



LANDSNET

EÐLI, ÁHRIF, MÆLINGAR OG ÚTREIKNINGAR
RAFSEGULSVIÐ

Landsnet 23018

RAFSEGULSVIÐ

EÐLI, ÁHRIF, MÆLINGAR OG ÚTREIKNINGAR

Efnisyfirlit

1 Inngangur	4
2 Samantekt.....	5
3 Hvað er rafsegulsvið?.....	6
3.1 Heilsufarsleg áhrif.....	6
3.2 Viðmið.....	7
3.3 Styrkur rafsegulsviðs í umhverfinu	8
3.3.1 Raflínur	8
4 Útreikningar og mælingar	11
4.1 Útreikningar og mælingar	11
4.1.1 Búrfellslína 3, 220 kV loftlína	11
4.1.2 Búrfellslína 4, 220 kV jarðstrengur	15
4.1.3 Nesjavallalína 2, 132 kV jarðstrengur	15
4.2 Samantekt	17
5 Heimildir.....	18
Viðauki 1. Segulsviðsútreikningur	19

1 Inngangur

Það hefur komið í ljós á fundum Landsnets með hagsmunaaðilum vegna undirbúnings framkvæmda að talsvert er spurt um rafsegulsvið og möguleg áhrif þess á umhverfið. Lengi hefur t.a.m. verið bent á möguleg tengsl rafsegulsviðs og hvítblæðis í börnum auk mögulegra annarra heilsukvilla. Enn fremur veltir fólk fyrir sér hvaða viðmið gildi varðandi styrk rafsegulsviðs og útbreiðslu þess út frá raflínunum.

Tilgangurinn með útgáfu þessarar skýrslu er að safna saman á einn stað helstu upplýsingum um eðli rafsegulsviðs og gera grein fyrir stöðu rannsókna á áhrifum á umhverfi (þ.m.t. heilsu fólks). Einnig er gerður samanburður á mældum og útreiknuðum gildum á rafsegulsviðsstyrk. Tilgangurinn með þeim samanburði er fyrst og fremst sá að sýna fram á að útreiknuð gildi gefa rétta mynd af raunveruleikanum, enda byggja útreikningarnir ekki á neinu öðru en eðlisfræðilögmálum.

Rafsegulsviðsgeislun er svokölluð “ójónandi geislun”, sem skilgreind er sem *“útfjólublá geislun og allar aðrar rafsegulbylgjur með lengri bylgjulengd, svo sem örbylgjur og aðrar rafsegulbylgjur sem hafa hliðstæð líffræðileg áhrif, svo og rafsegulsvið”*. “Jónandi geislun” er aftur á móti geislun frá geislavirkum efnum eða röntgengeislum.

Við samantekt þessarar skýrslu hefur verið leitað fanga víða. Þar ber helst að nefna Alþjóða heilbrigðismálastofnunina (WHO), Alþjóða geislavarnaráðið fyrir ójónandi geislun (ICNIRP), Ráðið um stór raforkukerfi (CIGRÉ) og Sænsku geislavarnastofnunina (Strålsäkerhetsmyndigheten). Þetta eru aðilar sem hafa góða yfirsýn yfir helstu rannsóknir á mögulegum áhrifum rafsegulgeislunar á heilsufar.

2 Samantekt

Þó að vísbendingar hafi komið fram í einstaka rannsóknum um að hugsanlega sé sambengi milli segulsviðs og veikinda, t.d. hvítblæðis í börnum, hefur ekki verið hægt að finna neinar skýrar vísbendingar þar um. Yfirleitt er þá um að ræða faraldursfræðilegar rannsóknir, sem erfitt hefur verið að sannreyna lífeðlisfræðilega. Alþjóðaheilbrigðismálastofnunin (WHO) og Alþjóðageislavarnaráðið fyrir ójónandi geislun (ICNIRP) eru samstiga að þessu leyti. Engar nýjar rannsóknir hafa komið fram sem kalla á að viðmiðum ICNIRP um hámarksstyrk raf- og segulsviðs, sem sett voru árið 2010, verði breytt. Aftur á móti er hvatt til þess að viðhöfð séu svokölluð “varúðarviðmið” með tilliti til barna og dvöl þeirra í segulsviði. Þá er oft miðað við að segulsviðsstyrkur í þeirra daglega umhverfi fari ekki yfir $0,4 \mu\text{T}$.

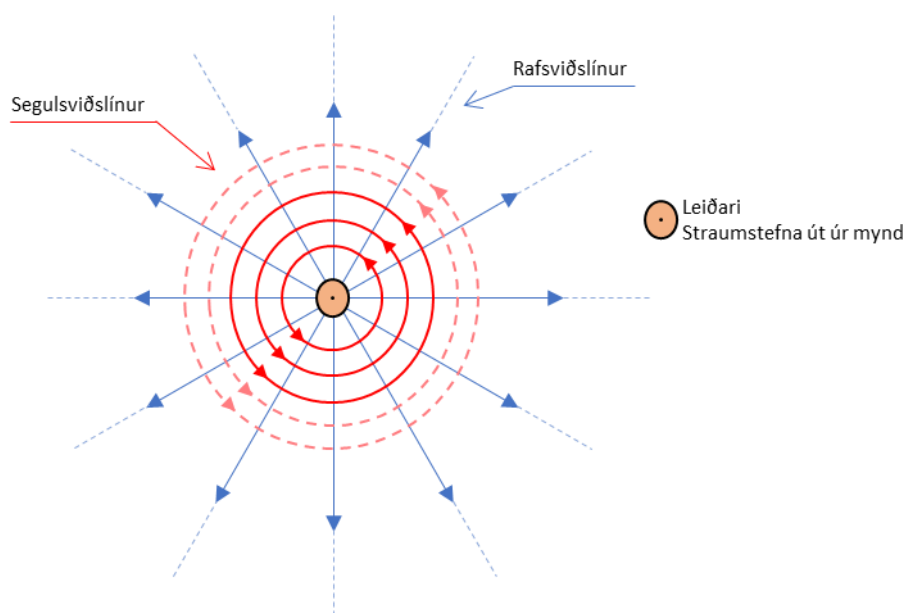
Styrkur raf- og segulsviðs umhverfis raflínur er alltaf langt innan viðmiðunarmarka, jafnvel beint undir loftlínu. Styrkurinn deyr mjög hratt út með fjarlægð frá línunni. Styrkur segulsviðs í 1 m hæð yfir jarðstreng er mun meiri en í 1 m hæð undir loftlínu, enda uppspretta segulsviðsins (þ.e. straumurinn í leiðaranum) mun nær mælipunktinum í tilviki strengsins.

Rafsviðið er tilkomið vegna spennunnar á leiðaranum. Það er hægt að skerma það af með byggingum o.þ.h. Ekki er talið að heilsu manna stafi nein ógn af rafsviðinu, heldur hafa áhyggjur manna beinst að segulsviðinu. Styrkur þess ræðst af straumnum í leiðaranum og fjarlægð frá honum. Útreikningar á segulsviðsstyrk byggjast á eðlisfræði og hornafræði. Gerð er nánari grein fyrir þeim útreikningum í Viðauka 1.

3 Hvað er rafsegulsvið?

Rafsegulsvið er samheiti fyrir tvö fyrirbæri; rafsvið og segulsvið. Þessi tvö svið eru óhjákvæmilegur fylgifiskur allra raftækja og notkunar á rafmagni almennt. Rafsviðið myndast þegar hlutur er undir spennu, en til þess að segulsvið myndist þarf að renna rafstraumur. Styrkur beggja sviðanna fellur með fjarlægð frá uppsprettunni.

Mynd 1 sýnir samhengi straums í leiðara og stefnu raf- og segulsviðanna. Á myndinni er gert ráð fyrir að straumstefnan sé út úr henni.



Mynd 1 Skýringarmynd af samhengi straumstefnu í leiðara, stefnu rafsviðs og stefnu segulsviðs

Rafsviðsstyrkur er mældur í einingunni volt á metra, V/m. Styrkur segulsviðs er oft gefinn upp í einingunni míkrotesla, μT . Samhengi straumsins, I , og styrks segulsviðsins, B , í fjarlægðinni r frá leiðara er lýst með lögmáli Ampéres:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

þar sem μ_0 er hinn svokallaði segulsvörunarstuðull loftins.

Í þessari skýrslu er eingöngu fjallað um rafsegulsvið af völdum hefðbundins neyslurafmagns, þ.e. rafmagns sem framleitt er í virkjunum, flutt um flutningskerfi og dreift til endanlegra notanda. Slíkt svið er kallað “extremely low frequency” svið (ELF) á ensku, sem mætti þýða sem “svið á mjög lágrí tíðni”. Tíðnin, sem hér um ræðir, er 50 Hz. Ekki er fjallað um svið á hærri tíðni, t.d. á fjarskiptatíðni (útvarp, símar o.þ.h.).

3.1 Heilsufarsleg áhrif

Áhrif rafsegulsviðs á lífverur hafa lengi verið rannsökuð. Ekki hafa komið fram óbyggjandi sannanir fyrir því að rekja megi heilsufarsleg vandamál til þess að fólk hafi verið útsett fyrir rafsegulsviði [1]. Reyndar er það gildandi skoðun Alþjóðaheilbrigðismálastofnunarinnar (WHO) að rafsvið (á mjög lágrí tíðni, 50 Hz) valdi ekki heilsufarsvandamálum, sé styrkur þess innan þess sem telja má eðlilegra marka og almenningur er útsettur fyrir alla jafna [2]. Meginþungi rannsókna hefur því beinst að

mögulegum áhrifum segulsviðsins. Sænska geislavarnarstofnunin (Strålsäkerhetsmyndigheten) fylgist t.a.m. mjög náið með þeim rannsóknum sem fara fram á þessu sviði. Stofnunin gefur árlega út skýrslu þar sem farið er ítarlega yfir nýjustu rannsóknir á alþjóðavísu [3]. Í þessari skýrslu er gefið greinargott yfirlit yfir marktækar rannsóknir, auk þess sem talðar eru upp rannsóknir sem ekki þykja nægilega góðar og rökstutt er hvers vegna.

Það sem menn hafa helst haft áhyggjur af er samhengi milli rafsegulgeislunar og hvítblæðis í börnum. Það eru til faraldursfræðilegar rannsóknir sem benda til einhvers samhengis þarna á milli. Þær vísbendingar eru þó engan veginn nægilega sterkar til þess að hægt sé að slá því föstu að um slíkt samband sé að ræða. Jafnvel benda sumar heimildir á að nýjustu rannsóknir á þessu sviði hafi frekar dregið úr líkum á því að þarna sé um samhengi að ræða [4]. Þó er ljóst að það þarf að rannsaka þetta betur og undir það er tekið í ofangreindri skýrslu sænsku geislavarnanna og raunar í flestum þeim skýrslum sem um þetta fjalla, t.d. hér [5]. Á það er líka bent að skoða þurfi betur samhengi heilsu, rafsegulsviðs og annarra þátta, s.s. atriða í nærumhverfi fólks.

Þrátt fyrir að Alþjóðaheilbrigðismálastofnunin telji að ekki liggi fyrir óbyggjandi sannanir fyrir samhengi segulsviðs og hvítblæðis í börnum [6], mælir stofnunin samt með því að viðhafðar séu ákveðnar varúðarráðstafanir. Í Danmörku er t.a.m. viðhaft s.k. "forsigtighedsprinsipp" [5], sem í grófum dráttum gengur út á að ekki skuli byggja nýtt íbúðarhúsnæði og stofnanir, sem börn dvelja í eða á, nálægt háspennulínum. Enn fremur skuli ekki reisa ný háspennuvirki nálægt íbúðarhúsnæði eða slíkum stofnunum. Hins vegar er engin skilgreining á því hvað teljist "nálægt", lagt er upp með að það sé metið hverju sinni.

Í [4] er einnig fjallað um möguleg önnur heilsufarsleg áhrif rafsegulgeislunar. Ekki er talinn grundvöllur til að álykta að þeir, sem vinna í umhverfi með mikilli rafsegulgeislun, séu líklegri en aðrir til að fá krabbamein. Samhengið við taugahrörnunarsjúkdóma (eins og Alzheimer, ALS, Parkinson ofl.) hefur einnig verið skoðað. Samkvæmt rannsóknum er augin áhætta á ákveðnum sjúkdómum (t.d. Alzheimer og ALS) hjá þeim sem vinna í sterku rafsegulsviði. Orsakasamhengið er hins vegar ekki ljóst. Aftur á móti er ekki hægt að draga þær ályktanir, út frá tiltækum gögnum, að slíku fólki sé hættara við að fá Parkinson eða flogaveiki.

Ekki hefur heldur verið hægt að sýna fram á samhengi þess að vera útsettur fyrir sterku rafsegulsviði og að fá hjartsláttartruflanir. Þá hefur heldur ekki verið unnt að tengja rafnæmi, höfuðverki, þunglyndi, fósturskaða og ótímabær fósturlát við það að vera útsettur fyrir rafsegulsviði.

Það skal áréttað að hér er verið að fjalla um fólk sem er útsett fyrir rafsegulgeislun í sínum störfum. Rafsegulgeislun, sem að jafnaði má búast við innan veggja heimilisins og í daglegu umhverfi flestra, er hins vegar langtum minni.

3.2 Viðmið

Hér á landi eru í gildi viðmið um leyfilegan styrk raf- og segulsviðs [7]. Þessi viðmið eru hin sömu og fylgt er víðast hvar í hinum vestræna heimi og byggja á viðmiðum "International Commission on non-ionizing Radiation Protection» (Alþjóðageislavarnaráðinu fyrir ójónandi geislun, ICNIRP) [8].

Þessi viðmið byggja á þeim rannsóknum sem fyrir liggja hverju sinni. Þau eru frá árinu 2010, en árið 2020 gaf ICNIRP út nokkurs konar gloppugreiningu á henni [9]. Þar kemur m.a. fram að á tímabilinu frá 2010 hafi ekki komið fram nýjar upplýsingar sem kalli á breytingar á viðmiðunum.

Gerður er greinarmunur á því hvort um tímabundna eða stöðuga viðveru í sviðinu er um að ræða. Tímabundin viðvera er t.d. tengd því ef viðkomandi þarf að vinna í rafsegulsviði yfir ákveðið tímabil, en stöðug viðvera á t.d. við um almenning (búsetu). Þessi viðmiðunarmörk eru sýnd í töflu 1.

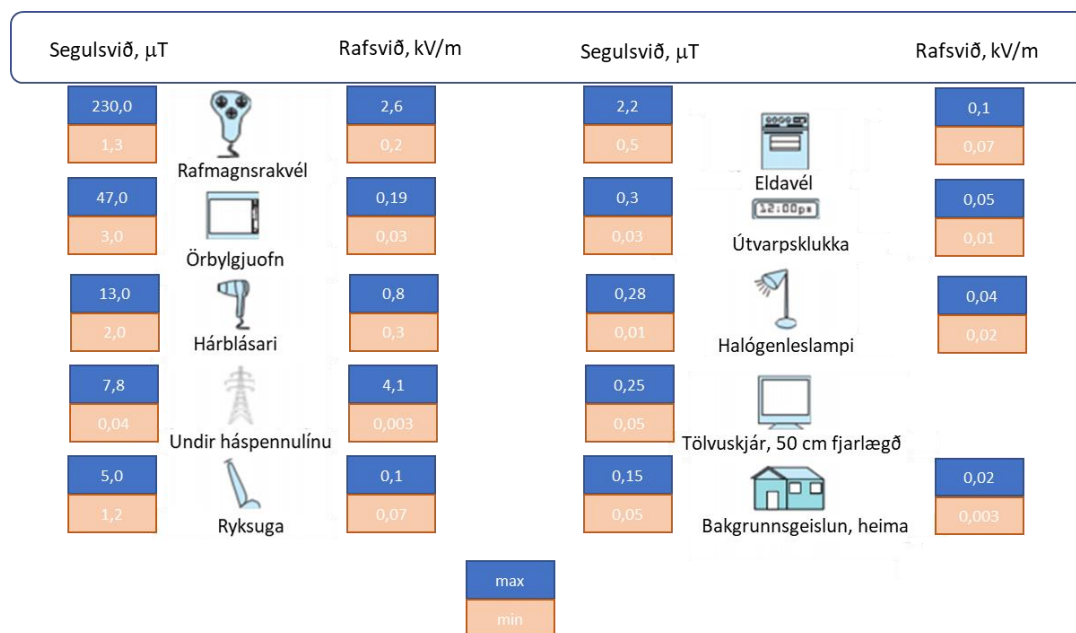
Tafla 1 Viðmiðunarmörk fyrir styrk rafsegulsviðs m.v. 50 Hz tíðni

	Rafsvið, kV/m	Segulsvið, μT
Tímabundin viðvera	10,0	1000
Stöðug viðvera	5,0	200

Eins og áður er greint frá hefur Alþjóðaheilbrigðismálastofnunin beint því til ríkja að viðhöfð séu varúðarviðmið með tilliti til barna og mögulegs samhengis milli hvítblæðis í þeim og segulsviðs. Í því samhengi er oft miðað við 0,4 μT .

3.3 Styrkur rafsegulsviðs í umhverfinu

Við erum að jafnaði umvafin rafsegulsviði í okkar daglega lífi, enda óhjákvæmilegur fylgifiskur raftækjanotkunar. Það er erfitt að hugsa sér daginn án þess að við sögu komi allmörg raftæki. Á mynd 2 sést styrkur rafsegulsviðs frá nokkrum algengum heimilistækjum og við algengar aðstæður [10].



Mynd 2 Dæmi um styrk rafsegulsviðs frá algengum heimilistækjum og við algengar aðstæður

Í híbýlum fólks er styrkur segulsviðs að jafnaði á bilinu 0,025 – 0,07 μT í Evrópu og 0,055 – 0,11 μT í Bandaríkjunum [6]. Styrkur rafsviðs er svo að jafnaði af stærðargráðunni nokkrir tugir volta á metra. Þetta eru gildi sem eru langt undir viðmiðunarmörkum, jafnvel þó horft sé á 0,4 μT varúðarviðmiðið.

Þessu til viðbótar er rétt að benda á að styrkur segulsviðs jarðar er um 50 μT og það myndar svokallaða bakgrunnsgeislun. Það segulsvið er þó stöðugt segulsvið, þ.e. það sveiflast ekki með ákveðinni tíðni.

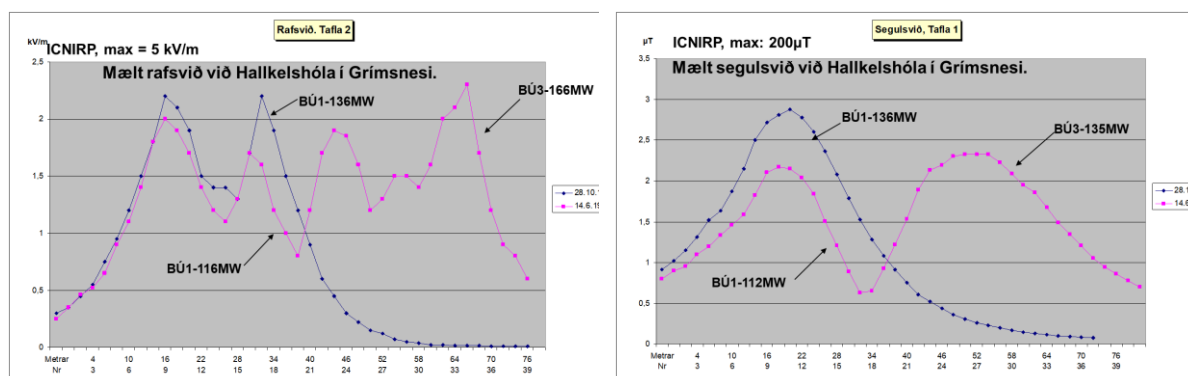
3.3.1 Raflínur

Rafsegulsvið umhverfis raflínur hefur lengi verið til umræðu. Ekki er hægt að líta framhjá því að það er til staðar, enda fylgir það notkun á rafmagni eins og áður er bent á. En er styrkurinn slíkur að lífverum stafi hættu af? Útreikningar á styrk raf- og segulsviðs er tiltölulega auðveldur (að því marki sem

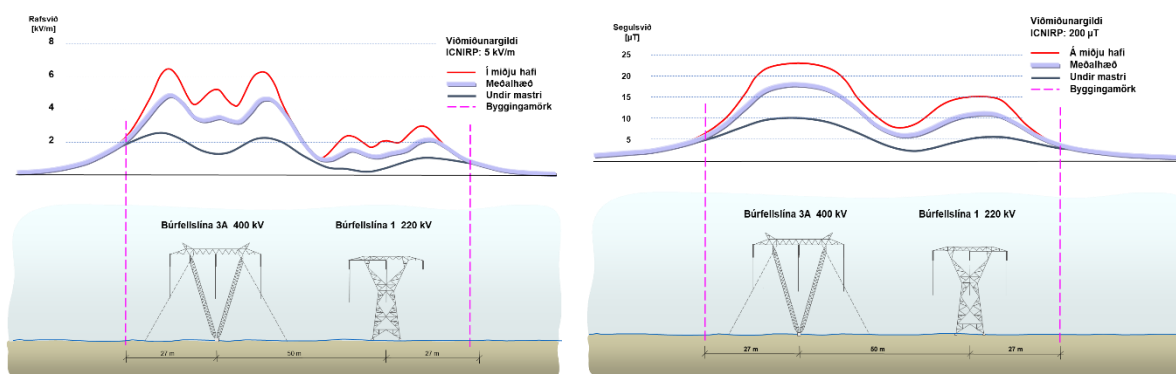
eðlisfræðilegir útreikningar eru auðveldir). Þeir byggja eingöngu á eðlisfræðilegum lögmálum og ættu því að vera ótvíræðir. Mælingar eru síðan notaðar til þess að staðfesta útreikningana.

Rafsviðsstyrkurinn er háður spennunni á línunni. Þar sem spennan er að jafnaði tiltölulega föst (sveiflast í mesta lagi um $\pm 10\%$) má líta svo á að rafsviðsstyrkurinn á hverjum stað sé fasti (en falli með fjarlægð frá línunni). Styrkur segulsviðsins er aftur á móti í réttu hlutfalli við þann straum sem línán flytur hverju sinni. Hann er því meiri sem straumurinn er hærri. Því er mikilvægt við útreikninga á segulsviðsstyrknum að skoða hið minnsta eitt háalagstilvik auk tilvika með lægra álagi. Eins og með rafsviðsstyrkinn, fellur segulsviðsstyrkurinn með fjarlægð frá leiðaranum. Styrkur rafsegulsviðs er því meiri úti á miðju hafi (þ.e. mitt á milli mastra) en undir mastriinu sjálfu, vegna sigsins á leiðaranum.

Fyrir allmörgum árum voru gerðar mælingar á nokkrum flutningslínunum Landsvirkjunar (þ.e. fyrir tilkomu Landsnets). Dæmi um niðurstöður þeirra mælinga eru sýnd á mynd 2. Að auki eru sýndar niðurstöður útreikninga fyrir sömu línur á mynd 3.



Mynd 3 Mælt rafsvið (vinstra megin) og segulsvið (hægra megin) við Búrfellslínur 1 og 3



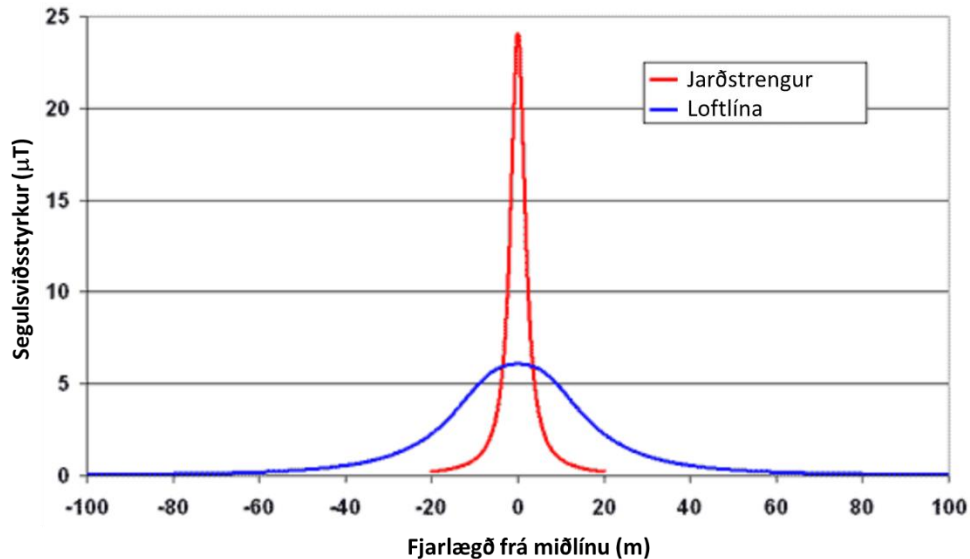
Mynd 4 Útreiknað rafsvið (vinstra megin) og segulsvið (hægra megin) við Búrfellslínur 1 og 3

Nánari samanburður á nýjum útreikningum og mælingum er gerður í kafla 4 síðar í þessari skýrslu.

Styrkur raf- og segulsviðsins er mestur undir línunni, en eins og sjá má á myndum 2 og 3 fellur hann hratt með fjarlægð frá línunni og er kominn vel undir viðmiðunarmörk þegar komið er út fyrir byggingarbannsvæðið. Búi menn í nágrenni slíkrar línu er frekar ástæða til að hafa áhyggjur af öðrum mengunarpáttum en rafsegulmengun, t.a.m. hljóð- og/eða sjónmengun (sjónmengun er reyndar afstæð og ekki mælanleg).

Það er nokkur munur á loftlínunum og jarðstrengjum þegar kemur að útgeislun rafsegulsviðs. Eins og kemur fram hér frammar stafar rafsviðið af spennunum, þ.e. í tilfelli loftlínu vegna spennumunar milli leiðara og jarðar. Í jarðstreng, með jarðtengdum skermleiðara, er rafsviðið aftur á móti allt inni í

strengnum, þ.e. milli leiðarans og skermleiðarans. Því er ekki um neitt rafsvið að ræða í nágrenni strengsins. Hins vegar er segulsviðið til staðar, enda einungis háð straumnum í leiðaranum. Að jafnaði er styrkur rafsegulsviðs mældur í ákveðinni hæð frá jörðu, t.d. í 1 m hæð. Mynd 4 sýnir dæmi um muninn á styrk segulsviðs frá loftlínu og jarðstreng (með sambærilega flutningsgetu). Mælingin fer fram í sömu hæð yfir jörðu.



Mynd 5 Dæmi um styrk segulsviðs frá jarðstreng, annars vegar, og sambærilegri loftlínu hins vegar. Mælt í sömu hæð yfir jörðu [9]

Eins og myndin sýnir er mældur styrkur segulsviðsins frá jarðstrengnum mun hærri en frá loftlínunni. Það er eðlilegt, enda er mælipunkturinn mun nær strengnum en leiðara loftlínunnar. Mæling við yfirborð jarðar myndi sýna enn meiri mun.

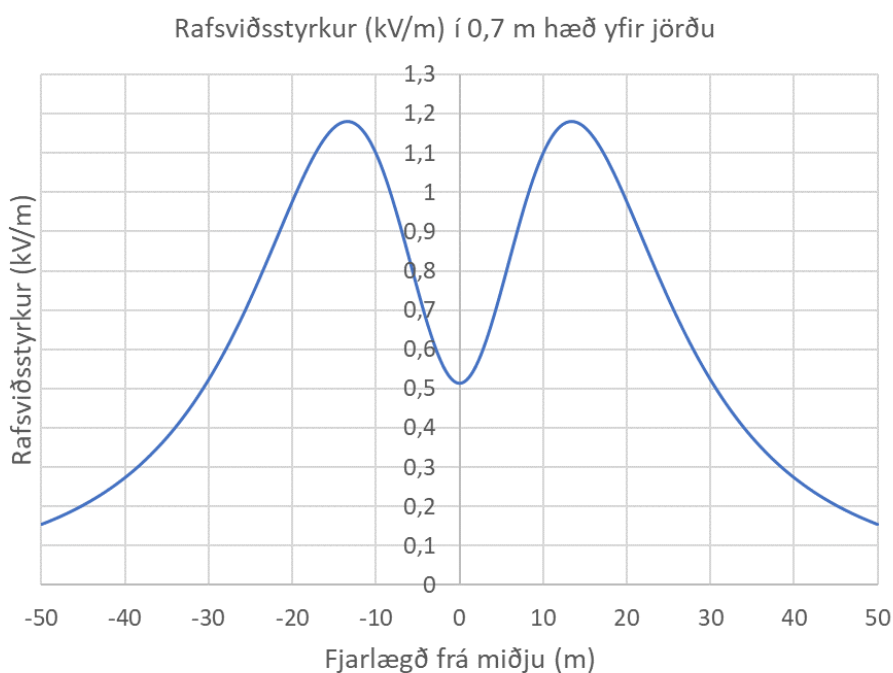
4 Útreikningar og mælingar

Í tengslum við útgáfu þessarar skýrslu var ráðist í mælingar á raf- og segulsviði til þess að bera saman við útreiknuð gildi. Raf- og segulsvið var reiknað og mælt undir Búrfellslínu 3 (220 kV loftlína) og segulsvið reiknað fyrir jarðstrengina Nesjavallalína 2 (132 kV) og Búrfellslína 4 (220 kV).

4.1 Útreikningar og mælingar

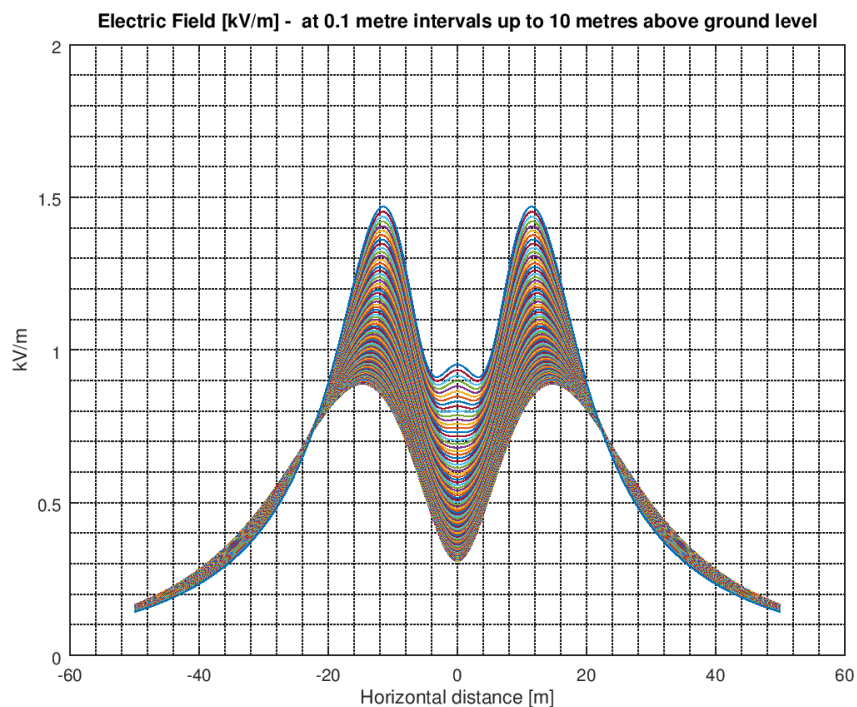
4.1.1 Búrfellslína 3, 220 kV loftlína

Útreiknaður rafsviðsstyrkur í 0,7 m hæð yfir jörðu er sýndur á mynd 6.



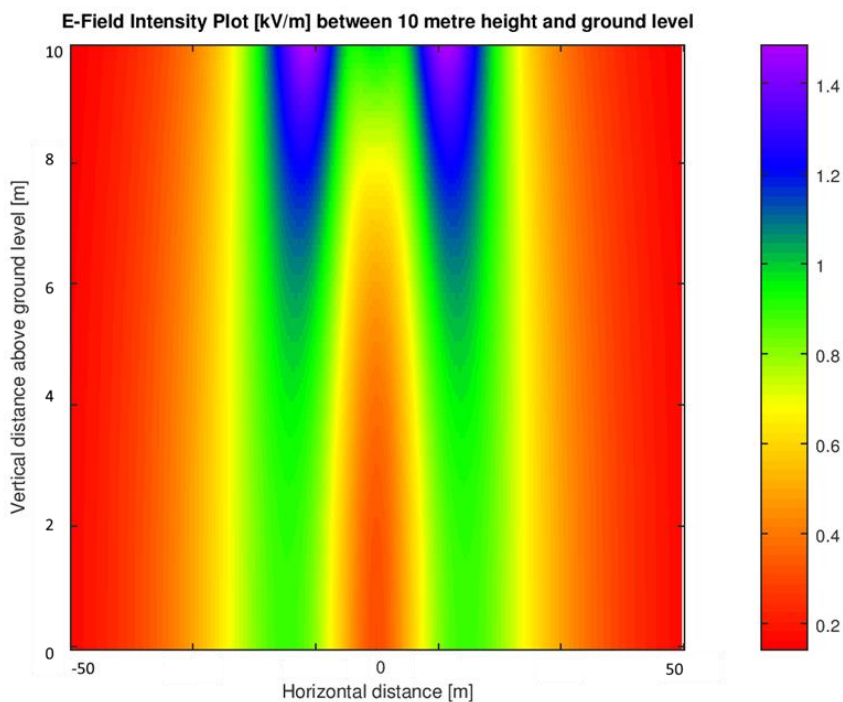
Mynd 6 Útreiknað rafsvið í 0,7 m hæð undir Búrfellslínu 3

Á mynd 7 sést svo útreiknaður rafsviðsstyrkur með 10 cm millibili, frá yfiorði upp í 10 m hæð.



Mynd 7 Útreiknað rafsvið með 10 cm millibili frá yfirborði upp í 10 m hæð undir Búrfellslínu 3

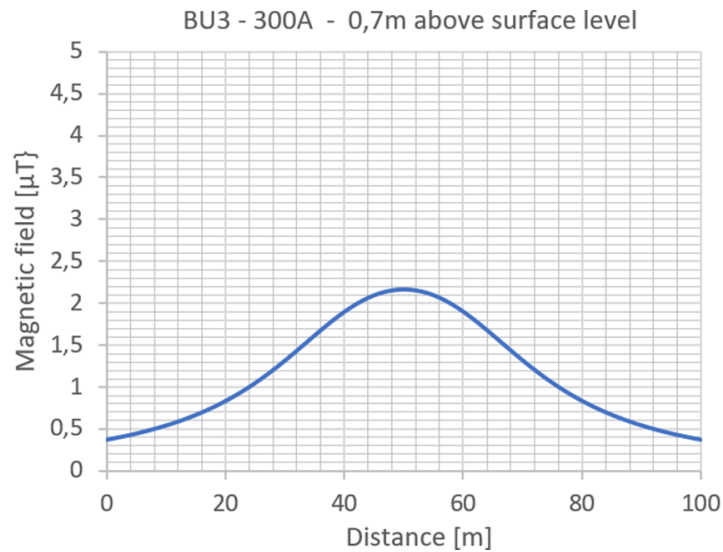
Annað sjónarhorn á þetta er sýnt á mynd 8.



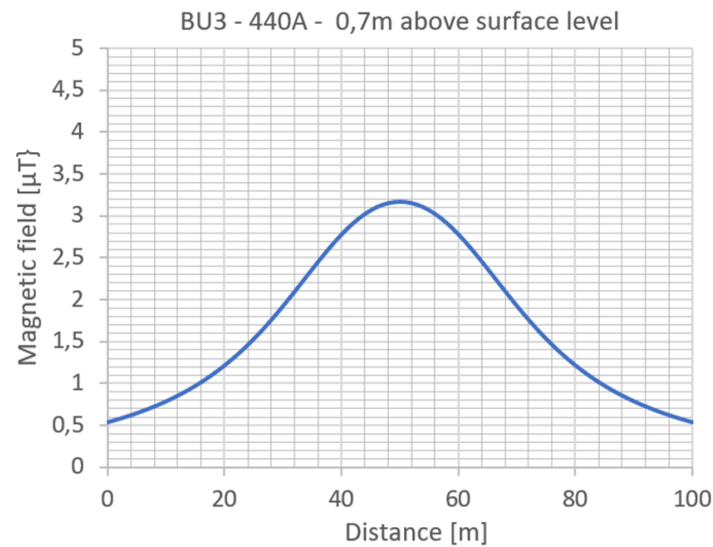
Mynd 8 Útreiknað rafsvið frá yfirborði upp í 10 m hæð undir Búrfellslínu 3

Þessi mynd sýnir hvernig rafsviðsstyrkurinn breytist með hæð yfir jörð (lóðrétti ásin) og fjarlægð frá miðju (lárétti ásin). Styrkurinn eykst eftir því sem komið er nær leiðaranum.

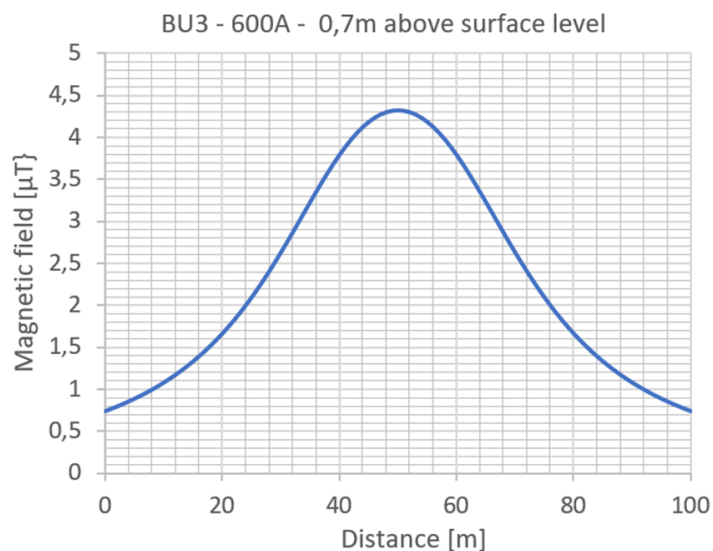
Rafsviðið er eingöngu háð spennunni á línunni. Segulsviðið er hins vegar í réttu hlutfalli við strauminn sem um línuna fer. Segulsviðið undir BU3 hefur verið reiknað fyrir þrjú straumgildi; 300 A, 440 A og 600 A (Samsvarar flutningi sem nemur um það bil 115 MVA, 170 MVA og 230 MVA). Í öllum tilvikum er reiknað miðað við 0,7 m hæð frá jörðu.



Mynd 9 Útreiknað segulsvið í 0,7 m hæð. Straumur 300 A



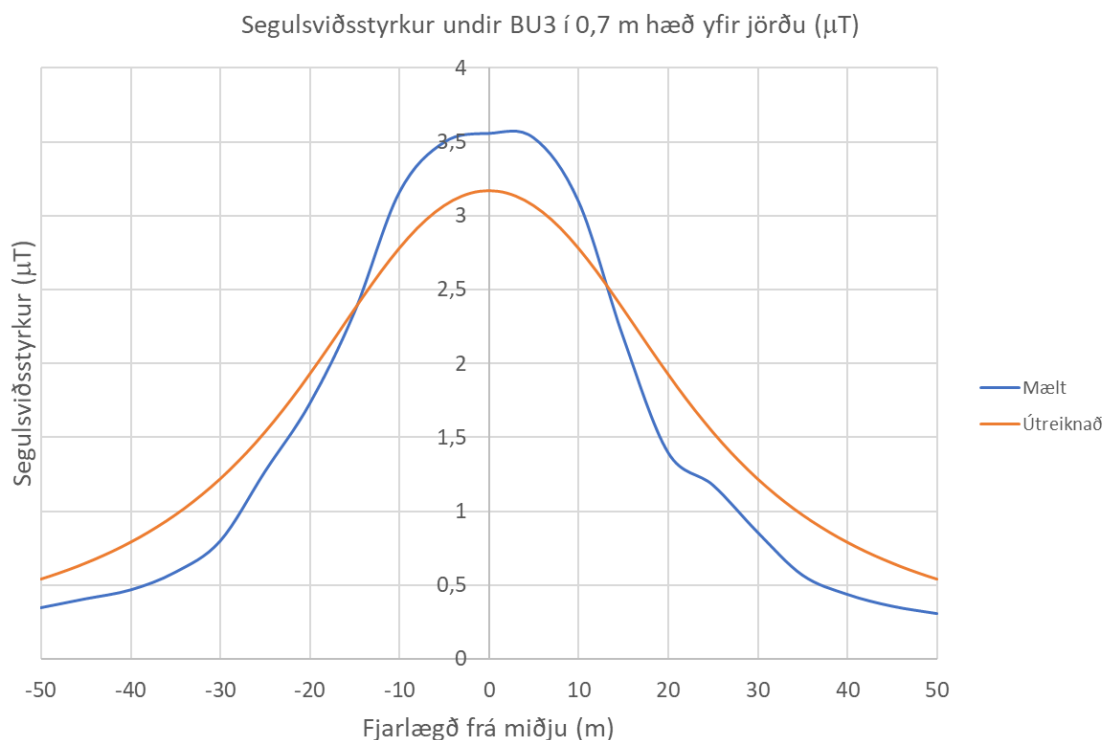
Mynd 10 Útreiknað segulsvið í 0,7 m hæð. Straumur 440 A



Mynd 11 Útreiknað segulsvið í 0,7 m hæð. Straumur 600 A

Öll eru þessi gildi fyrir raf- og segulsvið langt innan viðmiðunarmarka (sjá töflu 1).

Styrkur segulsviðsins undir Búrfellslínu 3 var einnig mældur (í 0,7 m hæð). Samanburður á mælingum og útreikningi er sýndur á mynd 12. Meðalstraumur í línunni meðan mæling fór fram var um 440 A og útreikningarnir miða við það gildi.

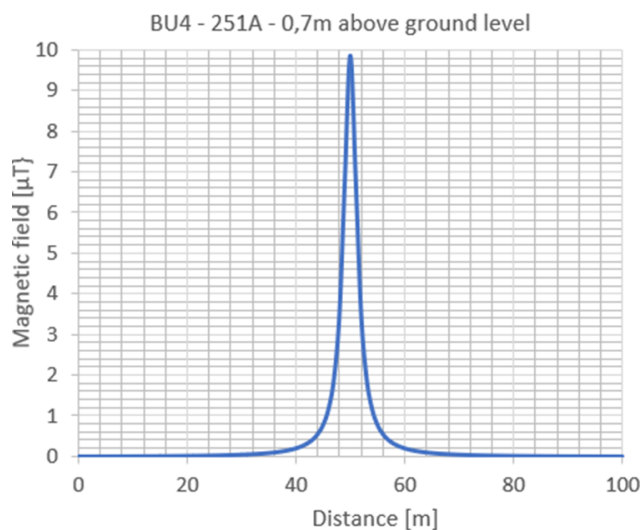


Mynd 12 Útreiknað og mælt segulsvið í 0,7 m hæð. Straumur 440 A

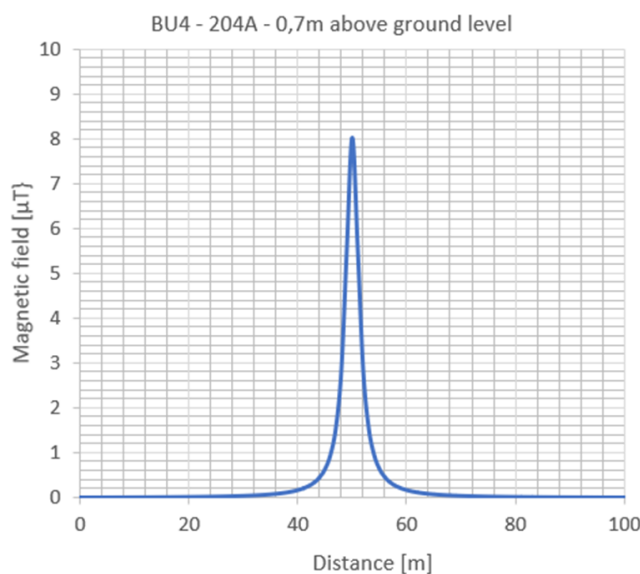
Eins og glöggst má sjá á mynd 12 er mjög góð samsvörun milli útreiknaðs segulsviðsstyrks og mælds. Mælingin sýnir örlítið hærra hámark, en útreikningarnir vanmeta aðeins það hversu hratt segulsviðið dvínar með fjarlægð frá miðju.

4.1.2 Búrfellslína 4, 220 kV jarðstrengur

Búrfellslína 4 er rúmlega 2 km langur, 220 kV jarðstrengur, sem tengir Búfellsvirkjun-II við flutningskerfið. Erfiðlega gekk að ná góðri mælingu á segulsviðinu frá strengnum, en það var reiknað fyrir tvö straumgildi, 251 A og 204 A. Niðurstöður útreikninganna eru sýndar á myndum 13 og 14.



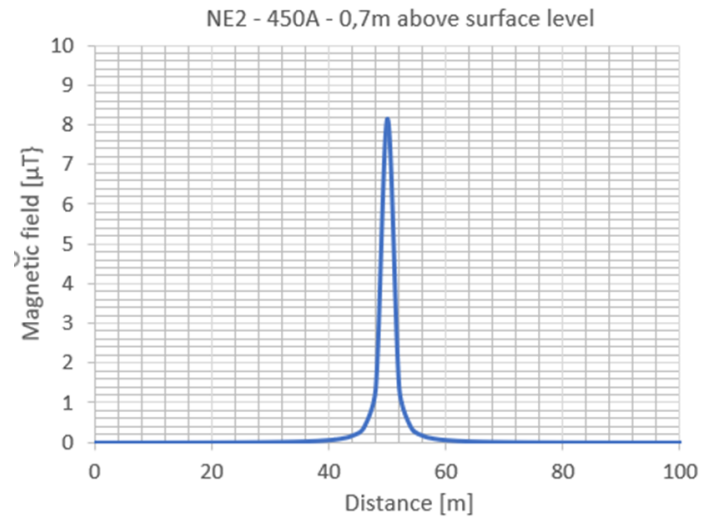
Mynd 13 Útreiknað segulsvið í 0,7 m hæð. Straumur 251 A



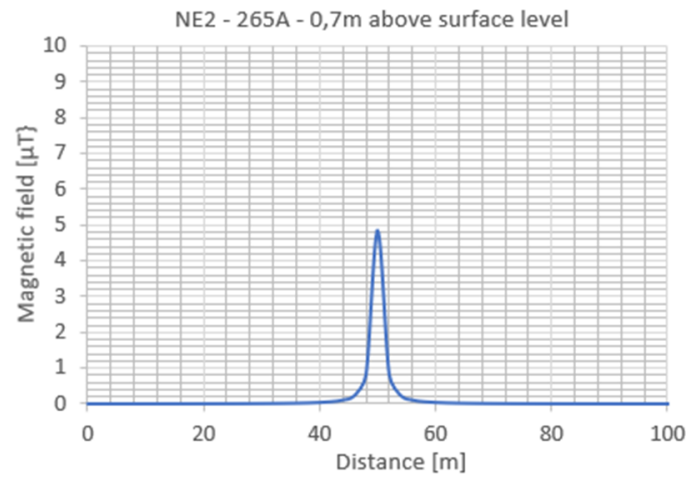
Mynd 14 Útreiknað segulsvið í 0,7 m hæð. Straumur 204 A

4.1.3 Nesjavallalína 2, 132 kV jarðstrengur

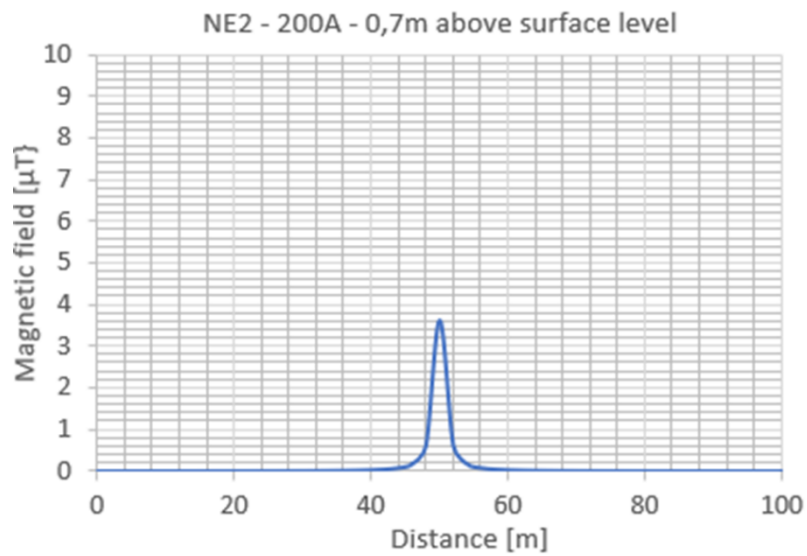
Nesjavallalína 2 er um 25 km langur, 132 kV jarðstrengur, frá Nesjavöllum að Geithálsi. Erfiðlega gekk að ná góðri mælingu á segulsviðinu, en það var reiknað fyrir þrjú straumgildi; 450 A, 265 A og 200 A. Niðurstöðurnar eru sýndar á myndum 15, 16 og 17.



Mynd 15 Útreiknað segulsvið í 0,7 m hæð. Straumur 450 A



Mynd 16 Útreiknað segulsvið í 0,7 m hæð. Straumur 265 A

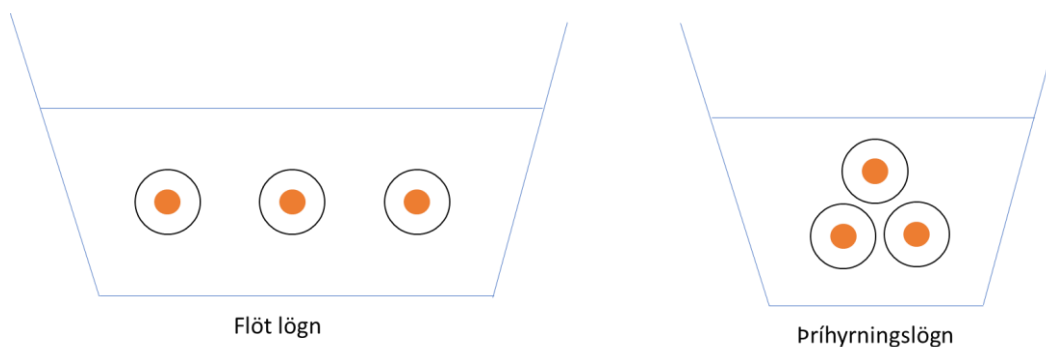


Mynd 17 Útreiknað segulsvið í 0,7 m hæð. Straumur 200 A

4.2 Samantekt

Viðmiðunarmörkin fyrir stöðuga dvöl í raf- og segulsviði eru gefin í töflu 1; 5 kV/m fyrir rafsvið og 200 μ T fyrir segulsvið. Eins og fram kemur í þessari skýrslu eru raungildin (mæld) vegna raflína (loftlína og jarðstrengja) alltaf langt innan þessara marka. Útreikningarnir byggja á þeim eðlisfræðilegu lögmálum sem stýra geisluninni og þeim ber vel saman við mælingar.

Eins og áður segir þá er rafsviðið háð spennunni á línunni (sterkara rafsvið umhverfis 220 kV línu en 132 kV), en segulsviðið háð straumnum. Einn þáttur enn ræður þó styrk segulsviðsins. Það er uppröðun leiðaranna. Þetta sést best hjá jarðstrengjum. Þeir eru ýmist lagðir í sk. flatrí lögn eða þríhyrningslögn, sjá mynd 18.



Mynd 18 Flöt lögn jarðstrengs (vinstra megin) og þríhyrningslögn (hægra megin)

Innbyrðis áhrif leiðaranna hvers á annan í þríhyrningsuppröðuninni eru mun sterkari en í flötu lögninni, svo heildarsegulsviðið «út á við» er talsvert minna. Þetta sést glögglega þegar útreikningarnir á segulsviðinu út frá BU4 og NE2 eru bornir saman. BU4 er í flatrí lögn og styrkur segulsviðsins yfir honum er mun meiri en yfir NE2 miðað við sama (svipaðan) straumstyrk (sjá t.d. myndir 13 og 16).

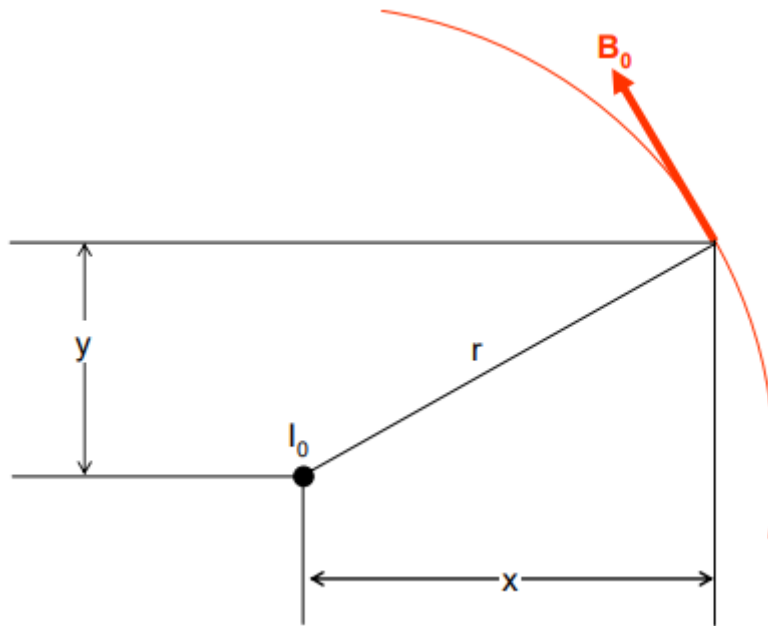
5 Heimildir

- [1] „Externalities of Overhead High Voltage Power Lines,” CIGRÉ WG C3.08, 2015.
- [2] „Exposure to extremely low frequency fields, Fact sheet,” WHO, 2007.
- [3] „2020:04 Recent Research on EMF and Health Risk, Fourteenth Report from SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields,” SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields, 2019.
- [4] „Magnetfelter fra højspændingsanlæg - Viden om virkning på mennesker,” COWI A/S, 2017.
- [5] „Om magnetfelter,” Energibranchens magnetfeltudvalg, 2021.
- [6] WHO, „Extremely low frequency fields, Environmental Health Criteria 238,” World Health Organization, 2007.
- [7] *Reglugerð um háþörk geislunar starfsmanna og almennings vegna starfsemi þar sem notuð er geislun, 1290/2015*, Velferðarráðuneytið, 2015.
- [8] „ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz - 200 kHz),” Health Physics 99(6):818-836, 2010.
- [9] „ICNIRP Statement. Gaps in knowledge relevant to the "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz - 200 kHz),” Health Physics 118(5):533-542, 2020.
- [10] „EMF Factsheet 3: Electric and magnetic field strengths,” Transpower, 2017.
- [11] „EMFs.info,” National Grid UK, 2021. [Á neti]. Available: <https://www.emfs.info/sources/underground/>. [Skoðað 9 April 2021].
- [12] „A tutorial on how to calculate the fields from a power line,” National Grid, [Á neti]. Available: <https://www.emfs.info/wp-content/uploads/2014/07/Howto calculatethemagneticfieldfromathree.pdf>. [Skoðað 13 April 2021].

Viðauki 1. Segulsviðsútreikningur

Útreikningur á styrk segulsviðs er byggður á eðlisfræðinni. Hér er tæpt á því helsta við útreikning á segulsviðsstyrk frá þriggja fasa straumrás. Þessi samantekt er tekin beint frá National Grid [11].

Byrjum á að skoða einn fasa, með strauminn I_0 . Segulsviðið, sem myndast af völdum straumsins myndir sammiðja hringi umhverfis leiðarann, sjá mynd:



Gert er ráð fyrir því að straumurinn stefni út úr blaðsíðunni og þá hefur segulsviðið í punktinum (x, y) stefnuna B_0 .

Styrkur segulsviðsins er auðfundinn með lögmáli Ampers:

$$B_0 = \frac{\mu_0 I_0}{2\pi r}$$

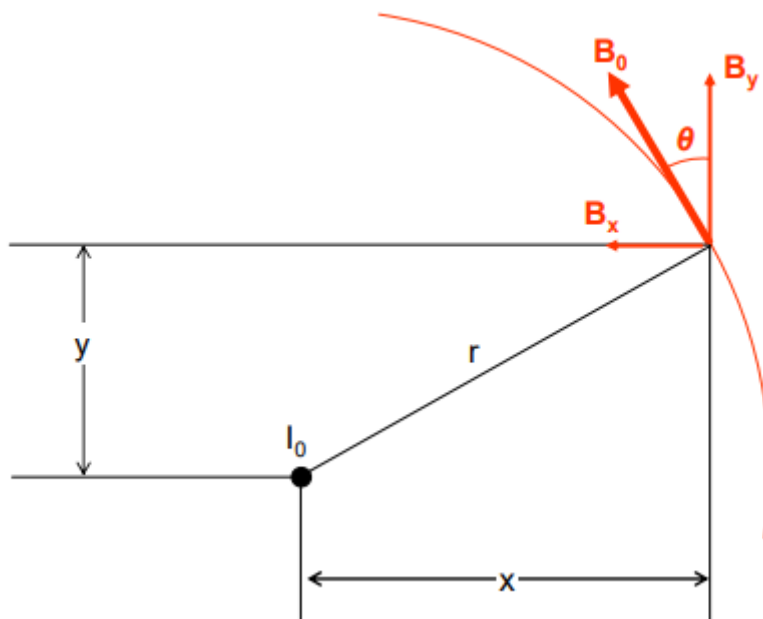
og fjarlægðina r má finna með reglu Pýþagorasar:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

Þá fæst:

$$B_0 = \frac{\mu_0 I_0}{2\pi \sqrt{x^2 + y^2}}$$

Næsta skref er að skipta B_0 í láréttan og lóðréttan þátt (B_x og B_y), eins og sýnt er á næstu mynd:



Hornafræði gefur okkur að

$$B_x = -B_0 \sin(\theta)$$

$$B_y = B_0 \cos(\theta)$$

Reiknum svo út $\sin(\theta)$ og $\cos(\theta)$:

$$\cos(\theta) = \frac{x}{r} = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}$$

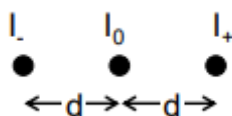
$$\sin(\theta) = \frac{y}{r} = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}$$

Stingum þessu, ásamt formúlunni fyrir B_0 , svo inn í formúlurnar fyrir B_x og B_y :

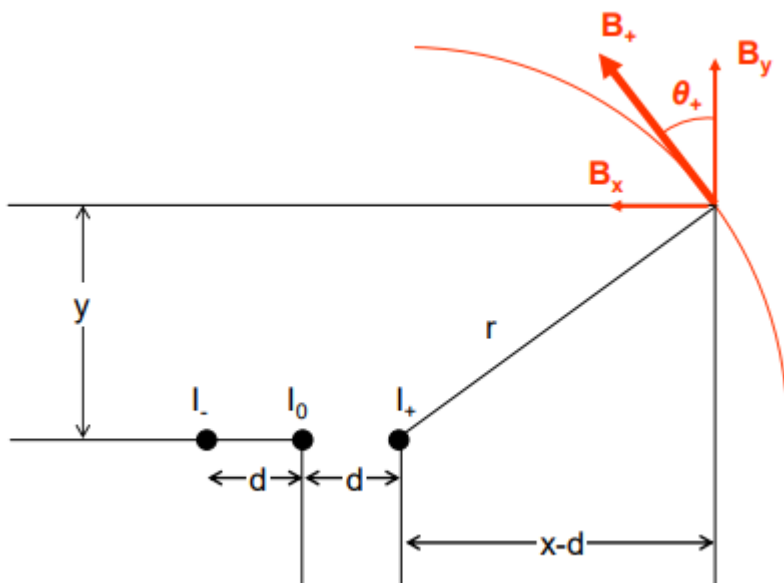
$$B_x = -\left(\frac{\mu_0 I_0}{2\pi\sqrt{x^2 + y^2}}\right)\left(\frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) = -\frac{\mu_0 I_0 y}{2\pi(x^2 + y^2)}$$

$$B_y = \left(\frac{\mu_0 I_0}{2\pi\sqrt{x^2 + y^2}}\right)\left(\frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) = \frac{\mu_0 I_0 x}{2\pi(x^2 + y^2)}$$

Þarna eru sem sagt komnir láréttur og lóðréttur þættir segulsviðsvektorsins í punktinum (x, y) af völdum straums í einum leiðara. Við erum hins vegar á höttunum eftir segulsviði af völdum þriggja fasa straums. Það þarf því að bæta við áhrifum frá hinum tveimur fösunum. Best er að skoða þetta út frá dæmi með þremur samsíða fasaleiðurum í plani, með bilinu d á milli:



Straumarnir eru kallaðir I_- , I_0 og I_+ og á milli þeirra eru 120° . Skoðum svo nánar segulsviðið sem straumurinn I_+ veldur:



Eini munurinn á þessu og sviðinu vegna I_0 er tilfærslan d , þ.e. $x-d$ kemur í stað x í formúlunum fyrir B_x og B_y :

$$B_x = -\frac{\mu_0 I_0 y}{2\pi((x-d)^2 + y^2)}$$

$$B_y = \frac{\mu_0 I_0 (x-d)}{2\pi((x-d)^2 + y^2)}$$

Formúlurnar fyrir I_- eru nákvæmlega eins, nema í stað $x-d$ kemur $x+d$.

Þá erum við með rúmfræðilega þætti (e. geometrical factors) fyrir lárétta og lóðrétta þætti allra straumanna þriggja:

	I_-	I_0	I_+
B_x	$-\frac{\mu_0 y}{2\pi((x+d)^2 + y^2)}$	$-\frac{\mu_0 y}{2\pi(x^2 + y^2)}$	$-\frac{\mu_0 y}{2\pi((x-d)^2 + y^2)}$
B_y	$\frac{\mu_0 (x+d)}{2\pi((x+d)^2 + y^2)}$	$\frac{\mu_0 x}{2\pi(x^2 + y^2)}$	$\frac{\mu_0 (x-d)}{2\pi((x-d)^2 + y^2)}$

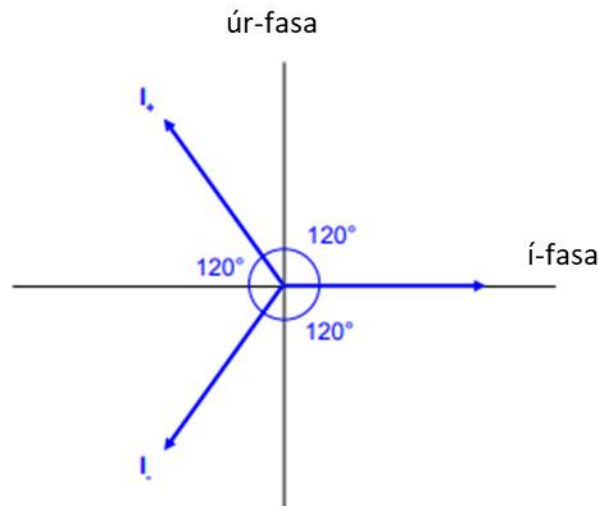
Í þriggja fasa, jafnlægu kerfi eru straumarnir jafn stórir en 120° á milli þeirra, þ.e.

$$I_- = I \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$I_0 = I \sin(\omega t)$$

$$I_+ = I \sin(\omega t + 120^\circ)$$

Til þess að komast áfram, þarf að leysa hvern straum upp í tvo þætti; í-fasa og úr-fasa:



Með smá hornafallaleikfimi fæst eftirfarandi sundurliðun:

	I_i	I_0	I_u
$I_{i\text{-fasa}}$	$-\frac{1}{2}I$	I	$-\frac{1}{2}I$
$I_{úr\text{-fasa}}$	$-\frac{\sqrt{3}}{2}I$	0	$\frac{\sqrt{3}}{2}I$

Þá erum við komin með næg verkfæri í hendurnar til þess að reikna, fyrir hvern straum, fjóra þætti fyrir segulsviðið:

- Í-fasa lóðréttur
- Úr-fasa lóðréttur
- Í-fasa láréttur
- Úr-fasa láréttur

Til þess að sjá hvernig það er gert skulum við taka sem dæmi úr-fasa lóðréttu þátt sviðsins vegna I_+ :

Rúmfræðilegi þátturinn (e. geometrical component) er

$$\frac{\mu_0(x-d)}{2\pi((x-d)^2 + y^2)}$$

Straumþátturinn:

$$\frac{\sqrt{3}}{2}I$$

Styrkur sviðsins vegna þessa þáttar:

$$\frac{\mu_0(x-d)}{2\pi((x-d)^2 + y^2)} \frac{\sqrt{3}}{2}I$$

Heildarstyrkur úr-fasa lóðréttu þáttar segulsviðsins er summa úr-fasa lóðréttu þáttanna vegna straums í hverjum fasa fyrir sig, þ.e.

$$B_{úr\text{-fasa},y} = \frac{\mu_0(x-d)}{2\pi((x-d)^2 + y^2)} \frac{-\sqrt{3}}{2}I + \frac{\mu_0 x}{2\pi(x^2 + y^2)} 0I + \frac{\mu_0(x-d)}{2\pi((x-d)^2 + y^2)} \frac{\sqrt{3}}{2}I$$

Á sama hátt má reikna þá þrjá þætti sem eftir eru, þ.e.

$$B_{i-fasa,x} \quad B_{i-fasa,y} \quad B_{úr-fasa,x}$$

Heildarstyrkur segulsviðsins er svo einfaldlega fundinn á eftirfarandi hátt:

$$B_{heild} = \sqrt{B_{i-fasa,x}^2 + B_{i-fasa,y}^2 + B_{úr-fasa,x}^2 + B_{úr-fasa,y}^2}$$