á afhendingaröryggi

Út frá hinum skilgreindu stuðlum sem notaðir eru við mat á afhendingaröryggi íslenska flutningskerfisins, má sjá að allir mælikvarðarnir miðast út frá umfangi orkuskerðingar í kjölfar fyrirvaralausrar truflunar.

Umfang orkuskerðingar ræðst af þeim áhrifum sem truflunin hefur á rekstur kerfisins og gæti verið eftirfarandi:

- Stök truflun loki á flutningsleið raforku inn á álagssvæði tilheyrandi svæðisbundinni orkuskerðingu (ef raforkuframleiðslugeta innan svæðisins er ekki næganleg til að mæta eftirspurninni).
- Truflun valdi stöðugleikavandamáli sem leiði til umfangsmikils straumleysis og getur haft áhrif á stóran hluta kerfisins.

Til að koma í veg fyrir orkuskerðingu í kjölfar þess að truflun loki á flutningsleið inn á álagssvæði er oft vísað til þess að svokölluð N-1 skilyrði þurfi að uppfylla. N-1 vísar til þess að afhendingaröryggi ætti að vera slíkt að ein eining geti fallið úr rekstri tímabundið án þess að straumleysi eigi sér stað. Til þess að tryggja að N-1 skilyrði séu uppfyllt, þarf annað hvort að vera næganleg framleiðslugeta innan svæðisins til þess að mæta álaginu eða tryggja þarf að hægt sé að flytja orku inn á svæðið eftir tveimur leiðum hið minnsta. Sé það gert, þá ætti truflun innan stakrar línu ekki leiða til þess að það lokist fyrir flutningsleið raforku inn á svæðið.

N-1 hugtakið er ekki eingöngu notað yfir hættuna á að flutningsleið raforku inn á tiltekið svæði lokist af í kjölfar útleysingar flutningslínu. Hugtakið er einnig notað við athugun á stöðugleikaskilyrðum. Þar er markmið að að hver og ein eining (flutningslína, rafali, spennir, o.s.frv.) ætti að geta fallið úr rekstri án þess að meginraforkukerfið (e. bulk power system) verði óstöðugt. Orsökina fyrir kerfisstöðugleikanum eru sjaldnast vegna þess að það lokist fyrir flutningsleið inn á eitthvert álagssvæði, heldur frekar vegna þess að truflunin hafi valdið veikingu flutningskerfisins, þannig að flöskuhálsar myndist gagnvart flutningi frá framleiðslusvæðum að öðrum hlutum kerfisins.

Til þess að meta hver áhrif notkun jarðstrengja við styrkingu flutningskerfisins hefði á

## Kafli 5. Áhrif jarðstrengja á afhendingaröryggi íslenska flutningskerfisins

---

afhendingaröryggi, er viðeigandi að bera saman bilanatíðni og útitíma loftlína og jarðstrengja, og meta áhrif þessara mismunandi lausna á kerfisstöðugleika.

### 5.1.2 Bilanatíðni og útitími loftlína og jarðstrengja

Bilanir í loftlínunum skiptast í meginatriðum í tvo hópa; annars vegar bilanir sem eru viðvarandi og þarfnast viðgerðar til þess að komast aftur í rekstur, hins vegar bilanir sem ganga yfir við rof á línu (til dæmis vegna skammhlaups af völdum línusláttis í miklum vindi eða eldinga). Sé sjálfvirkri endurlokun beitt í seinna tilvikinu má í flestum tilvikum koma rofinni línu aftur í rekstur í yfir 80% tilvika [25, 26]. Komist lína ekki í rekstur eftir sjálfvirka endurlokun, eru viðgerðarteymi ræst út til lagfæringar á línunni. Yfirleitt er auðvelt að staðsetja bilanir á loftlínunum og því er viðgerðatími stuttur.

Í [27] er vísað til tölfraði frá rekstri Landsnets á 220kV línunum fyrir yfir tíu ára tímabil fyrir útgáfu skýrslunnar í febrúar 2017. Á tímabilinu átti sér stað 31 bilun á 220kV loftlínunum eða um 0,37 bilanir á hverja 100km á ári. Jafnframt kemur fram að meðallengd bilunar var 297 mínútur, eða tæpir 5 klukkutímar. Af þessum 31 bilunum voru sex bilanir sem stóðu skemur en þrjár mínútur og fjórar bilanir stóðu lengur en hálfan sólahring. Út frá þessum tölum má sjá að meðalútitími 220kV loftlína voru rétt tæpir 2 tímar á ári fyrir hverja 100km.

Bilanir í strengjum eru nær eingöngu viðvarandi, þar sem þörf er á að ræsa út viðgerðarteymi til þess að koma strengnum aftur í rekstur. Tímafrekt getur verið að finna bilun og eftir það þarf að grafa niður á strenginn og koma upp viðgerðaraðstöðu áður en viðgerðin getur hafist. Algengt er að viðgerðatími jarðstrengja á hærri spennu sé um 2-4 vikur samkvæmt danska flutningsfyrirtækinu Energinet [11]. Sé miðað við tölur frá samtökum evrópska flutningafyrirtækja (ENTSO-E) er meðal viðgerðatími 220kV jarðstrengja 3-4 vikur.

Bilanir í jarðstrengskerfum oft á tíðum raktar til samsetninga og endatenginga, en einnig verða bilanir innan strengsins. Vinnuhópur á vegum CIGRE [28] framkvæmdi árið 2007 mat á bilanatíðni jarðstrengjakerfa, þar sem bilanalíkur strengs, samsetninga og endabúnaðar var metinn og voru niðurstöðurnar fyrir 220 – 500kV strengi eftirfarandi:

Strengur:	0,133	[bilanir/ár/100km]
Samsetning:	0,048	[bilanir/ár/100 ein.]
Endabúnaður:	0,050	[bilanir/ár/100 ein.]

Sé miðað við reynslutölur norrænna flutningafyrirtækja sem ENTSO-E heldur utan um [29], þá eru bilanalíkur 220 – 330kV strengja (nær yfir streng, samsetningar og endabúnað) 0,71 bilanir/ár/100km reiknað út frá tímabilinu 2008-2017. Sé aðeins miðað við árið 2017 var bilanatíðnin 0,23 bilanir/ár/100km (byggt á einni bilun í samtals 433km af 220 – 330kV

## 5.1 Bakgrunnur: Skilgreiningar á afhendingaröryggi

---

jarðstrengjum á Norðurlöndunum).

Út frá þessum reynslutölum yfir 10 ára tímabil um bilanalíkur á ári á hverja 100km og ofangreindan viðgerðatíma jarðstrengja fæst að meðal útitími sé á bilinu 230 til 480 klukkustundir á ári fyrir hverja 100km. Eins og með alla tölfræði, ber að taka slíkum útreikningum með nokkurri varúð. Væri notast við reynslutölur ársins 2017 eingöngu, væri útitíminn um 80-150 klukkutímar.

Ljóst má þó vera að mikill munur er á útitíma jarðstrengja og loftlína. Helsta ástæða þess er beiting sjálfvirkrar endurlokunar loftlína. Hátt hlutfall truflana loftlína í rekstri vegna veðurfars og er aðeins lítill hluti þeirra viðvarandi bilun sem þarfnast viðgerðar. Sjálfvirk eða skjót endurlokun kemur línu að jafnaði aftur í rekstur í stórum hluta tilvika.

Þegar lagður er jarðstrengskaffi innan flutningslínu, er áhættusamt að beita endurlokun. Ef bilun hefur orðið í streng og sjálfvirk endurlokun setur línuna aftur inn, getur skammhlaupsstraumurinn valdið frekari skemmdum á strengnum eða skemmt endabúnaðinn. Í slíkum tilvikum þarf að meta hvort kosið sé að beita sjálfvirkri endurlokun með tilheyrandi áhættu á skemmdum innan jarðstrengskaflans, eða sleppa henni með tilheyrandi aukningu í útitíma loftlínuhluta línunnar.

### 5.1.3 Stöðugleiki

Kerfisstöðugleiki ræðst af eðlisfræðilegum eiginleikum kerfisins, þar sem einn megin þátturinn snýr af því hversu mikið afl sé hægt að flytja frá framleiðslusvæðum að álagssvæðum. Sé kerfið rekið of nálægt slíkum mörkum (sem eru kvik í eðli sínu, breytileg eftir kerfisálagi og álagsmynstri) er hætta á að truflanir innan kerfisins geti valdið stöðugleikavandamálum sem í versta falli geti leitt til kerfishruns.

Í daglegum rekstri flutningskerfa er reynt að komast hjá stöðugleikavandamálum með því að fylgjast með aflflæði í gegnum mismunandi snið í kerfinu og tryggja að þau fari ekki yfir fyrirfram skilgreind flutningsmörk. Þessi flutningsmörk eru fundin út frá umfangsmiklum kerfisgreiningum og reynslu kerfisstjórnanda af rekstri kerfisins við krefjandi aðstæður. Við ákvörðun slíkra marka vegur reynsla og þekking kerfisstjórnanda þungt á eiginleikum kerfisins með tilliti til lang- og skammtíma breytinga í álagsmynstri, og eftir hvaða leiðum raforkan flyst innan flutningskerfisins. Með því að halda sig innan fundinna marka, er hægt að reka kerfið með góðri vissu um að stök truflun valdi ekki kerfislægu stöðugleikavandamáli. Til þess að tryggja að kerfið sé rekið innan flutningsmarkanna er stundum gripið til skerðingar á orkuafhendingu með tilheyrandi kostnaði.

## **5.2 Áhrif af notkunar jarðstrengja við styrkingu íslenska flutningskerfisins á afhendingaröryggi**

Til þess að meta áhrif notkunar 220kV jarðstrengskafla við styrkingu íslenska flutningskerfisins á afhendingaröryggi raforku, þarf að varpa ljósi á hver er munur jarðstrengja og loftlína með tilliti til áhrifa á:

- Bilanatíðni og útitíma
- Kerfisstöðugleika

Hvað varðar áhrif á bilanatíðni, þá valda hinar miklu takmarkanir fyrir notkun jarðstrengja til styrkingar flutningskerfisins því að áhrif jarðstrengjanna væru afar takmörkuð. Almennt eru hámarks lengdir stakra strengkafla innan línuleiða ekki nægjanlegar til að komast alfarið hjá verstu veðrasvæðunum, þar sem ávinningur af jarðstreng væri hvað mestur með tilliti til lækkunar á bilanatíðni. Raunar mætti leiða líkur að því að ekki þætti fýsilegur kostur að þurfa koma fyrir tengivirki fyrir útjöfnunarspólu jarðstrengs innan svæðis sem veðurálag er mikið, með miklum ísingum og snjóalögum.

Nýting jarðstrengskafla mun hafa neikvæð áhrif á útitíma flutningslínu sem samanstendur af loftlínu- og jarðstrengskafla borið saman við flutningslínu þar sem aðeins er notast við loftlínu. Áhrifin verða enn frekar neikvæð ef horfið er frá því að beita sjálfvirkri endurlokun vegna jarðstrengskaflans. Þá myndi útitími vegna bilana á loftlínuhlutanum aukast mikið. Sé ákveðið að beita sjálfvirkri endurlokun, þrátt fyrir áhættu á frekari skemmdum væri bilun staðsett innan strengkaflans, má áætla að áhrif strengkaflans væri mun takmarkaðri á útitíma, sérstaklega ef haft er í huga að um það bil 5% línuleiðarinnar væri í jörðu og því mestar líkur á að bilun eigi sér stað í loftlínuhluta flutningslínunnar sem hefur lágan útitíma.

Varðandi áhrif á kerfisstöðugleika, þá fæst aukinn kerfisstöðugleiki fyrst og fremst með styrkingu flutningskerfisins og skiptir þar engu hvort við slíka styrkingu sé notast við jarðstrengjakafla af takmarkaðri lengd eða loftlínur.

Af ofangreindu má draga þá niðurstöðu að það hafi óveruleg áhrif á afhendingaröryggi ef notast er við stutta jarðstrengskafla (í samræmi við fundnar hámarks lengdir jarðstrengja í kafla 4) við styrkingu flutningskerfisins samanbórið við samskonar styrkingu kerfisins þar sem eingöngu er notast við loftlínur. Helstu munurinn lægi í neikvæðum áhrifum jarðstrengskafla á útitíma flutningslína. Áhrif hærri útitíma fyrirhugaðarar flutningslínu á afhendingaöryggi væri þó hverfandi, ef tilkoma flutningslínunnar verður til þess að hægt sé að uppfylla N-1 skilyrðið. Það væri sjálf styrking flutningskerfisins sem hefði mest áhrif

## **5.2 Áhrif af notkunar jarðstrengja við styrkingu íslenska flutningskerfisins á afhendingaröryggi**

---

til aukins afhendingaröryggis og kerfisstöðugleika.

## **Kafli 5. Áhrif jarðstrengja á afhendingaröryggi íslenska flutningskerfisins**

---



# Kafi 6

## Áhrif notkunar jarðstrengja við styrkingu flutningskerfisins á raforkuverð

---

Í þessum kafla er leitast við að meta þau áhrif sem notkun jarðstrengja við styrkingu íslenska flutningskerfisins hefði á raforkuverð borið saman við tilfelli þar sem eingöngu væri notast við loftlínur. Notast verður við fyrri niðurstöður frá kafla 4 um að hlutfall jarðstrengja við uppbyggingu 220kV kerfis geti að hámarki verið 5% af heildar lín lengd nýrra flutningslína.

### 6.1 Verðmyndun og raforkuverð

Með setningu raforkulaga nr. 65/2003 [30] var starfsemi innan raforkukerfisins skipt niður í fjóra aðskilda þætti:

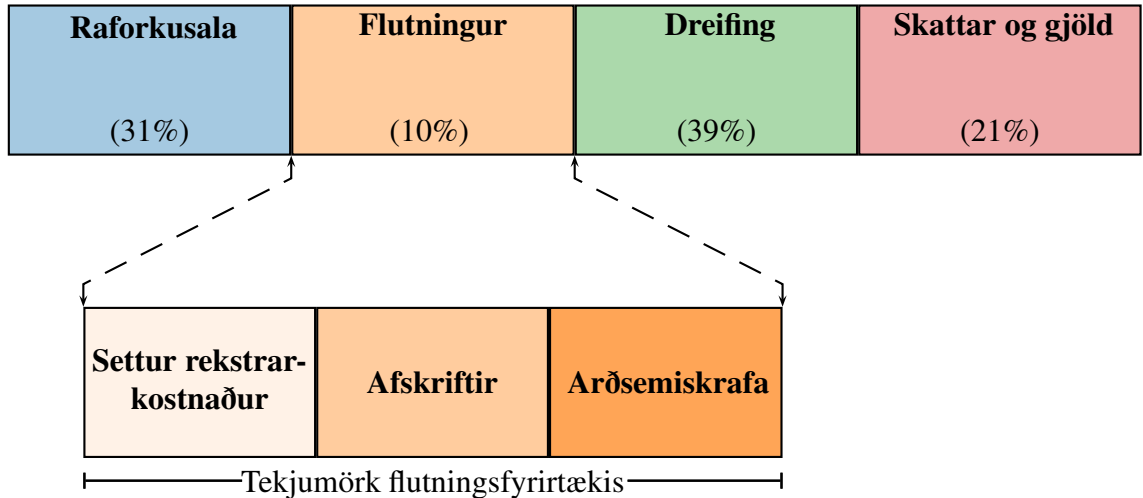
- Raforkuvinnsla
- Flutning raforku
- Dreifingu raforku
- Raforkuviðskipti

Með lögnum voru raforkuvinnsla og sala á raforku gefin frjáls en flutningur og dreifing raforku sérleyfis skyld. Landsnet er eini sérleyfishafi fyrir flutning raforku á meðan dreifing raforku er sinnt af sex veitufyrirtækjum. Ekki er gerð krafa um að vinnsla og sala raforku séu aðgreind og því algengt að fyrirtæki sinni báðum þessum þáttum. Þó eru einnig fyrirtæki sem einungis sinna öðrum þessara þátta.

Út frá þessu fyrirkomulagi má sundurliða það raforkuverð sem almennir notendur greiða í flutning, dreifingu og sölu raforku ásamt sköttum og gjöldum. Stórnotendur sem tengjast inn á flutningskerfið greiða ekki fyrir dreifingu. Á mynd 6.1 er að finna myndræna framsetningu á þeim þáttum sem mynda raforkuverð almennra notenda. Til viðmiðunar er einnig að finna upplýsingar um umfang hvers þáttar á dæmigerðum raforkureikningi heimila 2017 samkvæmt skýrslu um orkuverð á Íslandi 2005-2017 [31].

## Kaflí 6. Áhrif notkunar jarðstrengja við styrkingu flutningskerfisins á raforkuverð

Sundurliðun raforkureiknings almennra notenda



**Mynd 6.1:** Myndræn framsetning á raforkureikning almennra notenda með nánari útlistun á þeim þáttum er mynda tekjumörk flutningsfyrirtækisins. Gjaldskrá flutningsfyrirtækisins er ákveðin út frá settum tekjumörkum. Sýnd eru dæmigerð hlutföll hvers þáttar raforkureiknings heimilis 2017 [31].

Verðbreytingar raforkuverðs vegna styrkinga flutningkerfisins kæmu fram í þeim þætti reikningsins er snýr að flutningi raforku. Gjaldskrá vegna flutnings á raforku er ákvörðuð út frá settum tekjumörkum sem Orkustofnun setur flutningsfyrirtækinu.

### 6.2 Tekjumörk flutningsfyrirtækisins

Þar sem flutningur og dreifing raforku er sérleyfis skyld starfsemi býr hún ekki við það aðhald sem markaðssamkeppni veitir. Þess í stað eru verðlagning, rekstrarkostnaður og fjárfesting undir eftirliti Orkustofnunar með það að markmiði að flutningur raforku sé eins þjóðhagslega hagkvæmur og mögulegt er. Orkustofnun setur flutningsfyrirtækinu tekjumörk sem hafa það að markmiði að hvetja til hagræðingar í rekstri og tryggja að tekjur þess séu í samræmi við kostnað þeirrar þjónustu sem fyrirtækið á að veita. Flutningsfyrirtækið ákveður gjaldskrá sína í samræmi við sett tekjumörk. Raforkulög kveða á um að fyrirtækinu beri að stilla af gjaldskrár þannig að félagið skili eigi meiri tekjum en settum tekjumörkum.

Tekjumörkin eru tvískipt; annars vegar vegna flutnings á raforku til dreifiveitna og hins

### 6.3 Áhrif nýtingu jarðstrengja á tekjumörk

vegar vegna flutnings til stórnotenda. Tekjumörkin eru ákveðin fyrirfram til fimm ára í senn og endurskoðuð árlega af Orkustofnun. Samkvæmt raforkulögum eru tekjumörk ákveðin út frá eftirfarandi viðmiðum:

**Rekstrarkostnaði** tengdum flutningsstarfsemi fyrirtækisins, svo sem viðhaldskostnaði, leigukostnaði vegna flutningsvirkja, kerfisstjórnunarkostnaði og almennum rekstrarkostnaði. Flutningstöp eru einnig innifalin í rekstrarkostnaði.

**Arðsemi** flutningsfyrirtækisins af flutningsstarfseminni, en hún skal vera sem næst vegnum fjármagnskostnaði.

**Afskriftum** fastafjármuna. Afskriftartími fasteigna og háspennulína er 50 ár, tengivirki afskrifast á 40 árum, að undanskildum hjálparbúnaði sem afskrifast á 20 árum.

**Sköttum**, tekjuskattur í samræmi við félagaform flutningsfyrirtækisins

Nánari útlistun á tekjumörkum flutningsfyrirtækisins er að finna í reglugerð 192/2016 [32], þar sem eftirfarandi formúlu er að finna:

$$M = K + F + \frac{WACC \cdot A}{1 - T_s} \quad (6.1)$$

Þar sem:

- $M$  = Fjárhæð tekjumarka
- $K$  = Settur rekstrarkostnaður
- $F$  = Afskriftir fastafjármuna
- $A$  = Brúttóeignagrunnur, það er bókfært virði fastafjármuna auk 20% af tekjumörkum síðasta árs
- $T_s$  = Tekjuskattshlutfall
- $WACC$  = Veginn fjármagnskostnaður

Eignastofninn er hinn ráðandi þáttur til tekjumarka, en um 80% tekjumarka fyrir stórnotendur og 70% tekjumarka fyrir dreifiveitur má rekja til hans sé horft til ársins 2019 [21]. Í heildina nemur framlag eignastofns til tekjumarka um 75%.

### 6.3 Áhrif nýtingu jarðstrengja á tekjumörk

Til þess að meta áhrif þess að nýta jarðstrengskafla við styrkingu á íslenska flutningskerfinu á raforkuverð, liggur beinast við að meta hver áhrifin yrðu á sett tekjumörk Landsnets. Út frá jöfnu 6.1 má sjá að áhrif jarðstrengja á tekjumörkin væru fyrst og fremst vegna stækkunnar á eignagrunni en mögulega geta áhrif jarðstrengja á flutningstöp, sem er partur af rekstrarkostnaði, haft einhver áhrif.

## Kafla 6. Áhrif notkunar jarðstrengja við styrkingu flutningskerfisins á raforkuverð

### 6.3.1 Áhrif jarðstrengskafila á flutningstöp

Við hönnun háspenntra jarðstrengja er lögð mikil áhersla á að takamarka orkutöp strengjanna svo að unnt verði að halda hitamyndun innan ásættanlegra marka. Töp í flutningslínunum eru mestmegnis vegna straums  $I$  sem fer í gegnum leiðara með viðnámi  $R$ , og eru töpin fundin sem margfeldi straumsins í öðru veldi og viðnám leiðarans ( $P_t = I^2 \cdot R$ ). Til að takmarka flutningstöp jarðstrengja, er þverskurðarflatamál jarðstrengja stærra en sambærilegra loftlína til að lækka viðnám strengjanna.

Sé miðað við að  $220kV$  jarðstrengur eigi að hafa sambærilega flutningsgetu og tilsvarendi loftlína má reikna með að mótstaða loftlínunnar sé um það bil tvisvar til þrisvar sinnum hærri end mótstaða jarðstrengs af sömu lengd.

Lægri mótstaða jarðstrengskafila veldur því að  $I^2R$  töpin eru lægri á hvern kílómetur en í sambærilegum loftlínukafila við sama straum. Aftur á móti framleiðir jarðstrengskafillinn margfalt hærri rýmdarstraum en tilsvarendi loftlínukafli (getur orðið allt að 25 faldur ef notast er við tvöfalt strengsett og 50% útjöfnun). Þessi straumur fer um loftlínuhlutann og veldur auknum töpum á línuleiðinni ef álagið er lágt. Við hátt álag getur rýmdarstrauminn vegið upp spanstrauma og leitt til minnkunar á heildarstraumi. Við það tilfelli gæti jarðstrengskafillinn haft áhrif til minnkunar á flutningstöpunum.

Til þess að meta hvort heildaráhrif jarðstrengskafila í íslenska flutningskerfinu hefðu jákvæð eða neikvæð áhrif á flutningstöpin þyrfti að fara út í nákvæmari greiningu sem tæki mið af álagsmynstri línunar í rekstri. Þar sem greiningin í kafla 4 sýndi fram á að hámarks lengdir mögulegra jarðstrengskafila innan íslenska flutningskerfisins eru mjög takmarkaðar, má leiða líkur að því að áhrif svo stuttra strengkafila verði óveruleg á heildar flutningstöp kerfisins og verður því litið fram hjá þessum þætti hér á eftir.

### 6.3.2 Áhrif notkun jarðstrengja á eignastofn

Eignastofninn er sá þáttur sem hefur mest áhrif á tekjumörk flutningsfyrirtækisins. Til að bera saman áhrif notkunar jarðstrengjakafila í stað loftlína á eignastofn flutningsfyrirtækisins, þarf upplýsingar um kostnaðarhlutfall milli lagningar jarðstrengja og loftlína við íslenskar aðstæður.

Í nýlegu kostnaðarmati á mismunandi valkostum vegna fyrirhugaðar lagningu  $220kV$  Suðurnesjalínu 2 [33] eru meðal annars bornir saman valkostir þar sem jarðstrengur er lagður alla línuleiðina, loftlína alla leiðina (að undanskildum  $300m$  kaffa) eða blandaðir valkostir með mislögum jarðstrengjaköflum. Við kostnaðarmatið var notast við gögn frá nýlegum framkvæmdum á Íslandi og kostnaðarupplýsingum erlendis frá:

- Kostnaðarmat á loftlínuframkvæmdum var byggt á rauntölum frá nýlegum fram-

## 6.3 Áhrif nýtingu jarðstrengja á tekjumörk

kvæmdum og fyrri tilboðum sem bárust í framkvæmd Suðurnesjalínu 2 á árinu 2015.

- Kostnaðarmat jarðstrengshluta var byggt á reynslutölum úr nýlegum jarðstrengja-verkefnum á Íslandi auk upplýsinga frá danska flutningsfyrirtækinu Energinet og erlendum strengframleiðendum. Almennt má segja að verð á 220kV jarðstrengjum hafi lækkað umtalsvert á undanförunum áratug, mest á árunum 2010-2015. Innkaupa-verð strengsins í kostnaðarmatinu er sambærilegt því sem Energinet fékk í nýleg verk (verkin *Kriegers Flak* 2015 og *Horns Rev 3* 2014).

Varðandi afskriftatíma var miðað við leiðbeiningar Orkustofnunar um afskriftareglur. Flestir framleiðendur jarðstrengja ráðleggja að líftíminn sé áætlaður 40 ár þó svo að dæmi sé um framleiðendur sem telji að búast megi við lengri líftíma. Þó skortir enn rekstrarreynslu á nýjustu gerðir jarðstrengja þessu til staðfestingar. Reynsla, bæði innanlands og erlendis, bendir til þess að líftími loftlína með eðlilegu viðhaldi sé mun lengri en afskriftaviðmið Orkustofnunar. Þrátt fyrir það, var miðað við að bæði loftlínu- og jarðstrengshlutar valkostanna væru að fullu afskrifaðir á 50 árum (í samræmi við afkriftaráðleggingar Orkustofnunar) þó svo að það stangist á við ráðleggingar jarðstrengjaframleiðenda.

Með samanburði á kostnaðarmati þeirra valkosta þar sem annars vegar var eingöngu notast við jarðstreng alla línuleiðina og hins vegar þar sem nær öll línun var lögð sem loftlína fékkst sú niðurstaða að lagning jarðstrengja væri allt frá 1.7 til 2.3 dýrari en sambærileg loftlínulagning.

Sé því viðmiði beitt að lagning jarðstrengja sé um það bil tvisvar sinnum dýrari en lagning loftlína við íslenskar aðstæður, má áætla að allsherjar styrking flutningskerfis raforku með nýjum 220kV línun, þar sem að hámarki 5% séu lögð í jörðu, sé um 105% af kostnaði við kerfisstyrkingar þar sem eingöngu er notast við loftlínur.

Eins og fyrr segir er eignastofninn sá þáttur sem hefur mest áhrif á tekjumörk flutningsfyrirtækisins. Því skiptir einnig máli hvert vægi nýrra 220kV styrkinga er í eignastofninum. Sé miðað við að vægi nýrra 220kV framkvæmda til styrkingar flutningskerfisins muni vera 25 – 50% af uppfærðum eignastofni, leiðir notkun jarðstrengskafla í stað loftlína við kerfisstyrkingu til 1,3 – 2,5% hækkunar eignastofns.

### 6.3.3 Áhrif á tekjumörk og raforkuverð almennra notenda

Miðað við að framlag eignastofns til tekjumarka sé um  $3/4$  hlutar má áætla að tekjumörkin væru 1 – 2% hærrí ef 5% nýrra 220kV væri í jörðu borið saman við tilfelli þar sem notast væri eingöngu við 220kV loftlínur.

Á raforkureikningi almennra notenda telur flutningur raforku um það bil 10%, má því áætla að áhrif hækkunar tekjumarka á raforkuverðs til almennings væri um það bil 0,1 –

## **Kaflí 6. Áhrif notkunar jarðstrengja við styrkingu flutningskerfisins á raforkuverð**

0,2% vegna nýtingar jarðstrengja við uppbyggingu flutningskerfi raforku samanborið við tilfellið þegar aðeins er notast við loftlínukostinn.

Hin takmörkuðu áhrif sem nýting jarðstrengja við styrkingu flutningskerfis raforku hefur á raforkuverð er fyrst og fremst vegna hinna miklu lengdatakmarka möglegra jarðstrengjakafli sem ákvörðuð voru í kafla 4.

## Umhverfiskostnaður og jarðstrengir

---

Í þessum kafla er að finna umfjöllun um þau áhrif sem notkun jarðstrengja við styrkingu íslenska flutningskerfisins hefði á umhverfiskostnað borið saman við tilfelli þar sem eingöngu væri notast við loftlínur. Byrjað verður á stuttri umfjöllun um helstu umhverfisáhrif loftlína og jarðstrengja, þar á eftir fylgir umfjöllun um rannsóknaverkefni sem miða að þróun aðferðafræði til mats á umhverfiskostnaði sjónrænna áhrifa flutningslína og að endingu er sú umfjöllun sett í samhengi við fyrri niðurstöður um hámarks lengdir jarðstrengja við styrkingu íslenska kerfisins.

### 7.1 Umhverfisáhrif loftlína og jarðstrengja

Í nýlegum skýrslum um mat á umhverfisáhrifum fyrirhugaðra framkvæmda er að finna greinagóða lýsingu á mismunandi umhverfisáhrifum loftlína og jarðstrengja [34, 35].

Flutningslínur hafa í för með sér rask á umhverfi hvort sem er notast við jarðstrengi eða loftlínur við lagningu þeirra. Sjónræn áhrif loftlína felast í sýnileika mastra og leiðara, en einnig vegslóða og malarplani sem fylgir öllum mastrastæðum. Leiðarar og möstur geta verið sýnileg um langan veg frá vegum, byggð og útivistarsvæðum. Loftlínur geta haft áhrif á fugla, gróður og fornleifar, og helgunarsvæði loftlína getur einnig haft neikvæð áhrif á landnotkun. Einnig geta loftlínur haft neikvæð áhrif á hljóðvist í nálægð við byggð.

Lagning jarðstrengja hefur í för með sér jarðrask en í flestum tilvikum minnka sjónræn áhrif þeirra með tímanum. Jarðvegsaðstæður ráða mestu um hversu vel gengur að græða upp skurðstæðið og hylja ummerki framkvæmdarinnar. Skiptir máli hvort um er að ræða ósnortið land, ræktað land eða nútíma hraun. Við lagningu jarðstrengja þarf að leggja vegslóða meðfram skurði sé jarðvegur ekki burðarhæfur. Rasksvæði við lagningu eins 220kV strengsetts er um 8 – 14m á breidd og um 12 – 20m við lagningu tvöfalda strengsetts.

Ofangreind umhverfisáhrif loftlína og jarðstrengja eru meðal þeirra atriða sem litið er til þegar reynt er að meta umhverfiskostnað af lagningu nýrra flutningslína.

### 7.2 Yfirlit aðferða við mat á umhverfiskostnaði

Í ríkjum innan Evrópu, Bandaríkjanna og Kanada er oft litið til umhverfiskostnaðar við mat og undirbúning verkefna sem koma til með að hafa áhrif á náttúru. OECD hefur talað

## Kaffi 7. Umhverfiskostnaður og jarðstrengir

---

fyrir því að verðgildi náttúru sem tapast við nýtingu (eða umhverfiskostnaður) sé fellt inn í ákvarðanatöku og staðið fyrir umfangsmikilli samantekt yfir aðferðir sem beita má til að taka tillit til umhverfiskostnaðar í kostnaðar og ábatagreiningu [36].

Þó svo að ekki sé litið til umhverfiskostnaðar við ákvarðanatöku um verkefni tengdum uppbyggingu raforkuinnviða á Íslandi, hefur verið unnið að rannsóknar- og nemenda-verkefnum innan háskólaumhverfisins þar sem verið er að fíkra sig áfram með notkun aðferða til hagræns mats á umhverfisáhrifum við íslenskar aðstæður. Sérfræðingar á vegum Háskóla Íslands unnu skýrslu [37] fyrir umhverfis- og auðlindaráðuneytið í tengslum við bráðabirgðaákvæði í lögum um verndar- og orkunýtingaráætlun nr. 48/2011 (rammaáætlun), þar sem getið er að ráðherra skuli skipa vinnuhóp til að skoða og gera tillögu um aðferðafræði við að meta verðgildi náttúrunnar.

Í skýrslunni er meðal annars tekið saman yfirlit yfir mismunandi aðferðir og nálganir til hagræns mats á náttúrugæðum sem ekki ganga kaupum og sölum á markaði. Þó að viss náttúrugæði séu ekki á markaði þýðir það ekki að þau séu einskis virði heldur aðeins að ekki sé hægt að styðjast við markaðsverð til leiðsagnar um hagkvæmustu nýtingu þeirra. Meðal þeirra aðferða sem notaðar hafa verið við hagrænt mat á náttúrugæðum er svonefnt skilyrt verðmætamat sem þykir henta vel til verðmats á sjónrænum áhrifum flutningslína. Hið skilyrta verðmætamat er framkvæmt með spurningakönnun þar sem greiðsluvilji almennings gagnvart sjónrænum áhrifum framkvæmda er kannaður miðað við mismunandi landslag og aðstæður.

Í meistaraverkefni í umhverfisfræði við Háskóla Íslands [38] var skilyrtu verðmætamati beitt til að kanna greiðsluvilja almennings gagnvart sjónrænum áhrifum Búrfellslínu 2 á þremur mismunandi svæðum á Suðurlandi. Framkvæmd var spurningakönnun þar sem þátttakendum voru sýndar myndir af stuttum köflum þar annars vegar flutningslínan var á myndinni og hinsvegar þar sem línan hafði verið máð í burtu af myndinni. Þátttakendur svöruðu spurningum hvort og hversu mikið þeir væru reiðubúnir að greiða fyrir að sjá ekki lengur flutningslínuna. Greiðsluvilji úrtaksins var breytilegur eftir búsetu, mestur á meðal íbúa Hveragerðis. Að sama skapi var greiðsluvilji mestur fyrir mildun sjónrænna áhrifa á svæðinu næst Hveragerði, en lægstur fyrir Hellisheiðina.

Hagfræðistofnun Háskóla Íslands vinnur að verkefni í samvinnu við Landsnet sem miðar að því að þróa heildstæða nálgun fyrir framkvæmd hagræns umhverfismats í tengslum við lagningu flutningslína við íslenskar aðstæður. Markmiðið er að þróa aðferðir þar sem hægt er að meta umhverfiskostnað út frá því umhverfi sem fyrirhuguð flutningslína fer um í stað þess að þurfa að framkvæma tímafreka spurningakönnun meðal slembiúrtaks fyrir hverja nýja flutningslínu sem fyrirhuguð er. Slík aðferðafræði ætti að gagnast á fyrri stigum hönnunarferlisins þar sem mögulegt væri að notast við umhverfiskostnað sem einn



### 7.3 Áhrif jarðstrengskafla á umhverfiskostnað

Þeirra þátta sem litið er til við val á mögulegum línuleiðum. Þegar þessi orð eru rituð, er verkefnið ekki næganlega langt á veg komið til þess að fræðigreinar eða skýrslur hafi verið gefnar út um viðfangsefni og niðurstöður verkefnisins.

Erlendis er að finna nokkur dæmi um verkefni þar leitast er við að meta umhverfiskostnað flutningslína. Breska flutningsfyrirtækið „National Grid” birti niðurstöður rannsókna á greiðsluvilja almennra raforkunotenda gagnvart aðgerðum til mildunar á sjónrænum áhrifum loftlína á Englandi, Wales og Skotlandi [39]. Meginmarkmið rannsókna var að kanna greiðsluvilja almennings gangvart aðgerðum sem miða að því að milda sjónræn áhrif flutningsmannvirkja sem eru staðsett innan þjóðgarða og annarra svæða með sérstæða náttúru og ásýnd. Sjónræn áhrif flutningslínanna voru metin út frá skilyrtu verðmætamati sem framkvæmt var með spurningakönnun, stillt var upp mismunandi lausnum til mildunar sjónrænna áhrifa, og einnig mismunandi lengdum flutningslínukafla þar sem þessum lausnum er beitt. Mestur var greiðsluvilji almennings fyrir notkun jarðstrengja til mildunar sjónrænna áhrifa af löngum línuköflum (50 mílur eða lengri) sem staðsettir voru innan þjóðgarða og annarra svæða með sérstæða náttúru og ásýnd. Var greiðsluviljinn í þessu tilviki um 20 pund árlega á hverju heimili yfir 8 ára tímabil.

Heimild [40] greinir frá norskri rannsókn sem miðaði einnig að því að meta greiðsluvilja íbúa gangvart mildunar sjónrænna áhrifa flutningslínu innan Abildsø hverfisins í Oslo. Fyrirhugað var að skipta út eldri flutningslínu fyrir nýja og stærri 132kV flutningslínu á 5km línuleið og var vilji fyrir því hjá flutningsfyrirtækinu að leggja línurnar í jörðu ef íbúar svæðisins væru viljugir til að greiða fyrir það. Niðurstöður rannsókna sýndu fram á jákvæðan greiðsluvilja íbúa fyrir lagningu línunnar í jörðu, mestan á meðal þeirra sem bjuggu næst flutningslínunni. Út frá fengnum niðurstöðum um greiðsluvilja íbúa hverfisins, var samfélagslegur ábati þess að leggja alla 5km línuleiðarinnar í jörðu metinn um þrisvar sinnum meiri en sá kostnaður sem því fylgir að leggja jarðstrenginn.

### 7.3 Áhrif jarðstrengskafla á umhverfiskostnað

Sem fyrr í þessu verkefni eru áhrif notkunar jarðstrengja við styrkingu íslenska flutningskerfisins metin í samanburði við tilfelli þar sem samskonar kerfisstyrking færi fram þar sem eingöngu væri notast við loftlínur. Niðurstöður greininganna í kafla 4 á hámarkslengdum jarðstrengskafla við styrkingu 220kV flutningskerfis benda til þess að ekki sé raunhæft að leggja meira en 5% nýrra flutningslína í jörðu. Að auki kom í ljós að hámarkslengdir strengkafla eru breytilegar eftir staðsetningu flutningslínunnar innan flutningskerfisins og einnig staðsetningu jarðstrengskafla innan tiltekinnar flutningslínu.

Ef taka á tillit til umhverfiskostnaðar í kostnaðar- og ábatagreiningum fyrir lagningu nýrra

## Kaflí 7. Umhverfiskostnaður og jarðstrengir

---

flutningslína er þörf er á ítarlegri rannsóknum og þróun á aðferðafræði til mats á umhverfiskostnaði við íslenskar aðstæður líkt og unnið er að í samstarfsverkefni Hagfræðistofnunar Háskóla Íslands og Landsnets. Með þróun slíkra aðferða mætti meta umhverfiskostnað til fjár, líkt og annan beinan og óbeinan kostnað tengdum lagningu og rekstri flutningslína, og veita þar með aukna innsýn á þjóðhagslega hagkvæmni mismunandi valkosta þegar kemur að ákvörðunartöku um lagningu nýrra flutningslína.

Þó svo að vinnu við þróun aðferðafræði til mats á umhverfiskostnaði flutningsmannvirkja við íslenskar aðstæður sé ekki lokið, má ljóst vera að hinar miklu lengdatakmarkanir jarðstrengja leiða til þess að að ávinningur með tilliti til umhverfiskostnaðar verði einnig takmarkaður. Til þess að hámarka ávinninginn af nýtingu jarðstrengja þyrfti að greina valkosti vandlega til að komast að hvar mestur ábati hlytist af jarðstrengskafla.

Hinar stuttu hámarkslengdir jarðstrengskafla, eins og niðurstöður kafla 4 leiddu í ljós, gera það að verkum að erfitt er að nota jarðstrengi sem mótvægisáðgerð við sjónrænum áhrifum loftlína á svæðum þar sem loftlínan væri sjáanleg á lengri kafla en unnt er að koma í jörðu (til dæmis innan víðerna). Því má ætla að notkun stutts jarðstrengskafla við slíkar aðstæður hefði takmörkuð áhrif á umhverfiskostnað.

Út frá fyrirbyggjandi rannsóknum og greiningum [38, 39, 40] má leiða líkur að því að umhverfiskostnaður jarðstrengskafla yrði í flestum tilfellum metinn lægri heldur en samsvarandi loftlínukafla. Þar sem hámarkslengdir mögulegra jarðstrengskafla eru svo stuttar má ætla að ávinningur, að teknu tilliti til umhverfiskostnaðar af notkun jarðstrengja innan nýrra flutningslína, yrði einnig takmarkaður.

## 8.1 Aðgengi að raforku og áhrif á byggðaðpróun

Áreiðanlegt og nægjanlegt aðgengi að raforku er ein af undirstöðum nútímaþjóðfélags. Ef flutningsgeta raforkukerfisins er verulega lakari á ákveðnu svæði samanborið við önnur svæði, er hætt við að það hafi neikvæð áhrif á byggðaðpróun. Próun og uppbygging margskonar iðnaðar og annarrar atvinnustarfsemi er háð flutningsgetu kerfisins og því geta takmarkanir í flutningskerfinu haft mikið að segja fyrir byggðaðpróun.

Í skýrslu [41] um þjóðhagslegt gildi uppbyggingar flutningskerfisins, er gefið dæmi um hvernig aukin notkun iðnaðarstarfsemi um 10MW (sem svarar til notkunar meðalstórs iðnfyrirtækis) gæti skilað tæplega 14 milljörðum kr. í árlegan virðisauka. Sé gengið út frá því að 2/3 af þeirri upphæð færu í laun og tengd gjöld, svarar það til um 9 milljörðum kr. á ári sem skila sér til fólksins í byggðalaginu. Slík viðbót gæti skipt miklu máli fyrir viðkomandi byggðarlag og því mikilvægt að flutningsgeta raforkukerfisins sé nægjanlega mikil.

Aðgerðaáætlun stjórnvalda í loftlagsmálum miðar að því að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda og er meðal annars litið til orkuskipta í vegasamgöngum, ferjum og fiskimjölsverksmiðjum, og rafvæðingu hafna sem dæmi um aðgerðir sem ráðast má í. Slík þróun byggða með tilheyrandi uppbyggingu innviða fyrir vistvænar bifreiðar og styrkingu innviða fyrir rafvæðingu hafna er einnig háð því að flutningsgeta raforkukerfisins sé nægjanlega mikil.

Samhliða uppgangi ferðaðþjónustu undanfarin ár er í auknu mæli litið til þess að náttúruvernd geti stuðlað að eflingu byggða, þar sem tækifæri og ávinningur gæti skapast fyrir byggðarlag af þjónustu sem byggist á nýtingu náttúruverndarsvæða, svo sem í náttúru-tengdri ferðaðþjónustu. Slík atvinnustarfsemi er ekki orkufrek og því er uppbygging hennar ekki háð því að flutningsgeta raforkukerfisins sé mikil. Að auki gæti ásýnd nýrra flutningslína í náttúrunni hugsanlega haft neikvæð áhrif á uppbyggingu slíkrar starfssemi.

### 8.2 Áhrif loftlína og jarðstrengja á byggðapróun

Sem fyrr er fjallað um áhrif og ávinning af notkun jarðstrengskafla við styrkingu flutningskerfisins í samanburði við tilfelli þar sem eingöngu væri notast við loftlínu.

Próun og uppbygging margskonar iðnaðar og annarar atvinnustarfsemi er fyrst og fremst háð því að flutningsgeta raforkukerfisins innan svæðisins sé nægjanleg. Sama máli gegnir um þá þætti er snúa að orkuskiptum í vegasamgöngum, rafvæðingu hafna og fiskbræðsla. Séu takmarkanir fyrir hendi á flutningsgetu kerfisins til ákveðinna svæða, skiptir engu máli hvort notast er við jarðstrengi eða loftlínur við styrkingu flutningskerfisins hvað þessa þætti varðar. Það væri kerfisstyrkingin sjálf sem væri meginforsenda þess að slík próun gæti átt sér stað.

Hvað varðar áhrif á uppbyggingu náttúrutengdrar ferðaþjónustu, er ljóst að mikill munur er á sjónrænum áhrifum loftlína og jarðstrengja. Vegna hinna miklu raffræðilegu lengdatakmarkana sem eru fyrir notkun jarðstrengja á hæstu spennustigum flutningskerfisins (eins og lesa má um í kafla 4) er ekki mikil munur á áhrifum þess hvort styrking flutningskerfis raforku fari eingöngu fram með loftlínunum eða hvort nýttir séu stuttir jarðstrengskaflar þegar kemur að uppbyggingu náttúrutengdrar ferðaþjónustu. Hvort sem notast er við jarðstrengskafla eða ekki við lagningu nýrra flutningslína, myndi sýnileiki línanna vera sá sami á um 95% línuleiðarinnar þar sem aðeins er mögulegt að koma um 5% línunnar að jafnaði í jörðu.

# Heimildir

---

- [1] Parsons-Brinckerhoff, “Electricity transmission costing study,” Apríl 2012. Skýrsla.
- [2] EirGrid, “North-south 400kv interconnection development; outline and update of eirgrid’s consideration of the transmission technology options as presented to the independent expert group,” Desember 2017. Skýrsla.
- [3] Landsnet, “Háspennulínur (220 kv) frá kröflu og Þeistareykjum að bakka við húsa-vík, jarðstrengur (132 kv) frá bjarnarflagi að kröflu, mat á umhverfisáhrifum,” 2010. Matsskýrsla.
- [4] R. Hartlein, N. Hampton, J. Perkel, J. Hernandez, S. Elledge, Y. del Valle, J. Grimaldo, and K. Deku, “Applying diagnostics to enhance cable system reliability (cable diagnostic focused initiative, phase ii),” Febrúar 2016.
- [5] Reglugerð nr. 1048/2004, “Reglugerð um gæði raforku og afhendingaröryggi,” 2004.
- [6] F. F. da Silva and C. L. Bak, *Electromagnetic transients in power cables*. Springer, 2013.
- [7] H. Khalilnezhad, M. Popov, L. van der Sluis, J. A. Bos, J. P. de Jong, and A. Ametani, “Countermeasures of zero-missing phenomenon in (e) hv cable systems,” *IEEE Transactions on power delivery*, vol. 33, no. 4, pp. 1657–1667, 2017.
- [8] F. F. da Silva, C. L. Bak, U. S. Guðmundsdóttir, W. Wiechowski, and M. R. Knar-drupgard, “Use of a pre-insertion resistor to minimize zero-missing phenomenon and switching overvoltages,” in *2009 IEEE Power Energy Society General Meeting*, pp. 1–7, July 2009.
- [9] F. F. da Silva, C. L. Bak, U. S. Gudmundsdottir, W. Wiechowski, and M. R. Knar-drupgard, “Methods to minimize zero-missing phenomenon,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 4, pp. 2923–2930, 2010.
- [10] T. Ohno, *Dynamic Study on the 400 kV 60 km Kyndbyværket–Asnæsværket Line*. PhD thesis, Department of Energy Technology, Aalborg University, 2012.
- [11] Energinet, “Technical Issues Related To New Transmission Lines in Denmark - West Coast Line from German border to Endrup and Endrup-Idomlund,” 2018. Skýrsla.
- [12] Elinfrastrukturudvalget, “Teknisk redegørelse om fremtidig udbygning og kabellægning i eltransmissionsnettet,” April 2008.

## HEIMILDIR

---

- [13] S. Dalsgård and U. S. Guðmundsdóttir, *Kabelhåndbogen. AC-kabelanlæg 132-400 kV*. Energinet.dk, 2013. ISBN 978-87-90707-03-3.
- [14] U. S. Guðmundsdóttir, *Modelling of long High Voltage AC Cables in the Transmission System*. PhD thesis, Aalborg University, 2010.
- [15] F. M. F. d. Silva, *Analysis and simulation of electromagnetic transients in HVAC cable transmission*. PhD thesis, Aalborg University, 2011.
- [16] C. F. Jensen, *Online Location of Faults on AC Cables in Underground Transmission Systems*. PhD thesis, Aalborg University, 2013.
- [17] R. Olsen, *Dynamic Loadability of Cable Based Transmission Grids*. PhD thesis, Technical University of Denmark, 2013.
- [18] EirGrid, “Cable studies for grid west,” 2015. Skýrsla.
- [19] Landsnet, “Lagning jarðstrengja á hærri spennum í raforkuflutningskerfinu,” 2015. Skýrsla.
- [20] J. Vassallo, K. Agius, J. Cassar, A. Camilleri, E. Olsen, and M. M. Hatlo, “Engineering and operating the 230kv, 50hz interconnector between malta and italy,” in *2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, pp. 1–6, IEEE, 2016.
- [21] Landsnet, “Kerfisáætlun Landsnets 2019-2028: Langtímaáætlun um þróun meginflutningskerfis raforku,” 2019. Skýrsla.
- [22] Landsnet, “Kerfisáætlun Landsnets 2019-2028: Áætlun um framkvæmdaverk 2020-2022,” 2019. Skýrsla.
- [23] Landsnet, “Jarðstrengslengdir í meginflutningskerfinu - Mat á mögulegum jarðstrengslengdum í nýju 220 kV flutningskerfi á Norðurlandi - Kerfisgreining,” 2017. Skýrsla.
- [24] Landsnet, “Jarðstrengslengdir í 132 kV meginflutningskerfinu á Norður- og Norðausturlandi - Kerfisgreining,” 2018. Skýrsla.
- [25] L. F. Dai, L. Su, and X. I. Dai, “Reclosing operation modes for 110 kv and above power system,” *Hydropower Automation and Dam Monitoring*, vol. 2, no. 36, pp. 58–62, 2012.
- [26] R.-m. Ou, Y. Gun, Z.-q. Yu, J.-b. Wu, S.-m. Chen, and H.-j. Zhen, “The actual operation of transmission line and evaluation of the reclosing time of reclosure,” *DEStech Transactions on Engineering and Technology Research*, 2017.

- [27] Landsnet, “Breytingar á flutningskerfinu við höfuðborgarsvæðið,” 2017. Skýrsla.
- [28] C. W. G. B1.10, “Report 379 - update of service experience of hv underground and submarine cable systems.,” 2009. ISBN 978-2-85873-066-7. Skýrsla.
- [29] ENTSO-E, “Nordic and baltic grid disturbance statistics 2017,” 2018. Skýrsla.
- [30] Raforkulög nr. 65/2003, “Raforkulög,” 2003.
- [31] EFLA, “Orkuverð á Íslandi 2005-2017,” 2018. Skýrsla.
- [32] Reglugerð nr. 192/2016, “Reglugerð um mat á vegnum fjármagnskostnaði sem viðmið um leyfða arðsemi við ákvörðun tekjumarka sérleyfisfyrirtækja í flutningi og dreifingu á raforku,” 2016.
- [33] EFLA, “Kostnaðarmat valkosta í Suðurnesjalínu 2,” 2019. Skýrsla.
- [34] Landsnet, “Kröflulína 3 , 220kv: Mat á umhverfisáhrifum,” 2017. Matsskýrsla.
- [35] Landsnet, “Hólasandslína 3 , 220kv raflína frá akureyri að hólasandi, frummatskýrsla,” 2018. Matsskýrsla.
- [36] OECD, *Cost-Benefit Analysis and the Environment: Further Developments and Policy Use*. OECD, 2018.
- [37] Brynhildur Davíðsdóttir and Daði Már Kristófersson and Sigurður Jóhannesson, “Hagrænt mat á náttúrugæðum og umhverfisáhrifum,” Ágúst 2013. Skýrsla.
- [38] A. S. Ragnarsdóttir, “Greiðsluvilji vegna sjónrænna áhrifa háspennulína,” 2010. Meistararitgerð í umhverfis- og auðlindafræði við Háskóla Íslands.
- [39] National Grid, “Consumers’ willingness to pay research,” Júlí 2012. Skýrsla.
- [40] S. Navrud, R. Ready, K. Magnussen, and O. Bergland, “Valuing the social benefits of avoiding landscape degradation from overhead power transmission lines: Do underground cables pass the benefit–cost test?,” *Landscape Research*, vol. 33, pp. 281–296, Júní 2008.
- [41] Landsnet, “Þjóðhagslegt gildi uppbyggingar flutningskerfis landsnets,” Júní 2013. Skýrsla.