

ÕHULIIN-MAAKAABEL VÕRDLUSUURING

Uuringu lõpparuanne

Uuringu tellija:

- **Elering AS**

Uuringu tellijapoolne kontaktisik:

- **Priit Heinla**

Uuringu täitjapoolne kontaktisik:

- **Paul Taklaja**

The logo for Elering, featuring the word "elering" in a lowercase, teal-colored, sans-serif font.The logos for TalTech and Tallinn University of Technology. On the left, "TAL TECH" is written in a bold, magenta, sans-serif font, with "TAL" stacked above "TECH". To its right is a vertical magenta line. To the right of the line, "TALLINNA TEHNICAÜLIKOOLOO" is written in a smaller, magenta, sans-serif font, stacked in two lines.

Tallinna Tehnikaülikool

Telefon: 620 2002

E-post: info@taltech.ee

Ehitajate tee 5, 19086 Tallinn

SISUKORD

Sisukord.....	2
Sissejuhatus.....	3
Vahelduvvoolu liinides edastatavad võimsused	4
Õhu- ja kaabelliinide genereeritavad reaktiivvõimsused	6
Õhu- ja kaabelliinide reaktiivvõimsuste kompenseerimine.....	8
Probleemid tekkiva kaosoojusega	14
Kaitsevööndid ja liinikoridorid	20
Kaablirikked ja rikete kestus	23
Kaablite hind ja kaabelliini rajamise maksumus	28
Kokkuvõtte õhuliinide ja kaabelliinide eelistest ning puudustest.....	32
Erinevatest õhu- ja maakaabelliini lõikudest koosnev nn kombineeritud ülekandeliin	34
Kokkuvõtte	36
Ekspert hinnangu järelendus	37
Kasutatud kirjandus	38

SISSEJUHATUS

Antud eksperthinnangus on toodud peamised erinevused vahelduvvoolu kõrge- ja ülikõrgepingele õhu- ning kaabelliinide vahel. Eksperthinnangu eesmärgiks on selgitada peamisi lähtekohti ning valikuid tulevaste 110 ja/või 330 kV liinide rajamisel. Eksperthinnangu esmane versioon valmis 2013 aastal, kui tekkis vajadus selgitada tollal rajatava Harku–Lihula–Sindi 330/110 kV liini erinevaid konfiguratsioone. Praegu on sarnased küsimused tõstatunud seoses nii Eesti–Läti neljanda 330 kV vahelduvvoolu elektriühenduse rajamisel, täpsemalt Saaremaal eelistatud trassialternatiivil Mägi-Kurdla ja Kotlandi alajaamade vahel, kui ka EstLink 3 planeeringu raames, kus rajada tuleb samuti uusi vahelduvvoolu ühendusi põhivõrkku (nt Aulepa–Rehemäe ning Kindluse–Aruküla alajaamade vahel).

Eesti põhivõrgu ettevõtte Elering AS-i transiitelektrivõrgus kasutatakse peamiselt nimi-pingeklasse 330 ja 110 kV. Võimsad, 330 kV nimipingega transiitelektriliinid moodustavad Eesti elektrivõrgu nn selgroo ning ühtlasi ühendavad meid sünkroonselt ka naaberelektrisüsteemiga (Läti Vabariik). Rikked selles võrgus võivad seega mõjutada väga suurt hulka tarbijaskonda. Pikaajalised rikked 330 kV elektriliinidel ning -võrgus ohustavad selgelt kogu võrgu tõrke- ja talitluskindlust (nt $n-1$ kriteerium) ning mõjutavad selliselt elektrisüsteemi kui terviku toimimist. 110 kV nimipingega ülekandeliinid kannavad edasi väiksemaid võimsuseid ning on olulisteks lülideks siseriiklikul elektrienergiaülekandel. Rikked 110 kV võrgus võivad samuti mõjutada üsna olulisel määral tarbijaid, kuid kogu elektrisüsteemi toimimisele on mõju üldjuhul tagasihoidlik.

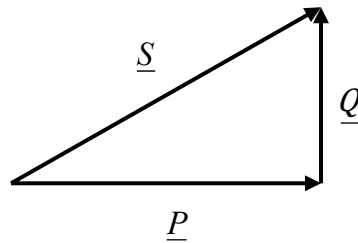
Tänapäeva madal- ja keskpinge (Eestis vastavalt 0,4 kV ja 6–35 kV) elektrijaotusvõrkudes on õhuliinide asemel aina enam hakatud kasutama maakaabelliine. Seda eriti just linnades ning suuremates asulates, kus elektrienergia tarbimine on suurem ning kliente rohkem. Maakaablid asetatakse üldjuhul ca 1 meetri sügavusele pinnasesse. Viimastel kümnenditel on maakaabelliinide laiem leviku teinud võimalikuks kaablite kvaliteedi jätkuv paranemine ning liini rajamise hindade langemine. Kaabelliinide vaieldamatuks eeliseks on visuaalse reostuse vähesus, suur ilmastikukindlus ja liinitrassi hooldamise vajaduse puudumine või selle oluline vähenemine.

Kuna aina enam madal- ja keskpingeliine rajatakse tihedama asustusega piirkondades maakaabelliinidenä, siis on inimestel tekkinud lihtsustatud eeldus, et ilma suurema kulu- või probleemideta võib tulevikus kõik vahelduvpinge õhuliinid asendada maakaabelliinidega. Tegelikuses aga tuleb arvestada asjaoludega, et vahelduvvoolu kõrge- ja ülikõrgepingeliinide (110 ning 330 kV) korral on juba pelgalt kehtivate füüsikaseaduste tõttu kaablite kasutamine tehniliselt oluliselt keerukam ning seega ka märkimisväärselt kallim kui õhuliinide puhul. Olulised erinevused on ka potentsiaalsete rikete arvudes ja nende kestustes, mis omakorda mõjutavad kogu elektrisüsteemi talitlus- ning tõrkekindlust.

Eksperthinnangu sisu on reastatud võimalikult loogilises järjestuses, seda parima ülevaate saamiseks ning teema hõlpsamaks ja kiiremaks mõistmiseks. Järgnevates peatükkides on toodud peamised positiivsed ning negatiivsed erinevused vahelduvvoolu kõrge- ja ülikõrgepingele õhu-, kaabel- ning kombineeritud liinide vahel.

VAHELDUVVOOLU LIINIDES EDASTATAVAD VÕIMSUSED

Vahelduvpingeliin kannab edasi näivvõimsust (joonis 1). Näivvõimsus koosneb aktiiv- ja reaktiivvõimsuse komponentidest. Elektritarnijatele on oluline üle kanda aktiivvõimsust.



Joonis 1. Näiv-, aktiiv- ja reaktiivvõimsuste vektordiagramm

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1)$$

kus:

S – näivvõimsus (VA)

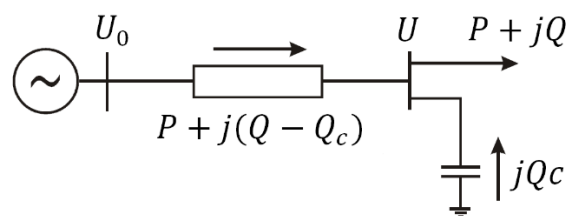
P – aktiivvõimsus (W)

Q – reaktiivvõimsus (VAr)

Reaktiivvõimsust edastada pole elektrivõrgus otstarbekas, kuna see suurendab energiakadusid ja pingekadu. Reaktiivvõimsust on otstarbekam genereerida ning tarbida kohapeal, aktiivvõimsuse tarbija lähedal. Kadude vähenemise kõrval suureneb sel juhul ka liinide ja trafode läbilaskevõime ning paraneb pinge kvaliteet. Aktiivvõimsuse osakaalu suurendamiseks ning reaktiivvõimsuse osakaalu vähendamiseks edastatavas näivvõimsuses tuleb reaktiivvõimsust liinis kompenseerida.

Elektrivõrgus loetakse induktiivset elementi reaktiivvõimsuse tarbijaks ning mahtuvuslikku elementi reaktiivvõimsuse tootjaks.

Järgnevalt vaadeldakse lihtsat võrku (joonised 2 ja 3), mis koosneb toiteallikast (sõlm 0) ja tarbijast (koormusega $\underline{S} = P + jQ$) toitvast liinist. Tarbija juurde on paigaldatud reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks (joonis 2 korral) kondensaatorpatarei võimsusega Q_c ja jooni 3 korral šuntreaktor võimsusega Q_x .



Joonis 2. Reaktiivvõimsuse kohalik kompenseerimine, selle genereerimine. [1] [2]

Liinis edastatav võimsus $\underline{S}_L = P + j(Q - Q_c)$ või $\underline{S}_L = P + j(Q + Q_x)$ ning võimsus- ja pingekao vähenemine tingituna reaktiivvõimsuse kompenseerimisest ilmneb ligikaudsetest valemitest (2–5).

$$\Delta P = \frac{P^2 + (Q - Q_c)^2}{U_n^2} \cdot R \quad (2)$$

$$\Delta U = \frac{P \cdot R + (Q - Q_c) \cdot X}{U_n} \quad (3)$$

kus:

ΔP – liini aktiivvõimsuskadu

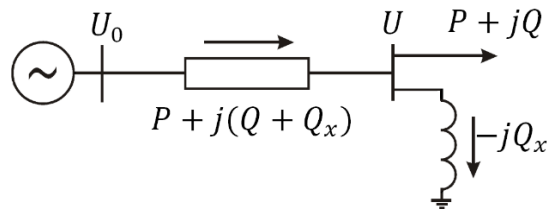
ΔU – liini pingekadu

$-Q_c$ – liinis edastatav reaktiivvõimsus, selle tarbimine

R – liini aktiivtakistus

X – liini reaktiivtakistus

U_n – liini nimipinge



Joonis 3. Reaktiivvõimsuse kohalik kompenseerimine, selle tarbimine.

$$\Delta P = \frac{P^2 + (Q + Q_x)^2}{U_n^2} \cdot R \quad (4)$$

$$\Delta U = \frac{P \cdot R + (Q + Q_x) \cdot X}{U_n} \quad (5)$$

kus:

$+Q_x$ – liinis edastatav reaktiivvõimsus, selle tootmine

Kuna reaktiivvõimsuse tarbimine ja tootmine sõltub ka aktiivvõimsuse tarbimisest, on liinides edastatavate reaktiivvõimsuste kompenseerimisvajadus ilmne. Elektrisüsteemi suurimateks reaktiivvõimsuse tarbijateks on üldjuhul trafod ja elektrimootorid ning vajadusel ka sünkroongeneraatorid. Elektrisüsteemi suurimateks reaktiivvõimsuse tootjateks on enamjaolt ülekandeliinid ning kondensaatorpatareid ja vajadusel ka sünkroongeneraatorid.

Kui kõrgepingeelektrivõrgus on tarbimine suhteliselt väike, siis võib elektrivõrk toota reaktiivvõimsust liigselt ning seda ülejääki tuleb šuntreaktoritega tarbida. Kui elektrivõrgus on tarbimine suhteliselt suur, siis võib elektrivõrgu toodetud reaktiivvõimsusest jääda vajaka ning sel juhul tuleb puudujääv osa kondensaatorpatareide ja/või sünkroonkompensaatoritega toota.

Olenemata pingeklassist jaotuvad vahelduvvoolu õhuliinide parameetrid (pikiinduktiivsused, põikimahtuvused) tehnilises mõttes küllaltki sobilikult, sest nende vajadus reaktiivvõimsuse kompenseerimisele on üsnagi mõõdukas. Kõrge- ja ülikõrgepinge vahelduvvoolu kaabelliinide korral on aga olukord oluliselt komplitseeritum.

ÕHU- JA KAABELLIINIDE GENEREERITAVAD REAKTIIV-VÕIMSUSED

Õhuliinide faasijuhid asuvad üksteisest ning maapinnast suhteliselt kaugel. Maakaabelliinide faasijuhid asuvad üksteisele ning maapinnale oluliselt lähemal, peamiselt seetõttu on kaabelliinide mahtuvused ca 10–20 korda suuremad kui õhuliinide mahtuvused. Suured mahtuvused aga põhjustavad suuremaid genereeritavaid reaktiivvõimsuseid kaabelliinide poolt.

Pikka kaabelliini võib võrrelda suure mahtuvusega kondensaatoriga. Mida suurem on mahtuvus või laadimispinge, seda suuremad on ka kondensaatori laadimisvoolud ja selle genereeritavad reaktiivvõimsused. See tähendab, et mida pikem liin ja mida suurem liinipinge, seda suurem on ka kaabli laadimisvool (6) ning genereeritav reaktiivvõimsus (7).

$$I_f = U_f \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_f \quad (6)$$

kus:

I_f – kondensaatori laadimisvool (elektriliini faasivool) (A)

U_f – kondensaatori pinge (elektriliini faasipinge) (V)

π – konstant

f – elektrivõrgu sagedus (Hz)

C_f – kondensaatori mahtuvus (elektriliini faasimahtuvus) (F)

$$Q_f = U_f^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_f \quad (7)$$

kus:

Q_f – kondensaatori (elektriliini ühes faasis) genereeritav reaktiivvõimsus (VAr)

Valemitest (6) ja (7) nähtub, et kaabelliinide 10–20 korda suuremad mahtuvused põhjustavad ka ligi 10–20 korda suuremaid laadimisvoolu ning genereeritavaid reaktiivvõimsusi. Oluline on siinjuures märkida asjaolu, et genereeritavat reaktiivvõimsust nii õhu- kui ka maakaabelliinide korral mõjutab enim liini pingeklass. Järgnevates tabelites 1 ja 2 on toodud tekkivate laadimisvoolude ning reaktiivvõimsuste erinevused õhu- ja kaabelliinide korral.

Tabel 1 on näitena toodud ühe ja sama õhuliini korral (330 kV üheaheelaline õhuliin, mille faasijuhiks on kolmeste lõhisfaasidega 3x402 mm² standardsed alumiiniumjuhid; õhuliini faasijuhi mahtuvuseks on arvutustes võetud 133 nF/km; õhuliini faasijuhi suurimaks lubatavaks kestevvoolu väärtuseks on võetud 2 300 A) tekkivad mahtuvuslikud laadimisvoolud ning genereeritavad reaktiivvõimsused erinevate liinipingete korral.

Tabel 1. Õhuliin

U_l	I_f	Q_l	S_l	I
kV	mA/km	kVAr/km	MVA	km
330	800	455	1 320	2 880
110	270	50	440	8 650
20	55	8	80	43 230

Tabel 2 on näitena toodud ühe ja sama kaabli korral (2 500 mm² vaskjuhiga ja 25 mm XLPE isolatsiooniga; kaabelliini faasijuhi mahtuvuseks on arvutustes võetud 2 500 nF/km; kaabelliini faasijuhi suurimaks lubatavaks kestevvoolu väärtuseks on võetud 1 345 A) tekkivad mahtuvuslikud laadimisvoolud ning genereeritavad reaktiivvõimsused erinevate liinipingete korral.

Tabel 2. Kaabelliin

U_l	I_f	Q_l	S_l	l
kV	mA/km	kVAr/km	MVA	km
330	15 000	8 550	770	90
110	5 000	950	255	270
20	900	140	45	1 480

kus:

U_l – liinipinge,

I_f – faasijuhis tekkiv mahtuvuslik laadimisvool ühe liinikilomeetri kohta,

Q_l – liini poolt genereeritav reaktiivvõimsus ühe liinikilomeetri kohta,

S_l – liini edastatav näivvõimsus faasijuhile suurima lubatava kestevvoolu väärtuse korral,

l – liini pikkus, kui laadimisvoolu väärtus võrdub faasijuhile suurima lubatava kestevvoolu väärtusega.

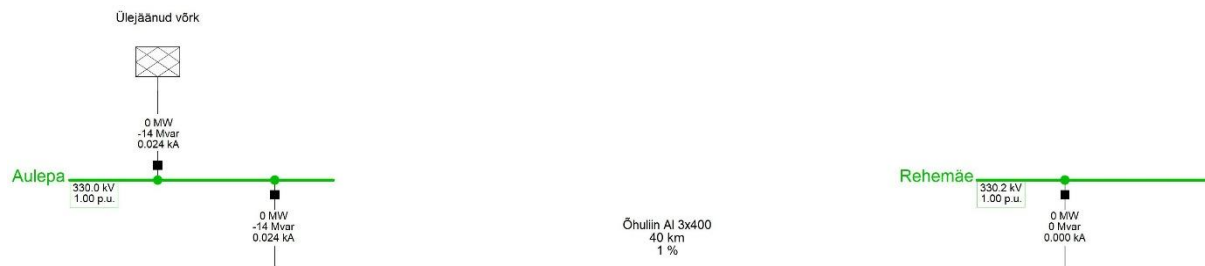
Tabelites 1 ja 2 toodud väärtused on ligikaudsed ning mõeldud võimalikult näitliku ülevaate saamiseks. Arvutused on tehtud lihtsustatult, liinide koondparameetrite alusel. Tabelites näidatud tulp l on toodud laadimisvoolu mõju lihtsaks hindamiseks liini läbilaskevõimele, selle praktiline väärtus, eriti õhuliinide korral, on tagasihoidlik. Pikemate liinide kui 200...300 km tuleb õigete arvutuste saamiseks arvestada liini jaotatud parameetritega. Seda eelkõige seetõttu, et väga pikkade liinide korral on liinide pikkused võrreldavad juba liini lainepikkusega λ ning arvestada tuleb ka laineprotsessi mõjudega.

Tabelitest 1 ja 2 nähtub, et näitena toodud kaabelliini ca 19 korda õhuliinist suurem mahtuvus põhjustab ka sama arv korda suuremaid laadimisvoolusid ning genereeritavaid reaktiivvõimsuseid. Eriti ilmeks on tulp l tabelis 2, kust selgub, kui 330 kV maakaabelliini korral ületada ca 90 km piir, siis ületab laadimisvool kaabli suurimat lubatavat kestevvoolu. Siit võib järeldada, et järelikult pole üheainsa üle 90 km pika reaktiivvõimsuse kompenseerimiseta kaabelliini ehitamine mõttekas, kuna – piltlikult öeldes – kaabel lihtsalt sulaks ära, kui see vooluvõrku lülitada.

ÕHU- JA KAABELLIINIDE REAKTIIVVÕIMSUSTE KOMPENSEERIMINE.

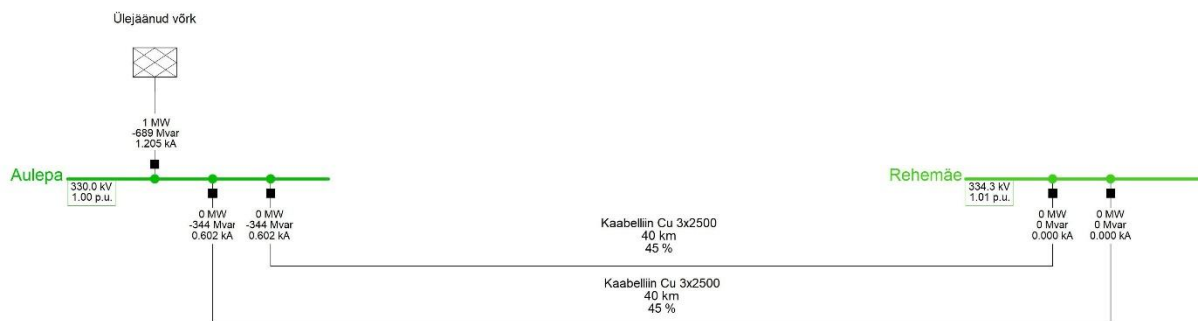
Nagu eelpool mainitud, jaotuvad vahelduvvoolu õhuliinide parameetrid (pikiinduktiivsused, pöikimahtuvused), olenemata nende pingeklassidest tehnilises mõttes küllaltki sobilikult, sest nende vajadus reaktiivvõimsuse kompenseerimisele on üsnagi mõõdukas.

Järgnevalt on toodud näiteid tulevikus rajatava EstLink 3 seotud Aulepa-Rehemäe ja Kindluse-Aruküla (nn Tallinna ringliin) 330 kV liinide alusel, kus mõlema liini kogupikkuseks on planeeritud *ca* 40 km. Joonis 4 on toodud nn lihtne võrk, mis koosneb toiteallikast (sõlm Aulepa), õhuliinist (Aulepa-Rehemäe) ja tarbijast (sõlm Rehemäe), mille koormuseks 0 ehk liin on nn tühijooksul.



Joonis 4. Aulepa–Rehemäe 330 kV kompenseerimata üheaheelalise õhuliini modelleerimine

Joonis 4 on näha modelleerimisprogrammiga DigSILENT PowerFactory tehtud arvutused. Tühijooksul oleva Aulepa–Rehemäe õhuliini mahtuvustest põhjustatud laadimisvoolud (24 A) piiravad liinil voolu läbilaskevõimet 1% ulatuses ning genereeritud reaktiivvõimsuse (-14 MVAR) tulemusena tekib Rehemäe sõlmes 0,2 kV pingetõus. On ilmne, et vaadeldava õhuliini reaktiivvõimsuse kompenseerimisvajadus on mõõdukas.



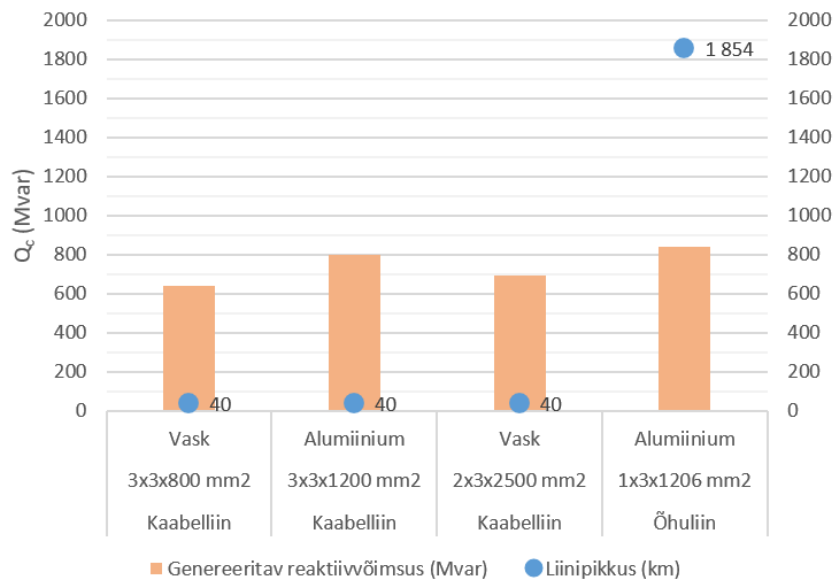
Joonis 5. Aulepa–Rehemäe 330 kV kompenseerimata kaheaheelalise maakaabelliini modelleerimine

Tabelitest 1 ja 2 nähtub, et näitena toodud 2 500 mm² vasest juhiga maakaabelliini edastatav näivvõimsus on *ca* kaks korda väikesem kui õhuliinil, seega tuleb kaabelliin rajada vähemalt kaheaheelalisena. Joonisel 5 on näha, et tühijooksul oleva Aulepa-Rehemäe kaheaheelalise kompenseerimata kaabelliini mahtuvustest põhjustatud laadimisvoolud (1 205 A) piiravad liinil voolu läbilaskevõimet *ca* 45% ulatuses, see tähendab, et tekkivad laadimisvoolud piiravad pea pooles ulatuses liini vooluülekande võimekust. Genereeritud reaktiivvõimsuse (-689 MVAR) tulemusena tekib Rehemäe sõlmes 4,3 kV pingetõus. On ilmne, et vaadeldava kaheaheelalise maakaabelliini reaktiivvõimsuse kompenseerimisvajadus on vältimatu ja suur.

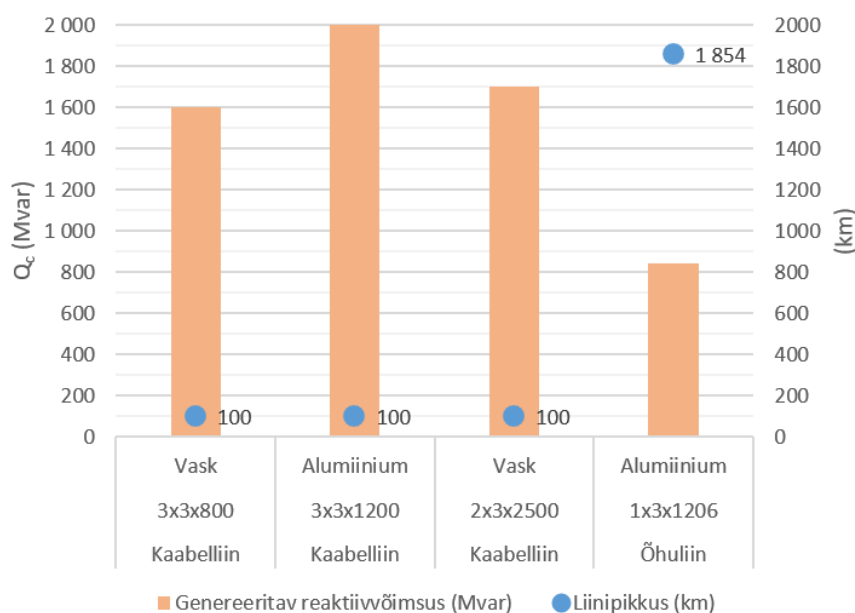
Antud jooniselt 5 on lihtne järeldada, et 2,5 korda pikema ehk 100 km pikkuse kaabelliini korral (nt Mägi-Kurdla – Kotlandi) ületavad laadimisvoolud kaablile lubatavaid kestvaid koormusvoolusid. Piltlikult öeldes – 100 km kaabel lihtsalt sulaks ära, kui see vooluvõrku lülitada.

Aulepa – Rehemäe 40 km pikkuse 2 500 mm² vasest juhiga kaabelliini poolt genereeritav reaktiivvõimsus on ca 690 MVar. Mägi-Kurdla – Kotlandi 100 km pikkusega sarnase kaabliga liini poolt genereeritav reaktiivvõimsus jääb suurusjärku ca 1 730 MVar.

Tasub mainida, et praegune kõikide aegade suurim elektri tiputarbimine Eestis on 1 723 MW (05.02.2026 kl 10:25) [3]. Mägi-Kurdla – Kotlandi kaabelliini poolt genereeritav reaktiivvõimsus oleks selle väärtusega pea võrdne.



Joonis 6. Aulepa – Rehemäe 40 km pikkuse mitmeahelaliste 330 kV kaabelliinide genereeritav reaktiivvõimsus võrreldes terve Eesti 1 854 km õhuliinide poolt genereeritava reaktiivvõimsusega.

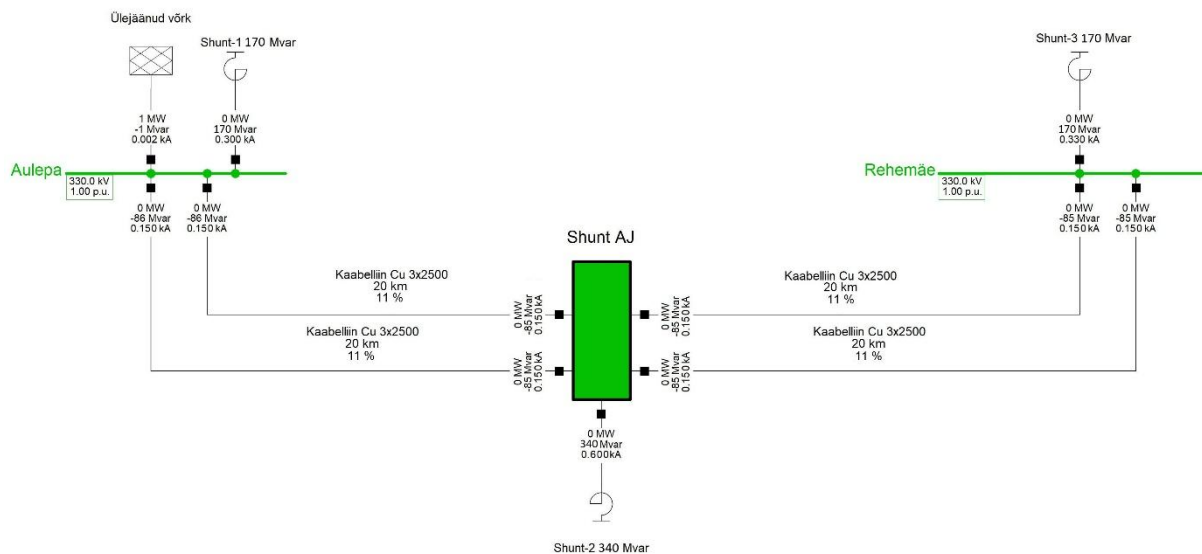


Joonis 7. Mägi-Kurdla – Kotlandi 100 km pikkuse mitmeahelaliste 330 kV kaabelliinide genereeritav reaktiivvõimsus võrreldes terve Eesti 1 854 km õhuliinide poolt genereeritava reaktiivvõimsusega.

Joonistel 6 ja 7 on võrreldud kolme erineva konfiguratsiooniga 40 km pikkusega Aulepa–Rehemäe ja 100 km pikkusega Mägi-Kurdla – Kotlandi kaabelliinide poolt genereeritavaid reaktiivvõimsusi terve Eesti 330 kV elektrivõrgu õhuliinide poolt genereeritavate reaktiivvõimsustega.

Jooniselt 6 nähtub, et suhteliselt lühikene 40 km mitmeahelaline maakaabelliin genereerib pea samas mahus reaktiivvõimsust kui terve Eesti 1 854 km [4] kogupikkusega 330 kV õhuliinid. Jooniselt 7 nähtub, et 100 km mitmeahelaline maakaabelliin genereerib kaks ja enam korda reaktiivvõimsust kui terve Eesti 330kV võrgu õhuliinid kokku.

Eelnevast saab järeldada, et kõrge- ja ülikõrgepinge kaabelliinide korral on reaktiivvõimsuste kompenseerimisvajadus hädavajalik!



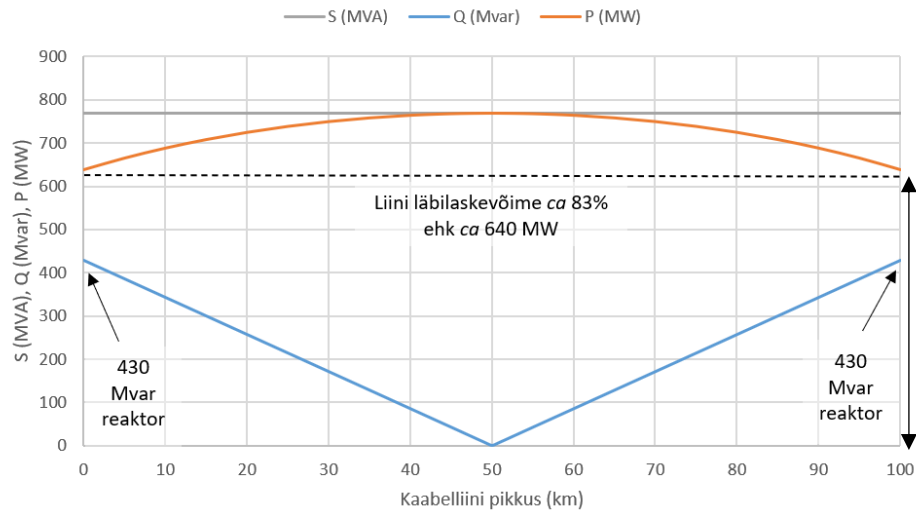
Joonis 8. Aulepa-Rehemäe 330 kV kompenseeritud kaheaahelalise maakaabelliini modelleerimine

Joonisel 8 on näidatud Aulepa–Rehemäe 40 km kompenseeritud kaheaahelalise maakaabelliini modelleerimise tulemusi. Kui võrrelda liinivoolu koormatuse protsenti kompenseerimata liiniga (joonis 5), siis 20 km sammuga liinile ja alajaamadesse paigaldatud reaktiivenergiat tarbivad šuntreaktorid aitavad seda vähendada 45 protsendilt 11 protsendile. See tähendab, et liini läbiva transiitvoolu edastusmaht kasvas 55 protsendilt 89 protsendini.

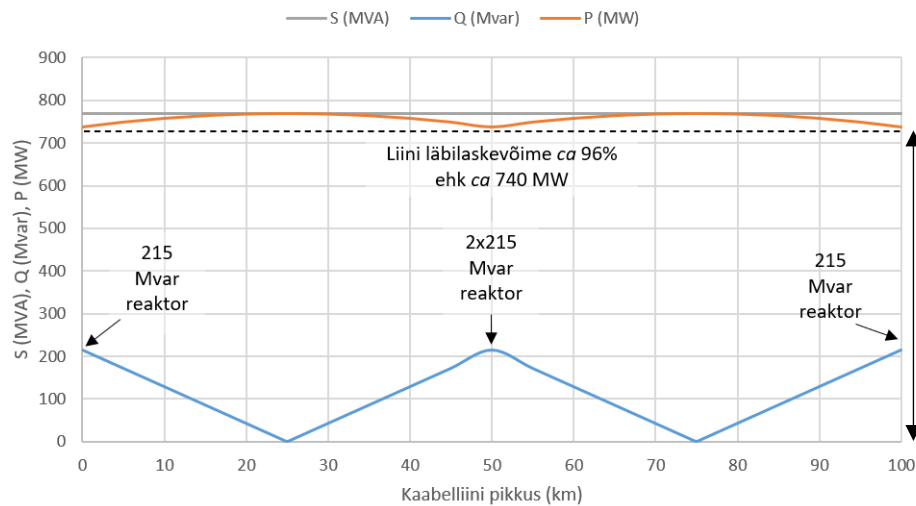
Optimaalse kaabelliini pikkuse, mille järel tuleb reaktiivvõimsust tarbida, määramine on tehnilis-/majanduslik kalkulatsioon. Siin lähtutakse peamiselt kaablite ja šuntreaktorite maksumusest. Kuna kaablis tekkinud mahtuvuslik vool piirab kaabelliini edastusvõimsust ja põhjustab kadusid, siis oleks tehniliselt mõistlik, kui šuntreaktorid asetseksid võimalikult lühikestel kaabli lõikudel, et tekkinud mahtuvuslik vool tarbitaks n-ö kohapeal ning see ei voolaks mööda liinijuhti. Kuna aga šuntreaktorid on väga suure maksumusega elektrivõrgu seadmed, siis eelistatakse neid majanduslikel põhjustel süsteemi lisada nii vähe kui võimalik.

110 kV kaabelliinide korral peetakse optimaalseks lahendust, kui reaktiivvõimsust kompenseerida iga ca 50 km järel. Kompenseerimine 330 kV kaabelliinide korral tähendab aga seda, et kaabli genereeritavat reaktiivvõimsust oleks otstarbekas iga ca 20 km järel šuntreaktoritega tarbida (joonised 11 ja 14).

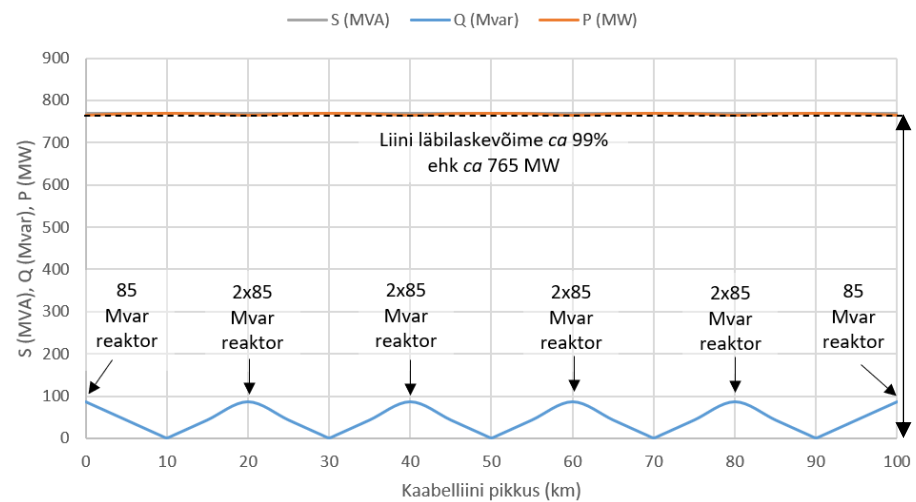
Šuntreaktorite nn sammu tiheduse mõju kaabelliini läbilaskevõimsusele ning -voolule on visualiseeritud järgnevatel joonistel 9 kuni 14.



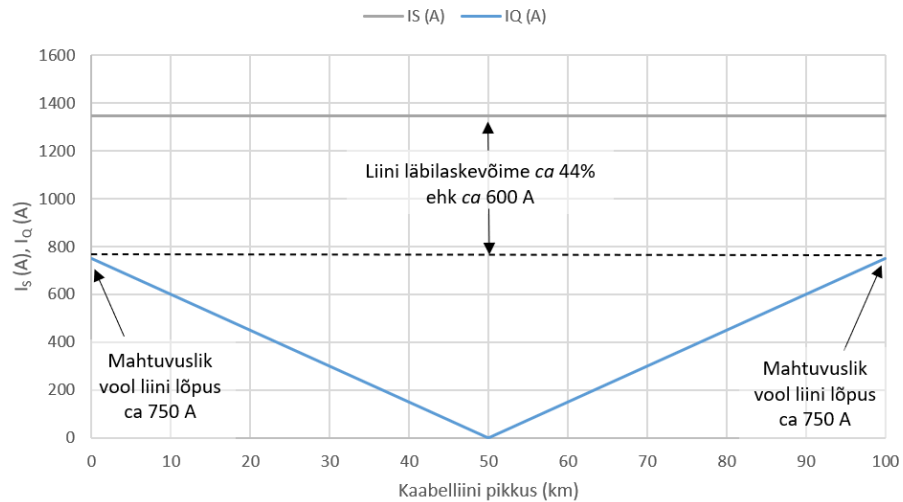
Joonis 9. Üheaheelalise 100 km, 330 kV maakaabelliini reaktiivvõimsuse kompenseerimine liini otstes.



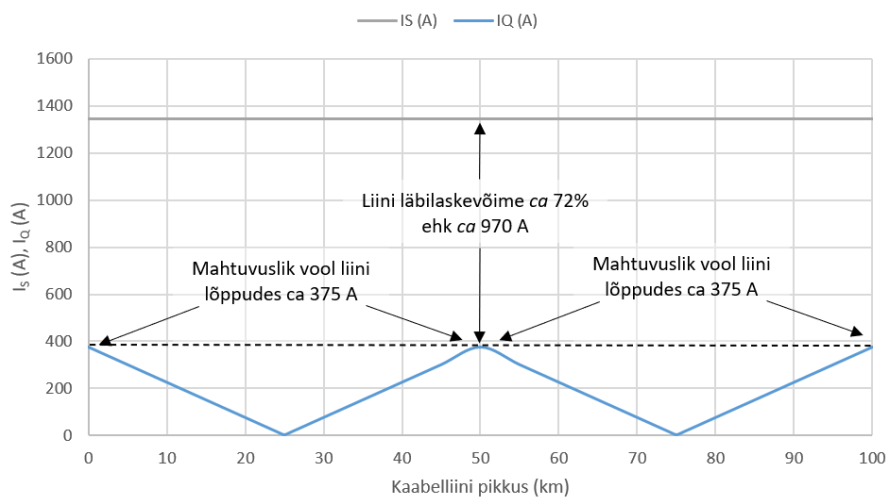
Joonis 10. Üheaheelalise 100 km, 330 kV maakaabelliini reaktiivvõimsuse kompenseerimine liini otstes ja keskel. Šuntreaktorite paiknemissamm 50 km piki liini.



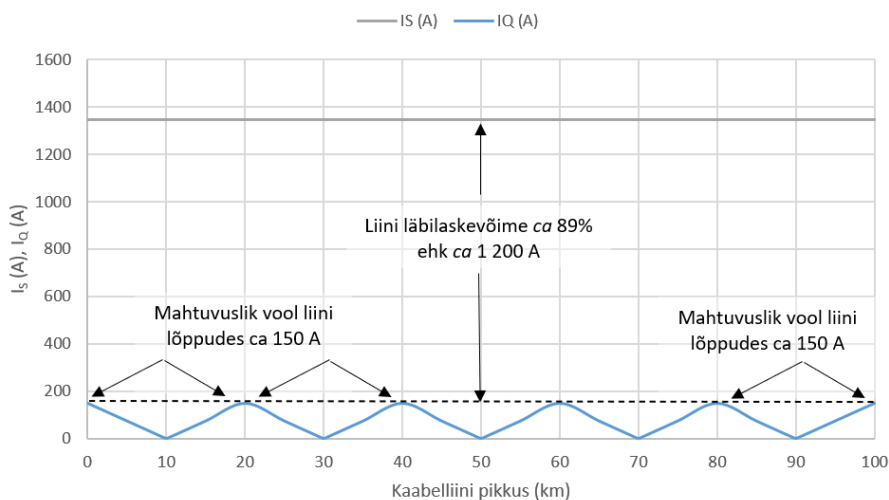
Joonis 11. Üheaheelalise 100 km, 330 kV maakaabelliini reaktiivvõimsuse kompenseerimine liini otstes ja vahel. Šuntreaktorite paiknemissamm 20 km piki liini.



Joonis 12. Üheaheelalise 100 km, 330 kV maakaabelliini reaktiivvõimsuse kompenseerimine liini otstes. Mahtuvuslik vool moodustab ca 56 % liini nimivoolust.



Joonis 13. Üheaheelalise 100 km maakaabelliini reaktiivvõimsuse kompenseerimine liini otstes ja keskel. Šuntreaktorite paiknemissamm piki liini 50 km. Mahtuvuslik vool on ca 28 % liini nimivoolust.



Joonis 14. Üheaheelalise 100 km maakaabelliini reaktiivvõimsuse kompenseerimine liini otstes ja vahel. Šuntreaktorite paiknemissamm piki liini 20 km. Mahtuvuslik vool on ca 11 % liini nimivoolust.

Jooniste 9, 10 ja 11 ning jooniste 12, 13 ja 14 võrdlemisel on märgata, et liini aktiivvõimsuse läbilaskevõimsusele mõjub liinis genereeritav mahtuvuslik reaktiivvõimsus vähem kui seda nt genereeritava mahtuvusliku voolu ja liinile lubatud koormusvoolu korral. Vastavat erisust põhjustab aktiivvoolu ja mahtuvusliku reaktiivvoolu vektorite erinev suund.

Seega kui lähtuda esmaselt liini aktiivvõimsuse läbilaskevõimest, siis justkui võiks leppida 100 km kaabelliini korral kolme šuntreaktori asukohaga liinil, selle otstes ja keskel (joonis 10). Kui aga täiendavalt arvestada elektriliste ja soojuslike püsikadudega, mida põhjustavad kaabelliini suured laadimisvoolud (kaod on võrdelised voolu ruuduga), oleks mõistlikum paigaldada liinile tihedama sammuga ja enam šuntreaktoreid (joonis 14), et kompenseeritavad voolud oleksid võimalikult väikesed.

Ehitatava Mägi-Kurdla – Kotlandi 100 km kaabelliini korral oleks liinile vajalik rajada vähemalt *ca* 6 vastavat reaktiivvõimsuse tarbimise punkti (st jaotada liin viieks, *ca* 20 km pikkusteks osadeks) (joonis 11) ja Aulepa – Rehemäe 40 km kaabelliini (joonis 8) korral oleks liinile vajalik rajada vähemalt *ca* 3 vastavat reaktiivvõimsuse tarbimise punkti (st jaotada liin kaheks, *ca* 20 km pikkusteks osadeks).

Iga selline reaktiivvõimsuse tarbimise punkt koos vajaliku tehnilise seadmestikuga võrdub sisuliselt keskmise suurusega kõrgepinge alajaama rajamisega. Kui jätta välja Mägi-Kurdla ja Kotlandi alajaamad, siis tuleks nende vahelisele 330 kV kaabelliinile rajada veel täiendavalt 4 uut – *reaktiivvõimsuse kompenseerimise* – alajaama. Aulepa-Rehemäe 330 kV kaabelliinile tuleks aga rajada üks täiendav alajaam liini keskele.

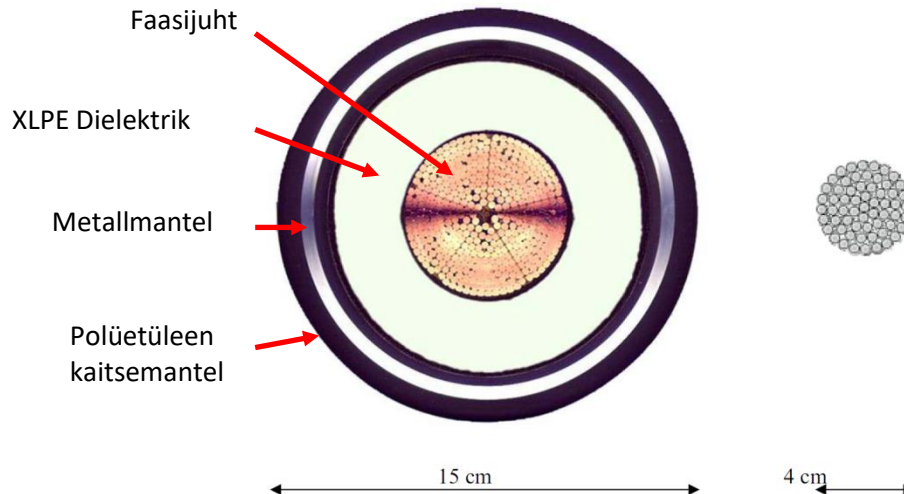
Tuleb märkida, et ülikõrgepingeliste alajaamade rajamine on kulukas ning võimsate ja gabariitidelt suurte šuntreaktorite (joonis 15) hinnad ei erine oluliselt võimsustrafode omast, mis on teatavasti ühed kalleimad ning olulisimad seadmed elektrivõrkudes.



Joonis 15. 400 kV, 160 MVar šuntreaktor reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks, selle tarbimiseks. [5]

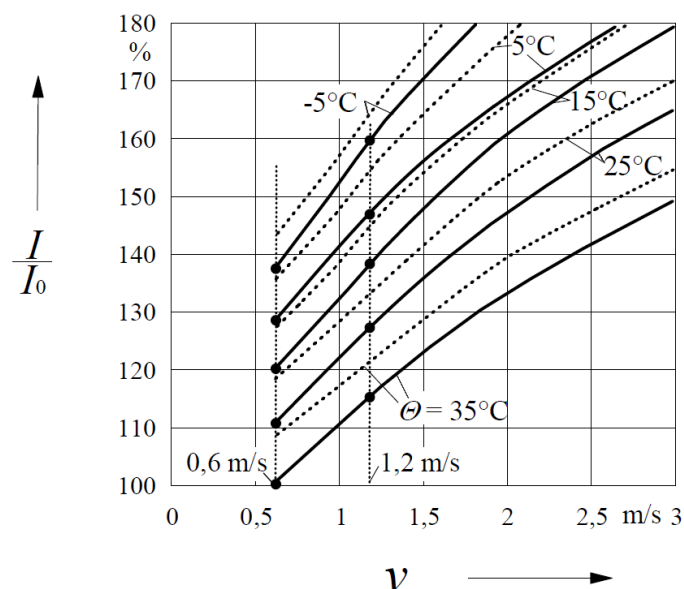
PROBLEEMID TEKKIVA KAOSOOJUSEGA

Vahelduvvoolu maakaabelliinide ja õhuliinide edastatavad võimsused sarnaste elektrijuhi ristlõigete korral erinevad teineteisest oluliselt (joonis 16). Peamiseks probleemiks osutub siin kaovõimsusest tingitud soojuse eemale juhtimine elektrijuhilt – selle jahtumine.



Joonis 16. Maakaabli (vasak) ja õhuliini (parem) faasijuhi suhtelised suurused sarnaste läbilaskevõimsuste korral. [5]

Õhuliinide faasijuhtideks on paljasjuhtmed ning neis eralduv kaosoojus kandub otse edasi juhti ümbritsevale õhule. Liikuv õhk ehk tuul suurendab oluliselt soojusülekannet juhi ja õhu vahel. Külmemate ning tuulisemate ilmade korral saab õhuline olulisel määral n-ö üle koormata (joonis 17).



Joonis 17. Õhuliini ülekoormatavuse potentsiaal, kui faasijuhtideks on 243-AL1/39-ST1A tüüpi juhid. Talutava koormusvoolu I suhte nimivoolu I_0 sõltuvus tuule kiirusest v (tuule suund on faasijuhtidega risti ning puhub neile küljelt) erinevatel õhutemperatuuridel, kus pidevjoon tähistab ilma soojuskiirgusest ja katkendlik joon soojuskiirgusega soojusülekannet. [6]

Siit tuleneb ka õhuliinidele lubatava ülekandevõimsuse sesoonne erinevus: külmadel talvekuudel võib 330 kV üheaheelalisi ja kolmeste lõhisfaasidega 3x402 mm² standardsete alumiiniumjuhtidega õhuliine koormata enam – ca 2 900 A, kui soojematel suvekuudel – ca 2 300 A. Õhuliini projekteerimise tehniliste nõuetega määratakse faasijuhi suurim lubatud temperatuur, mis seab piirangud liini lubatud kestvale koormusvoolule. Uutele õhuliinidele Eestis on lubatud suurim temperatuur +60 °C, vanadel õhuliinidel oli see üldjuhul +35 °C.

Kaablis katab elektrijuhti tahkest dielektrikust isoleermaterjal (joonis 16), mille peamisteks ülesanneteks on taluda sellele rakenduvaid suuri elektriväljatugevusi, mis kaablis valitsevad ning mitte juhtida elektrit, st isoleerida elektriliselt faasijuhti.

Isoleermaterjaliks olevas dielektrikus, milleks on enamasti immutatud paber või XLPE (ristlüluga polüetüleen), tekivad vahelduvpinge tõttu lisaks juhtivuskadudele ka polarisatsioonikaod. Neid kadusid nimetatakse dielektrikuskadudeks P_{df} . Isolatsioonikadusid mõõdetakse ning hinnatakse kaotangensi ($\tan \delta$) vääruuste alusel. Immutatud paberi ja XLPE isolatsiooni kaotangensi suurused jäävad üldjuhul suurusjärku, vastavalt $23 \cdot 10^{-4}$ ning $1 \cdot 10^{-4}$.

$$P_{df} = U_f^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_f \cdot \tan \delta \quad (8)$$

kus:

P_{df} – kondensaatoris (elektriliini ühes faasis) tekkiv dielektriline kaovõimsus (W)

U_f – kondensaatori pinge (elektriliini faasipinge) (V)

π – konstant

f – elektrivõrgu sagedus (Hz)

C_f – kondensaatori mahtuvus (elektriliini faasimahtuvus) (F)

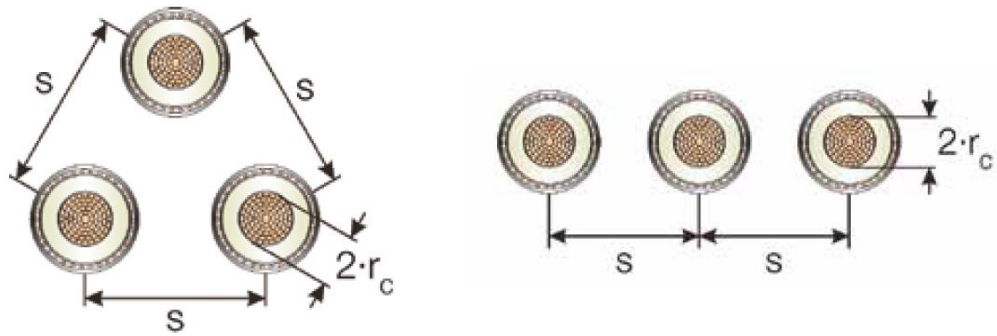
$\tan \delta$ – dielektriku kaotangens

Kui kaabli dielektrikuna kasutada immutatud paberit, jääks ligi 100 km pikkusega Mägi-Kurdla – Kotlandi 330 kV kaheaheelalises vahelduvvoolu kaabelliinis tekkiv dielektriline kaovõimsus suurusjärku 5,9 MW. Kui kaabli dielektrikuna kasutada XLPE'd, jääb sama pikkusega kaheaheelalise kaabelliini kaovõimsus suurusjärku 0,26 MW. Siit järeldub, kui kasutada XLPE dielektrikuga kaableid, siis jäävad dielektrikuskadod üsna mõõdukateks.

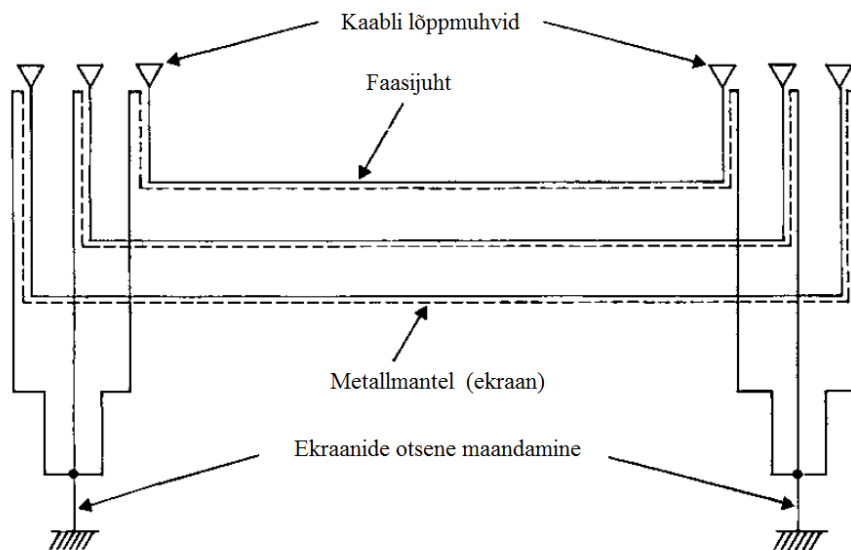
Lisaks headele dielektrilistele isoleerivatele omadustele on dielektrikutel ka termiliselt head isoleerivad omadused. See aga tähendab, et kaablijuhis tekkiv kaossoojus ei kandu kaablist seda ümbritsevasse keskkonda edasi sama kergelt kui õhuliinide korral. Isoleermaterjali kiht takistab soojusülekannet.

Vältimaks faasijuhi liigset kuumenemist, suurendatakse selle ristlõiget (joonis 16) ja piiratakse lubatud voolutihedust vastavas kaablis. Näiteks 330 kV õhuliini ühe lõhisfaasi 3x402 mm² = 1 204 mm² summaarse ristlõikega alumiiniumist voolujuhiga sarnast voolutugevust ja võimsust saab maakaabelliini korral edasi kanda nt kolme paralleelse 1 200 mm² faasijuhi ristlõikega kaabelliiniga, kus siis summaarseks ühe faasijuhi ristlõikeks kujuneb 3x1200 mm² = 3 600 mm² (tabel 3).

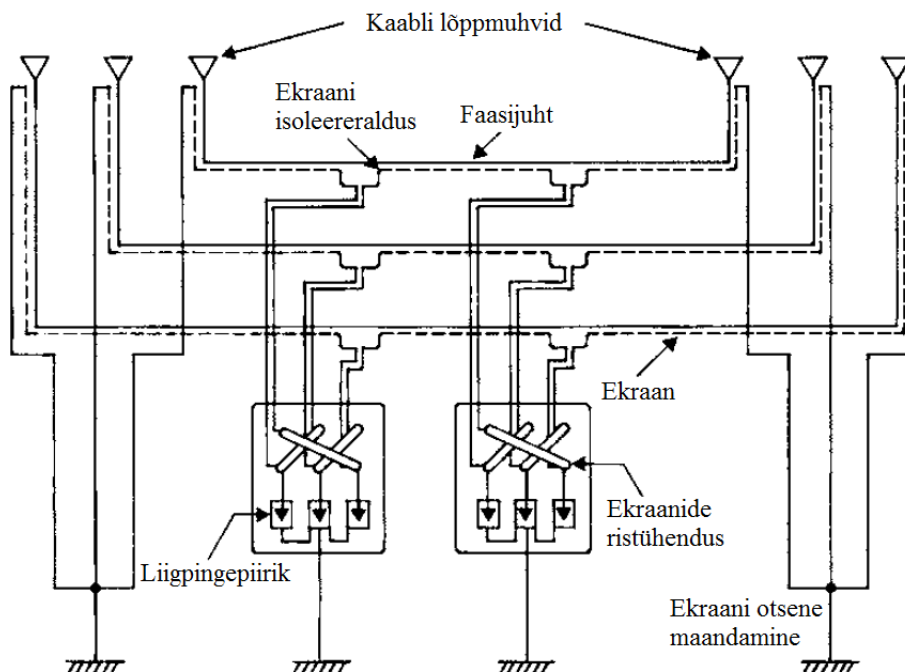
Seega alumiiniumist juhtmetega õhuliini asendamine sama võimsa alumiiniumist juhtidega kaabelliiniga tõstab – soojusprobleemide tõttu – vähemalt ca kolm korda vaid juhtme juhimaterjali ristlõike ja mahu vajadust ning rahalist kulu sellele.



Joonis 18. Kaablite kolmnurkpaigaldus (vasak) ja tasapindpaigaldus (parem) [7]



Joonis 19. Kaablite ekraanide (metallmantlite) otsene maandamine mõlemal pool otstes



Joonis 20. Kaablite ekraanide (metallmantlite) ristühendus (transponeerimine)

Suurt mõju maakaabelliinide soojusülekandele seda ümbritsevale keskkonnale omab selle ümbritseva keskkonna iseloom, kaablite paigutus (joonis 18) ja kaablite metallmantlite omavaheline ühendus- ning maandamisviis (joonised 19 ja 20).

Maakaabel võidakse paigutada nt märga või kuiva pinnasesse (kusjuures rolli mängib ka pinnase koostis: liiv, muld, kivi, savi jne), ventileeritavasse või mitteventileeritavasse kaablikanalisse.

Pinnasesse paigaldatud võimsatel kaablitel võivad lubatavad koormusvoolud, olenevalt maandus- ja paigaldusviisist, olla 20–35% madalamad kui vabasse õhku paigaldatud kaablitel. Probleemiks on siin kaabli ümber oleva pinnase soojenemine ja ka selle võimalik kuivamine, mistõttu halveneb pinnase soojusjuhtivus, mis omakorda põhjustab kaabli tasakaalutemperatuuri tõusu. Vältimaks kaabli liigset soojenemist, tuleb sellele lubatavaid koormusvoolusid vähendada.

Pikkade liinide korral võivad kaablitrassi pinnase omadused (soojusjuhtivused) olla vägagi erinevad, mistõttu võib olla vajalik juhtmete vahekauguste (joonis 18, s) suurendamine kohtades, kus pinnase soojusjuhtivus on madalam. Juhtmete vahekauguste suurendamine aga põhjustab kaabli induktiivsuse kasvu (9) ning kohtades, kus kaabli induktiivsus on suurem, on ka reaktiivtakistused ning kaod suuremad, mis omakorda põhjustavad nendes kohtades lisa kaosoojuse teket.

$$L = 0,05 + 0,2 \cdot \ln \left(\frac{K \cdot s}{r_c} \right) \quad [8](9)$$

kus:

L – kaabelliini induktiivsus ühe kilomeetri kohta (mH/km)

K – paigalduskonstant, $K=1$ – kolmnurkpaigalduse puhul, $K=1,26$ – tasapindpaigalduse puhul

s – kaablite vaheline kaugus, juhtme tsentrist mõõdetuna (mm)

r_c – kaabli faasijuhli raadius (mm)

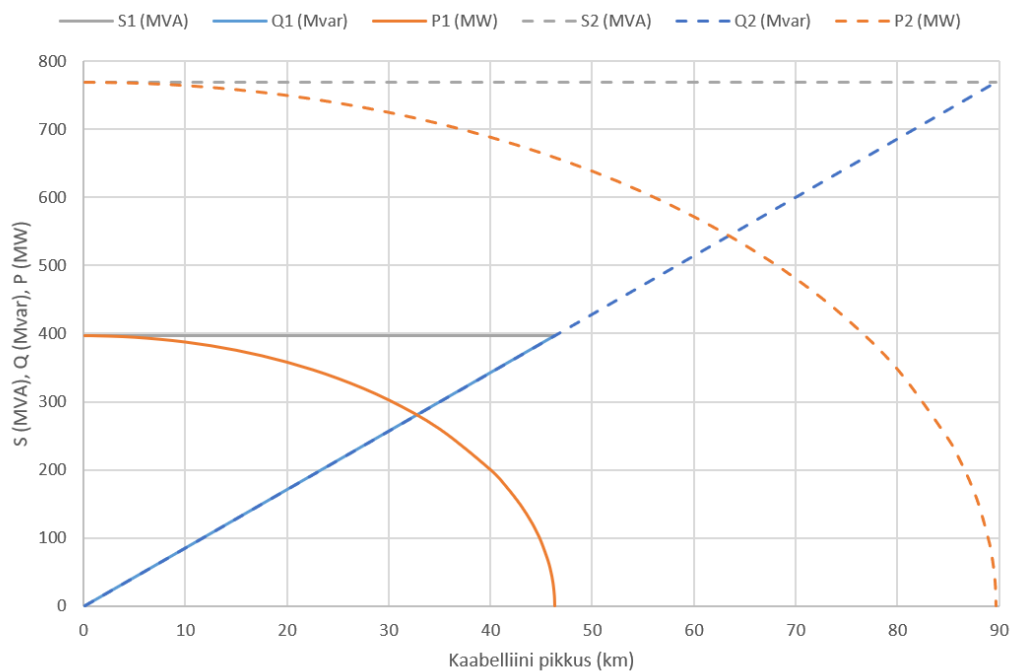
Kui soovida vältida pinnase soojusjuhtivuste erinevustest tingitud probleeme, tuleb maakaabelliin rajada ventileeritavatesse või spetsiaalsete vesijahutussüsteemidega kaablikanalitesse või kaablitunnelitesse. Võib eeldada, et selliste ventileeritavate või vesijahutussüsteemidega maa-aluste rajatiste rajamine ning ekspluatatsioon on märkimisväärselt kulukam kui mitteventileeritava kaablikanali rajamine.

Kuna mitteventileeritavas kaablikanalisis asub maakaabel ligi 1,5 m sügavusel pinnases, kus on aastaringselt suhteliselt konstantne temperatuur, siis pole kaabelliinidel ka sesoonseid erinevusi lubatavatel ülekandevõimsustel (nagu eelpool toodud, on nt 2 500 mm² vaskjuhiga ja 25 mm XLPE isolatsiooniga 330 kV maakaabli, mis asub suhteliselt kuivas pinnases, suurim lubatud kestevvool ca 1 345 A – viimane oleneb ka kaablite paigalduslaadist ning metallmantlite ühendus- ning maandusviisidest). Maakaabelliine saab aga lühiajaliselt ülekoormata. Maakaablitele lubatavad suurimad juhitemperatuurid sõltuvad kaablitüübist, kuid üldjuhul ei ületa need +90 °C.

Vahelduvvoolu kaabelliinide läbilaskevõimsustele ja kaablite metallmantlites tekkivatele kadudele avaldavad suurt mõju nende metallmantlite (ekraanide) omavaheline ühendus- ning maandamisviis. Kaablite metallmantlite omavaheline ühendus- ning maandamisviis võivad kaablite tasapindpaigalduse korral mõjutada kaablitele lubatavaid koormusvoolu ligi 2 korda ja kolmnurkpaigalduse korral kuni ca 1,4 korda.

Peamiseks põhjuseks on siin kaabli faasijuhi koormusvooludest põhjustatud elektripinge indutseerimine kaabli ekraani. Kuna ekraani indutseeritud pinge on nii kaablile, seadmetele kui ka elusolenditele ohtlik, siis tuleb ekraan maandada. Lihtsaimaks ekraani maandamise mooduseks on selle otsene maandamine mõlemal pool kaabli otstes (joonis 19). Otsene maandamine aga põhjustab metallmantlis üsna suurte indutseeritud voolude voolamist, mis põhjustavad kadusid ning tõstavad kaabli temperatuuri, piirates sellega kaabli läbilaskevõimet.

Kadude vähendamiseks ning kaabli läbilaskevõime suurendamiseks ühendatakse kaabelliini kaablite metallmantlid teatud vahekauguste järel (muhvikohtades) transponeeritult (rist-ühendatuna), et vähendada indutseeritavaid pingeid ning metallmantlis voolavaid voolusid (joonis 20). Kuna kaablite ekraanid ühendatakse transponeeritult, siis toimub neis küll teatav pinge indutseerimine, kuid metallmantlis voolavad voolud on väga väikesed. Suurimad indutseeritavad pinged ekraanis esinevad ekraanide transponeerimise punktides. Nendesse kohtadesse on vajalik lisada ekraanidele ka liigpingepiirikud, mis kaitsevad metallmantlit kaitsevat välist isolatsioonikihti ülepingetest tulenevate ohtude eest. Lisanduvad liigpingepiirikud ja transponeerimise punktid aga tõstavad kaabelliini rajamise maksumust.



Joonis 21. Kaabelliini metallmantli maandamisviiside mõju liini läbilaskevõimele.

Joonisel 21 on lihtsustatult näidatud metallmantli maandamisviiside mõju liini läbilaskevõimele. Joonisel tähistavad S_1 , Q_1 ja P_1 juhtumit, kus 2 500 mm² vasest juhiga kaabelliini metallmantel on otseselt maandatud liini mõlemast otsast (joonis 19). Liini läbilaskevõime S_1 on sellel juhul ca 400 MVA ning reaktiivvõimsuse Q_1 tootmine kaablis võrdub kaabelliini läbilaskevõimsusega kui liini pikkus ulatub ca 46 kilomeetrini. Aktiivvõimsuse ülekandmise osakaalu vähenemist – kaablis genereeritava reaktiivvõimsuse tõttu – liinipikkuse kasvades näitab oranž P_1 kõver.

Kui kaabelliini metallmantlite (ekraanide) korral kasutada transponeerimist (joonis 20), saab samast kaabelliinist muudel sarnastel tingimustel lasta läbi oluliselt – ca kaks korda – suuremat näivvõimsust S_2 , ca 770 MVA (joonis 21). Sellisel juhul võrdub Q_2 mahtuvuslik reaktiivvõimsus kaabelliini

läbilaskevõimsusega kui liini pikkus on *ca* 90 km. Aktiivvõimsuse ülekandmise osakaalu vähenemist liinipikkuse kasvades näitab oranž P_2 punktiirkõver.

Eelnevast saab taaskord järeldada, et kaosoojuse põhjustatud lisaprobleemide tõttu tuleb sama võimsuse edasikandmiseks – *ca* 1 300 MVA – ühe õhuliini (joonis 4) asemel ehitada kas kaks või kolm paralleelset kompenseeritud maakaabelliini (nt joonis 8), mille ekraanid on transponeeritud (joonised 20 ja 21).

Küsimus, kas ehitada kaks või kolm paralleelset maakaabelliini sõltub eelkõige sellest, kui kalliks kujuneb rahaliselt juhtme juhi (alumiinium või vask) ja isolatsiooni materjali kulu ning samuti kaablite paigaldamine pinnasesse – st kui palju kallimaks kujuneb kahe paralleelliini asemel paigaldada pinnasesse kolm paralleelliini.

Tabel 3. Kaabelliini juhtme materjali, ristlõigete ja paralleelahelate mõju liini läbilaskevõimsusele ning liini poolt genereeritavale mahtuvuslikule reaktiivvõimsusele. Võrdluseks on lisatud ka õhuliin.

Liini tüüp		Liini näivvõimsus		Mägi-Kurdla - Kotlandi liin		Aulepa - Rehemäe liin	
				Pikkus (km)	Q_c (MVA _r)	Pikkus (km)	Q_c (MVA _r)
Juhtme ristlõige		S (MVA)					
Kaabelliin	Cu	3x3x800 mm ²	1 320	100	1 600	40	640
Kaabelliin	Al	3x3x1200 mm ²	1 290	100	2 000	40	800
Kaabelliin	Cu	2x3x2500 mm ²	1 540	100	1 730	40	690
Õhuliin	Al	3x3x400 mm ²	1 320	100	50	40	20

Maakaablite korral on oluline tõik, et suurema juhtme juhi ristlõike korral väheneb ka efektiivne voolutihedus juhtmes, ehk mitme väiksema ristlõikega paralleelse juhtme kasutamise korral saab sama summaarse juhtme ristlõike korral edastada suuremaid võimsuseid. Ühtlasi saab selliselt kokku hoida ka juhtme juhi materjali (nt vase) koguseid. Samuti on väiksema ristlõikega juhtmetel ka väiksemad mahtuvused ning seega ka tekitavad need vähem reaktiivvõimsust. Lihtsustatud arvutustega teostatud võrdlusnäited on toodud tabelis 3.

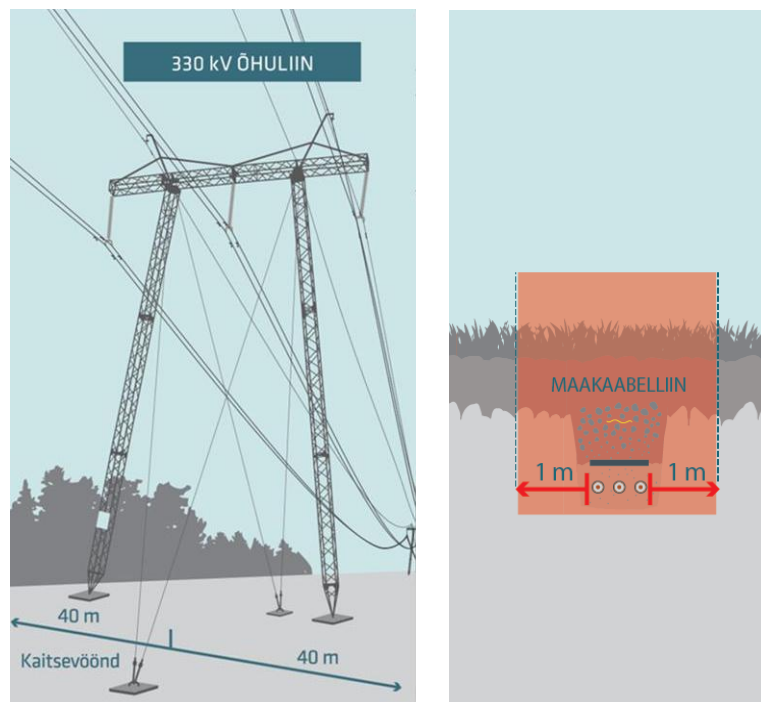
KAITSEVÖÖNDID JA LIINIKORIDORID

Elektriliinid paiknevad liinikoridorides, mis on piiratud kaitsevööndiga. Kaitsevöönd on elektripaigaldise ümbritsev maa-ala, õhuruum või veekogu, kus paigaldise ohutuse ja kaitse tagamiseks on seatud piirangud maa kasutamisele ning kaitsevööndis tegutsemisele ja töötamisele. Kaitsevööndi ulatus sõltub elektripaigaldise puhul paigaldise pingeklassist [9].

Eesti põhivõrgus on õhuliinide kaitsevöönd maa-ala ja õhuruum, mida piiravad mõlemal pool piki liini telge paiknevad mõttelised vertikaaltasandid ning mille ulatus mõlemal pool liini telge sõltuvalt pingeklassist on [10]:

- 110 kV – 25 meetrit
- 330 kV – 40 meetrit

Maakaabelliini kaitsevöönd on piki kaabelliini kulgev ala, mida mõlemalt poolt piiravad liini äärmistest kaablitest 1 meetri kaugusel paiknevad mõttelised vertikaaltasandid [10].

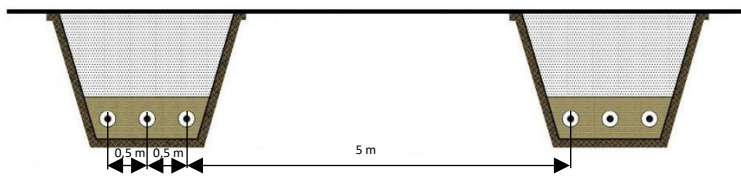


Joonis 22. 330 kV õhuliini (vasak) ja maakaabelliini (parem) kaitsevööndid [10]

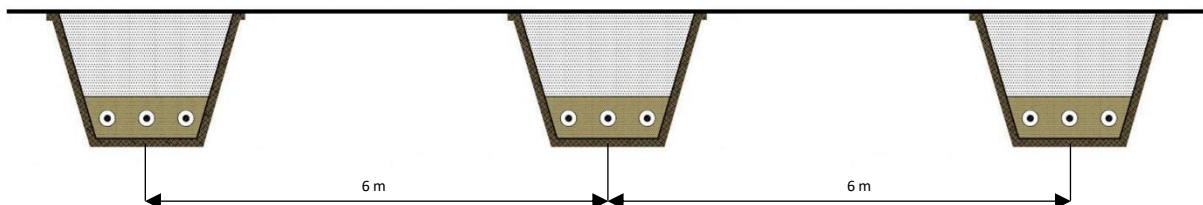
Nagu jooniselt 22 näha, on praegune maakaabelliini kaitsevöönd – *võrreldes õhuliiniga* – väga tagasihoidlik ja kitsas. Kui 330 kV õhuliini korral jätab 80 meetrit lai kaitsevööndi liinikoridor piisavalt ruumi ka ligipääsuteedele ja liinihooldamise tehnikale, siis maakaabelliini kaitsevööndi laius on selgelt liiga kitsas, et vaid selles alas mahuks eriseadmetega maakaabelliini paigaldama, hooldama või remontima.

On ilmselge, et praktikas kujuneks ülikõrgepingelise maakaabelliini koridori laius Eesti põhivõrgus oluliselt suuremaks, kui on joonisel 22 näidatud maakaabelliini kaitsevöönd.

Kui lähtuda peamiselt maakaabelliini elektrilistest parameetritest, st ahelate arvust ja kaossoojusest, siis tuleks kaheaahelalise maakaabelliini liinikoridori laiuks – *kaablitrasse kaevates* – vähemalt ca 9 meetrit ja kolmeahelalise maakaabelliini korral ca 15 meetrit.

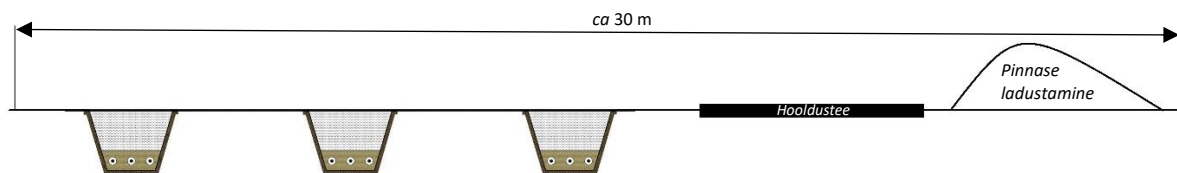


Joonis 23. Kaheaheelaline maakaabelliin (nt $2 \times 3 \times 2500 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$) kui kaablitrassid on kaevatud



Joonis 24. Kolmeahelaline maakaabelliin (nt $3 \times 3 \times 1200 \text{ mm}^2 \text{ Al}$) [11]

Kui lähtuda sellest, et kaabelliinile on liinikoridoris tarvilik ka ligipääs (hooldustee) ning vaba ruumi ajutiseks pinnase ladustamiseks ja ka töövahendite hoiustamiseks, siis tuleks arvestada täiendava *ca* 15 meetrise laiuslisaga liinikoridoris. Sellisel juhul tuleks kaheaheelalise maakaabelliini rajamisel arvestada liinikoridori laiusena vähemalt *ca* 24 meetrit ja kolmeahelalise maakaabelliini rajamisel *ca* 30 meetrise liinikoridoriga, kui kaablitrassid on rajatud kaevamise teel (joonis 25).



Joonis 25. Kolmeahelaline maakaabelliin koos hooldustee ja pinnase ajutise ladustamise võimalusega

Kui kaablid on paigaldatud tunnelisse, võivad hooldustee ja pinnase ladustamise vajadused – *liinikoridori laiuse mõttes* – olla tagasihoidlikumad. Kuna tunneli rajamine on kulukam kui kaablitrassi kaevamine, siis võib eeldada, et hõreasustusega maa- ja metsatingimustes tunneli rajamist ei plaanita.

Lühemate kaabelliinide rajamisel – *eriti tiheasustusega piirkondades (sh ka jõgede ning raud- ja maanteedega ristumistel)* – kasutatakse aina enam horisontaalpuurimise meetodit, mis võimaldab kaableid paigaldada väga vähese nähtava pinnase nn sonkimise mõjualaga. Horisontaalpuurimine on aga jätkuvalt kulukam – *eriti pikkade vahemaade korral hõreasustusega maa- ja metsatingimustes* – kui avamaa kaevamine ning võib eeldada, et kogu kaabelliini pikkuse ulatuses horisontaalpuurimist majanduslikel põhjustel ei rakendataks.

Horisontaalpuurimise korral näitab senine kohalik praktika, et suurimaks probleemivabaks puuritavaks lõigu pikkuseks on *ca* 800 meetrit. Sellest pikemate kaablilõikude paigaldamine vajaks puurimise asemel juba kaevamist. Seega mõjutab paigaldatava kaablilõigu pikkust – *kaabli ristlõike ja transportimise trumli suuruse kõrval* – ka selle pinnasesse paigaldamise viis (nt kas kaevates või horisontaalpuurides).

Väikesema ristlõikega kaableid – *nt madal- ja keskpinge võrgus* – paigaldatakse ka nn kündmise meetodil, mis on teistega võrreldes suhteliselt kiire ja odav meetod. Suuremate ristlõigetega ja

kõrgema pingega kaablite maasse kündmine on hetkel aga pigem alles nn katsetamise järgus oleva tehnoloogia arendamine, mitte laialt levinud võte ja praktika ülikõrgepingeliste kaabelliinide rajamisel [12].

Praktikas tuleb arvestada ka asjaoluga, et kogu kaablitrassi pikkuses pole tihti võimalik paigaldada kaableid *ca* 1,5 meetri sügavusele. Kaablitrassi ristumistel suuremate teede ja teiste kommunikatsioonitrassidega on praktikas ette tulnud juhtumeid kus kaablid on paigaldatud pinnasesse kuni 6 meetri sügavusele. Kuna sügavuse kasvades halvenevad pinnasesse paigaldatud kaablil jahtumistingimused, vähenevad seetõttu ka kogu kaabelliinile lubatavad koormusvoolud ja edastusvõimsused.

Vältimaks selliste edastusvõimsust piiravate nn pudelikaelade teket kaabelliinil, tuleks kaablid paigaldada nendes kohtades kas nt ventileeritavatesse kaablikanalitesse või püüda suurendada neis liinilõikudes kaablijuhtide ristlõiget (nt kasutades vajalikes kohtades suurema ristlõikega kaablilõike või paigaldades paralleelahelaid). Sellised võimalikud tegevused on aga tehniliselt tülikad ettevõtmised mis kergitavad kaabelliini rajamise, käitamise ja hooldamise kulusid.

Kui õhuliinide korral viidatakse tihti visuaalse reostuse olemasolule ja maakaabelliinide korral selle puudumisele, siis praktikas puuduksid maakaabelliini liinitrassil (nt Mägi-Kurdla – Kotlandi) küll kõrged metallsõrestikust liinimastid ja ka liinikoridor oleks *ca* poole kitsam aga visuaalselt selgelt nähtav liinikoridor ikkagi tekiks ja oleks, st ka maakaabelliini puhul.

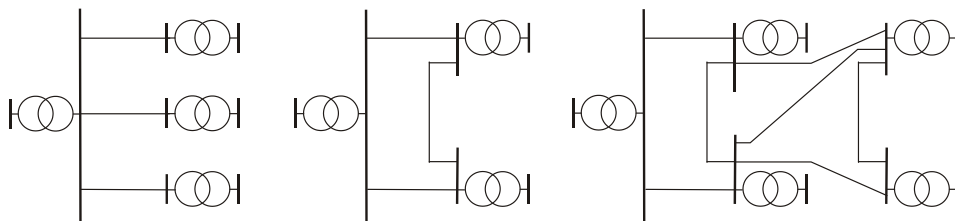
Nagu õhuliini koridori korral, tuleks ka ülikõrgepingelise maakaabelliini koridori regulaarselt hooldada, et seal puud ja põõsad liigselt vohama ei hakkaks ning et – *eritehnikale* – püsiks võimalikult hõlbus ja pidev ligipääs igale kaabelliini lõigule.

Täiendavalt tuleks tagada piisav vaba ruum ning ligipääs ka liinil paiknevatele šuntreaktoreid käitavatele ning teenindavatele alajaamadele.

KAABLIRIKKED JA RIKETE KESTUS

Õhuliinid on tihti altimad erinevatele võimalikele riketele (tormid, langenud puud, jäited, saastumised jne) kui kaabelliinid. Õhuliinide rikete altisus sõltub nt liinipingetest, 110 kV õhuliinidel esineb sagedamini rikkeid kui 330 kV õhuliinidel. Kuna kõrgema pingega liinid edastavad suuri võimsusi, on ka nende töö- ja tõrkekindluse nõuded rangemad. Mida vähem on rikkeid ning mida lühemad on rikete kestused, seda töökindlam on ka elektrivõrk. Kuna õhuliinid on lihtsa konstruktsiooniga ning enamasti kergesti ligipääsetavad, saab rikkekoha kiiresti – visuaalselt – kindlaks määrata ning rikke üldjuhul ka suuremate raskusteta eemaldada.

Kõrge- ja ülikõrgepingeline õhuliinide rikked on enamjaolt lühiajalised (nn mööduvad lühised) ning nende kestust mõõdetakse tavaliselt sekundites. Pikemaid – st püsivaid rikkeid – toimub väga harva (tabel 4 ja joonis 27) ning nende kestusi mõõdetakse pigem tundides ja päevades (joonis 28). Kõrge tõrkekindluse tagamiseks on kõrgepingeliinid võrku ühendatud silmuseliselt (ringtoide) (joonis 26), st et moodustuvad kinnised kontuurid ning ühe liini väljalülitamisel ei toimu tarbijaile toitekatkestust ($n-1$ kriteerium). Sellise konfiguratsiooniga elektrivõrgus pole üksikute liinide lühiajalised tõrked kuigi suureks probleemiks.



Joonis 26. Radiaal-, ring- ja silmusvõrk

Maakaabelliinid on üldjuhul väliste, atmosfääriliste mõjutuste (tormid, vihmad jne) suhtes tundetud. Välispidiseid probleeme valmistavad kas väga võimsad stiihilised loodusjõud või kooskõlastamata ning ebaprofessionaalsed kaevetööd. Kaablite sisemiste rikete peamiseks allikateks võivad olla niiskuse sattumine kaablisse ja osalahendused, mis põhjustavad lõpuks isolatsiooni täieliku läbilöögi.

Kuna kaablid asuvad pinnases ligi 1,5 m sügavuses, on rikete tuvastamine ja eemaldamine aeganõudev töö. Kõrgepingekaabli isolatsioonirikke parandamine nõuab väga spetsiifilisi eriteadmisi ning -oskusi. Kuigi kaablirikkeid toimub suhteliselt harva, on nende kestused väga pikad. 110 või 330 kV kaablirikke kestusi võib üldjuhul mõõta nädalates ja isegi kuudes. Üksikute liinide pikaajalised rikked on ohuks elektrivõrgu tõrke- ning talitluskindlusele.

Eesti 330 kV võrgu õhuliinide kogupikkuseks on ca 1 851 km [4], lirimaa 400 kV, 275 kV ja 220 kV pingeklassiga õhuliinide kogupikkus on ca 2 245 km. Üheksa-aastase (perioodil 2004 – 2012) statistilise rikkeinfo põhjal toimus lirimaa ülikõrgepingega õhuliinidel 100 km liini pikkuse kohta 1 rike iga ca 28 aasta järel [13]. Liigilt on siin tegu püsiva rikkega, st mis vajab eemaldamist ning liini remontimist enne kui liini sai taas pingestada.

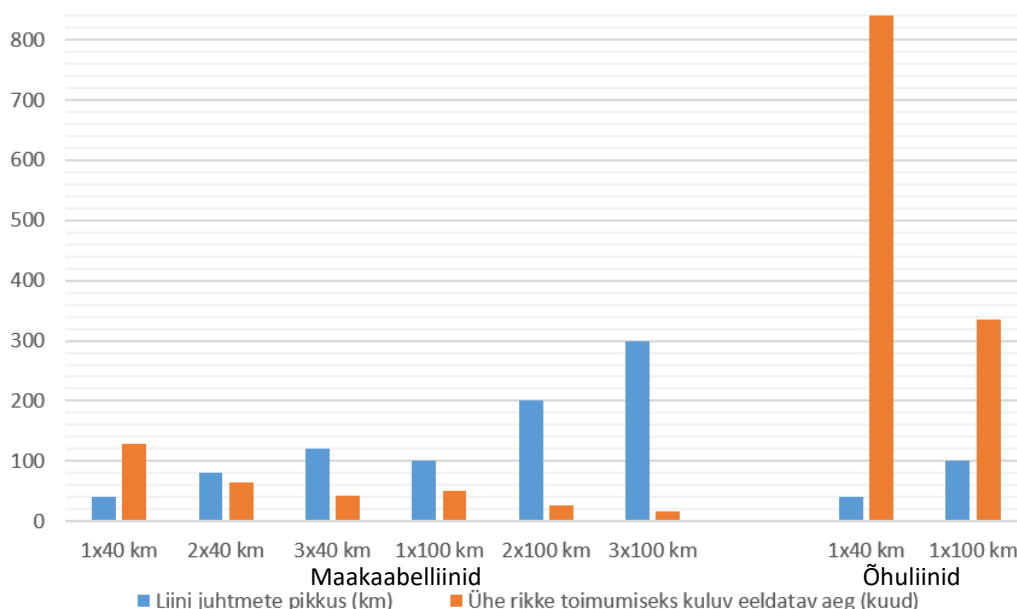
CIGRE avaldas 2009 aastal uuringu, kus uuriti ülikõrgepingeliste – 220 kV kuni 500 kV – vahelduvvoolu maakaablite talitluskindlust ja kaablitel toimunud rikkeid [14]. Uuritavate kaabelliinide pikkus oli kokku ca 1 388 km ning dielektriliseks isolatsioonimaterjaliks oli kõigil XLPE. Uuringus osales kokku 73

võrguettevõtet üle maailma. CIGRE kogutud statistilise rikkeinfo põhjal toimus ülikõrgepingega maakaabelliinidel 100 km liini pikkuse kohta 1 rike iga ca 51 kuu, ehk iga ca 4 aasta ja 3 kuu järel. Vastav tulemus on ca 7 korda kehvem kui see on uuritud õhuliinide korral!

Iirimaa võrguoperaatori EirGrid ja CIGRE poolt avaldatud rikkeinfo põhjal on koostatud tabel 4, kus on toodud kaabel- ja õhuliinide korral ajaperioodid, mille vältel võiks – st *mineviku teabe põhjal prognoosida tulevikku* – eeldatavalt toimuda liinil püsiv rike. Liinipikkustena on toodud 40 km ja 100 km vastavalt antud uuringu objektiks olevatele liinidele Aulepa – Rehemäe, Tallinna ringliin ja Märgi-Kurdla – Kotland. Tabeli 4 veerg “*Liini ahelaid*” näitab kui mitu ahelat – st paralleelliini – ühes liinikoridoris kulgeb, veerg “*Liinijuhtmete pikkus*” näitab summaarset juhtmete pikkust antud liinis – st paralleelliinide korral on juhtmete kogupikkus ahelate arv korda pikem kui liini(koridori) pikkus.

Tabel 4. Ühe rikke toimumiseks kuluv eeldatav aeg erinevate liinitüüpide ja liinipikkuste korral kui liinipinge on 330 kV.

	Liini pikkus (km)	Liini ahelaid (tk)	Liini- juhtmete pikkus (km)	Rikke toimumise eeldatav välp (kuud)
Kaabelliin	40	1	40	128
Kaabelliin	40	2	80	64
Kaabelliin	40	3	120	42
Kaabelliin	100	1	100	51
Kaabelliin	100	2	200	26
Kaabelliin	100	3	300	17
Õhuliin	40	1	40	840
Õhuliin	100	1	100	336



Joonis 27. Eeldatav aeg rikkeni 330 kV erinevate pikkustega kaabel- ja õhuliinidel

Joonisel 27 on tabeli 4 arvandmed kujutatud graafilisel kujul. Nii jooniselt kui tabelist on näha, et maakaabelliinidel toimuks sama liinikilomeetri kohta oluliselt enam püsivaid rikkeid. Täiendavalt on

näha tõik, et mitmeahelaliste – st paralleel – liinide korral väheneb aeg võimaliku rikkeni ehk rikke toimumise tõenäosus kasvab seetõttu, et liinijuhtmete kogupikkus liinikoridoris kasvab.

Kui nt kaheaheelalise ja 2 500 mm² vaskjuhiga maakaabelliini asemel rajada nt kolmeaheelaline ja 800 mm² vaskjuhiga maakaabelliin – soovides selliselt vähendada *ca* poole võrra kasutatava vase määra (tabel 3) – siis kasvanud juhtmete kogupikkuse tõttu kaabelliinis (tabel 4 ja joonise 27 alusel) suureneb selle tõenäosus rikkele.

Antud juhul ei anna aga pelgalt liinikaabli kogupikkus edasi olulist tehnilist nüanssi. 2 500 mm² vaskjuhiga kaabli diameeter on 137 mm ning seda saab paigaldada suurimale maismaal kasutatavale transportkaablitrumlile *ca* 560 m [7]. Kui see liin on 100 km pikk, siis tuleb kaheaheelalise liini korral kasutada vähemalt *ca* 1 070 jätkumuhvi, et kaablilõigud omavahel kaabelliiniks ühendada. 800 mm² vaskjuhiga kaabli diameeter on 110 mm ning seda saab paigaldada suurimale maismaal kasutatavale transportkaablitrumlile *ca* 1 168 m [7]. Kui see liin on 100 km pikk, siis tuleb kolmeaheelalise liini korral kasutada vähemalt *ca* 770 jätkumuhvi, et kaablilõigud omavahel kaabelliiniks ühendada.

Kuna liini rajamisel paigaldatakse kaablitele jätkumuhvid töömaal kohapeal, on need üldjuhul nõrgimateks lülideks – talitluskindluse mõttes – kaabelliinides. Seega sellest aspektist lähtudes peaks eelduslikult tõrkekindlam olema liin millel on vähem muhve. Antud võrdlusjuhtum näitlikustab seda, et kuigi üldised nn keskmised numbrilised näitajad on tihti headeks indikaatoriteks, ei pruugi need teatud juhtudel anda piisavalt rahuldavat ülevaadet tegelikkusest.

Kui võrrelda omavahel maa- ja merekaableid, siis merekaablitel on kas oluliselt vähem jätkumuhve, või need puuduvad sootuks. Seda põhjusel, et spetsiaalsele kaablipaigalduse laevale saab kaablitrumlile üldjuhul kerida kümneid kilomeetreid kaablit, mõnel juhul isegi kuni *ca* 100 km jagu.

Pelgalt jätkumuhvide arvu suure erinevuse tõttu on maa- ja merekaablite korral rikete esinemise tõenäosused samuti erinevad, seda siis maakaabelliinide kahjuks.

Väärib mainimist, et eelpool viidatud CIGRE avaldatud 2009 aasta uuringus vaadeldud ülikõrgepingelised vahelduvolu kaabelliinid olid enamasti kõik – st *antud uurimistöös vaadeldavate kaabelliinide pikkuste (40 ja 100 km) mõttes* – lühikesed kaabelliinid, jäädes enamasti mõne kilomeetri pikkusteks, pikim kaabelliin Euroopas ulatus *ca* 20 kilomeetrini. Avalikult leiduva informatsiooni põhjal on hetkel pikimaks 330 kV vahelduvvooluga maakaabelliiniks Austraalias, Sidneys asuv South – Haymarket, mille liinipikkus on 28 km ja pikimaks 500 kV vahelduvvooluga maakaabelliiniks on *ca* 40 km pikkune Shin-Keiyo–Shin-Toyosu liin Jaapanis, Tokyos [13].

Seega, tegelikkuses puudub operatiivtalitluse ülevaade ja rikkestatistika väga pikkade (st üle *ca* 40 km) ülikõrgepingeliste vahelduvpinge liinide kohta, sest selliseid maakaabelliine hetkel lihtsalt ei eksisteeri.

Üldjuhul on senini rajatud suhteliselt lühikesi ülikõrgepingelisi maakaabelliine suurlinnadesse, kus õhuliinide rajamine on pealmaakasutuse mõttes osutunud kulukamaks. Isegi jõukas Taani kuningriik, mille poliitiline juhtkond on võtnud sihiks pikemas plaanis õhuliinid asendada maakaabelliinidega, on teinud erandi ülikõrgepingeliste vahelduvvoolu transiitliinide rajamise osas, kus riiklikult elutähtsate transiitühenduste korral eelistatakse maismaal jätkuvalt õhuliinide rajamist.

Peamisteks probleemideks on ülikõrgepingeliste vahelduvvoolu maakaabelliinide rajamismaksumus ning tehnilise kogemuse puudumine – st *teadmatus* – kui palju praktikas mõjutavad pikkade kaabel-

liinide suured mahtuvused ja reaktiivvõimsuse genereerimised ning neid kompenseerivate suurte reaktorite suured induktiivsused ja reaktiivvõimsuse tarbimised, elektrivõrgu üldist talitluskindlust.

Teadad on, et suurte mahtuvustega (nt pikkade kaabelliinide) seadmete sisselülitamised võivad tekitada ka suuri löökvoole mis koormavad seadmeid. Samuti on teada, et suurte induktiivsete elementide väljalülitamine tekitab väga järsu tõusuga transientliigpingeid, mis võivad kahjustada seadmete dielektrilist isolatsiooni. Liigpingete tippusid saab piirata liigpingepiirikutega aga pinge tõusu järskusi (mis samuti tekitavad isolatsioonile lisastressi) on juba keerukam muuta või mõjutada.

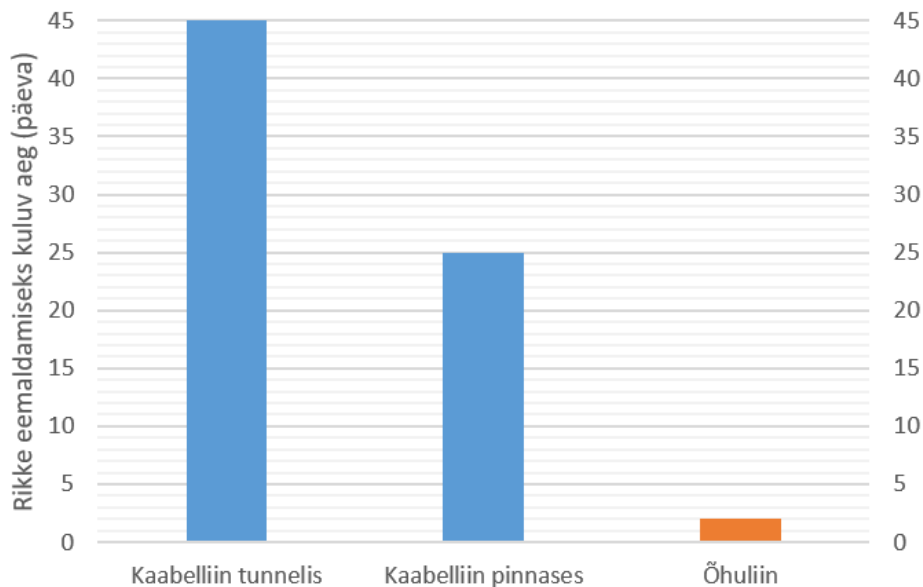
Transiitelektrivõrgus toimub aegajalt eri laadi lühiseid. Täiendavaid probleeme – *lisakahjustusi* – lühiste korral võib põhjustada mahtuvuslik reaktiivenergia, mis on salvestunud pikka kaabelliini ja mis lühise korral võib kergitada lühisvoolu tipuväärtuseid. Õhuliiniga võrreldes on maakaabelliinid suurema ristlõikega, st väiksema aktiivtakistusega, mille tulemusena on rikke korral lühisvoolude väärtused kaabelliinides suuremad kui õhuliinides. Liigsuurte lühisvoolude piiramiseks võib tekkida vajadus paigaldada liinile piki-reaktorid. Suuremate lühisvoolude katkestamine vajab võimsamaid ja kallimaid lülitusseadmeid. Paigaldatavad piki-reaktorid ja võimsamad lülitusseadmed tõstavad nii liini rajamise, hooldamise kui ka käitamise kulusid. Täiendavaid probleeme võivad põhjustada erinevad vönkeprotsessid (nt resonantsid) induktiivsete ja mahtuvuslike võrguelementide vahel.

Suure mahtuvusega kaabelliin esitab väljakutseid ka võrgu elektrikvaliteedile, selle pingestabiilsusele. Kuna kaabelliini reaktiivvõimsuse genereerimine sõltub võrgupinge ruudust, siis juba suhteliselt väikesed pinge muutused põhjustavad märgatavaid reaktiivvõimsuse muutuseid. Pinge tase ja reaktiivvõimsuse genereerimine liinis on omavahel positiivse tagasisidestusega. Kui inimeste korral on positiivne tagasiside hea nähtus, siis tehnikas on positiivne tagasisidestus pigem halb omadus, sest muutunud toitepinge (st sisend) liinil muudab samas suunas ka liini reaktiivvõimsuse genereerimist (st väljundit). Seega toimub nn võimenduse efekt kus nt vähenenud toitepinge tõttu väheneb reaktiivvõimsuse genereerimine liinis mis omakorda põhjustab liinil pinge vähenemist.

Eelneva lühikokkuvõtteks, pikkade ülikõrgepingeliste vahelduvvoolu kaabelliinide osas on peamiseks probleemideks kordades kallim hind (võrreldes õhuliinidega), praktilise kogemuse puudumine ning teadmatus kõikide võimalike kitsaskohtade osas. Senini on ka Eestist rikkamad ja rahvarohkemad riigid ehitanud suhteliselt lühikesi ülikõrgepingelisi kaabelliine. Vastavaid, suhteliselt lühikesi ülikõrgepingelisi kaabelliine on rajatud pigem juhtudel, kus selleks on olnud väga mõjuvad põhjused. Tehnilise keerukuse ja suure maksumuse tõttu on aga välditud pikkade ülikõrgepingeliste vahelduvvoolu maakaabelliinide rajamisi.

CIGRE avaldas 2009 aastal täiendava uuringu [15], kus 73 võrguettevõttelt saadud praktilise info alusel leiti, et peale riket – *kui rikke asukoht oli maakaabelliinis tuvastatud* – võttis vahelduvvoolu kaabelliini parandamine ja remontimine keskmiselt aeg ca 25 päeva kui kaabel oli paigaldatud pinnasesse ja ligipääs sellele oli võimalik kaevetööde kaudu. Kui ülikõrgepingeline kaabel oli aga paigaldatud kaablitunnelisse, võttis keskmine kaabliparandamise protsess aega ca 45 päeva.

Iirimaa võrguoperaatori EirGrid üheksa-aastase (perioodil 2004 – 2012) statistilise rikkeinfo põhjal võttis nende ülikõrgepingeliste õhuliinide korral püsiva rikke eemaldamine ning liini parandamine keskmiselt aega alla ca 2 päeva [13]. Vastavalt CIGRE ja EirGrid infole on koostatud ka visuaalselt ülevaatlik joonis 28.



Joonis 28 Eeldatav aeg rikke eemaldamiseks ja liini remontimiseks, 330 kV kaabel- ja õhuliinide korral

Teatavasti võtab Eesti elektrisüsteemi operaator Elering AS tõsiselt elektrivõrgu talitluskindlust, sestap teostab ettevõtte koos partneritega regulaarselt erinevaid õppusi ja harjutusi, kuidas käituda erinevate võimalike häirete ning rikete korral. Ettevõtte (17.07.2026) avalikust uudisest [16] saab lugeda kuidas harjutati avariitaastesüsteemi läbimängu, mille raames püstitati loetud tundidega ajutine kõrgepingeliin, et elektrivarustuse saaks taastada olukordades kus iga minut loeb.

See on oluline erinevus kas võimalik tulevane Eesti–Läti vaheline ja ka Saaremaad toitev 330 kV transiitliin on tulevikus võimaliku rikke korral tööst väljas kas *ca* 2 või kuni 25 ööpäeva.

Kui õhuliinid on ehituselt lihtsad, lihtsasti remonditavad ning ligipääsetavad ja uue remontbrigaadi koolitamine toimub samuti suhteliselt kiirelt, siis maakaabelliini korral on need näitajad täpselt vastupidised. Maakaabelliinid on ehituselt keerukad, raskesti ligipääsetavad ning jätkumuhvide paigaldamine nõuab väga spetsiifilisi eriteadmisi, –oskusi ja –kogemusi ning aega.

Kui ülikõrgepingeliste õhuliide osas on Eestis kohapeal olemas nii kompetentsed ja pädevad inimesed kui ka vajalik eritehnika mastide püstitamiseks ning faasijuhtmete õhuliinile paigaldamiseks, siis ülikõrgepingeliste maakaabelliinide korral on puudus nii oskustega kohalikest inimestest kui ka eritehnikast, kui peaks tekkima tarvidus paigaldada 330 kV maakaabelliinile näiteks uut jätkumuhvi.

Kui 330 kV kaabelliini jätkumuhvi paigaldamise teenus osta sisse mõnest välisriigist, siis pelgalt inimeste ja eritehnika transpordi tõttu kujuneb kaablirikke kestus pikemaks juhul kui need võimekused oleksid võtta Eestist kohapealt.

Kohapealse kompetentsi loomine, hoidmine ning eritehnika hankimine annaks juurde reageerimise ja remontimise kiirust, kuid oleks seejuures täiendavaks püsivaks nn operatiivse valmisoleku kuluks.

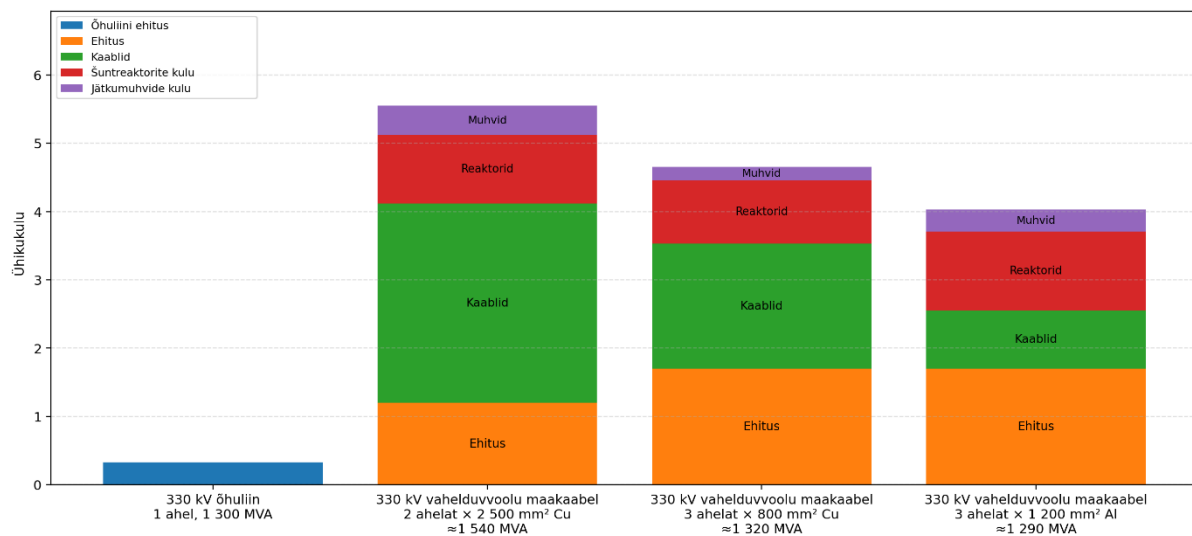
Peatüki kokkuvõtvaks lühijärelduseks on, et statistiliselt toimub ülikõrgepingelistel maakaabelliinidel samade liinikilomeetrite kohta kordades enam püsivaid rikkeid kui õhuliinidel ning nende rikete eemaldamine ning liini remontimine kestab samuti kordades kauem. Tööst väljas olevad ülikõrgepingelised transiitliinid ohustavad terve riigi elektrivõrgu talitluskindlust (nt ei võimalda teatud juhtudel tagada *n-1* reegli kehtivust).

KAABLITE HIND JA KAABELLIINI RAJAMISE MAKSUMUS

Kuna kaablite valmistamisel tuleb kasutada suurema ristlõikega juhte ning spetsiaalseid isoleer- ja kattematerjale, siis on kaablite hinnad juba pelgalt kasutatavate toormaterjalide tõttu kordades kõrgemad kui õhuliini paljasjuhtidel.

Toodetavate ülikõrgepingeliste 330 kV maakaablite pikkused ei ületa üldjuhul 1,1 km [7], olenevalt sellest, kui rasked või kui suurte ristlõigetega need on, võivad üksikute kaablite pikkused olla ka oluliselt lühemad. Kaablite pikkusele seavad piiri kaablitrumli suurus ning transportmasina kandevõime. Pikemate ülikõrgepingeliinide rajamise korral tuleb kõik need ca 0,5–1,1 km pikkused kaablijupid jätkumuhvide abil ühendada üheks pikaks liiniks. Nagu eelpool mainitud, on ülikõrgepingeliinide korral jätkumuhvide, mis samamoodi tähendab ka kaabli parandamist, paigaldamine kulukas ning aeganõudev toiming.

Kui näiteks 100 km Mägi-Kurdla – Kotlandi liin rajada kahe- või kolmeahelalise 330 kV kaabelliinina, siis oleks tarvis paigaldada vastavalt vähemalt ca 1 070 või 770 jätkumuhvi. Kaabelliini rajamise kulusid tõstab ja mõjutab oluliselt ka kaevandatava pinnase maht ja tüüp. Samuti mõjutab kaabelliini hinda kaabli elektri juhi materjal (vask või alumiinium), selle elektri juhi ristlõige ning kaabelliini mahtuvusliku reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks vajalik šuntreaktorite koguvõimsus ja -hulk. Visuaalne näide kuidas need erinevad tegurid ülikõrgepingelise vahelduvvoolu kaabelliini rajamise ühikkulu hinda orienteeruvalt võivad mõjutada on toodud joonisel 29.

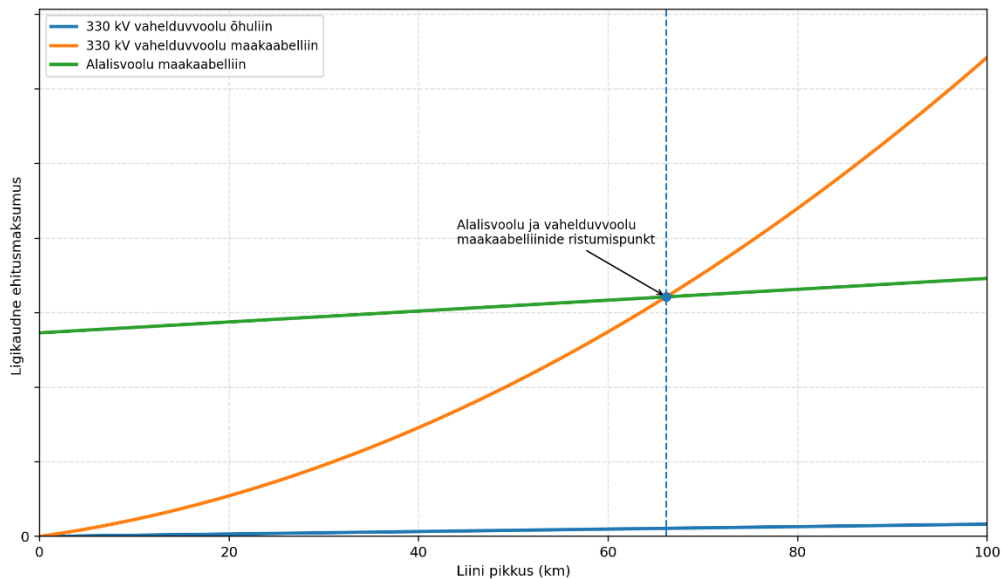


Joonis 29. Ülikõrgepingelise õhuliini ja erinevate konfiguratsioonidega maakaabelliinide rajamise suhtelised maksumuste erinevused

Jooniselt 29 nähtub, et liigselt üldistatud ühikkulude kasutamine ülikõrgepingeliste liinide rajamismaksumuste hindamisel ja võrdlemisel võib olla mõnevõrra eksitav.

Täiendavaid ebatäpsusi üldistatud ühikkulude kasutamisel põhjustab tõik, et vastupidiselt harjumuspärasele tavaloogikale muudes – *suurte mahtudega* – valdkondades, kus ühikkulude hinnad pigem vähenevad mahtude kasvamisega, siis vahelduvvoolu ülikõrgepingeliste maakaabelliinide korral ühikkulud hoopiski kasvavad rajatava liinipikkuse suurenedes. Seda peamiselt kasvavate reaktiiv-

võimsuste kompenseerimisega seotud tehniliste nn väljakutsete tõttu. Vahelduvvoolu õhuliinide ja alalisvoolu maakaabelliinide korral aga jäävad ühikkulud liini pikkuse kasvades suhteliselt samaseks, kui liini pikkused ei ületa ca paarisadat kilomeetrit. Visuaalne põhimõttejoonis võimalikest ehitusmaksumustest erinevate liinitüüpide ja -pikkuste korral on toodud joonisel 30.



Joonis 30. Visualiseering ligikaudsetest ehitusmaksumustest erinevate liinitüüpide ja -pikkuste korral

Sõltuvalt mitmetest erinevatest hinnastamise teguritest erinevate liinitüüpide lõpphindade kujunemisel võib alalisvoolu ja vahelduvvoolu maakaabelliinide rajamishindade nn ristumispunkt (joonis 30) nihkuda mööda liini pikkuse telge, kuid üldjuhul ei ületa see ca 90 kilomeetrit.

Alalisvooluliinide kõrget alghinda (joonis 30) põhjustavad liini otstesse rajatavad AC/DC ja DC/AC konverteralajaamad, mis muundavad vahelduvvoolu alalisvooluks ja alalisvoolu vahelduvvooluks.

Üks olulisim teave, mida jooniselt (joonis 30) saab näha on see, et lühikeste ülikõrgepingeliste vahelduvvoolu maakaabelliinide rajamine on suhteliselt odav. Liinipikkuse kasvades (nt üle viie või kümne kilomeetri) aga muutub vahelduvvoolu maakaabelliini rajamismaksumus kiiresti kordades kallimaks võrreldes õhuliini rajamisega.

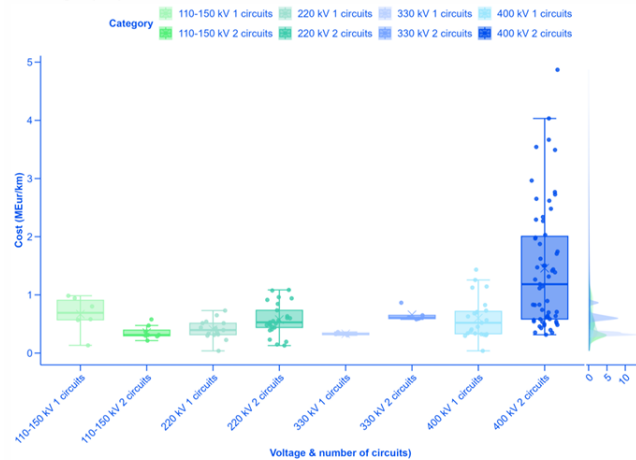
Euroopa Liidu (EL) energeetikasektorit reguleerivate asutuste koostöö amet ACER (*European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators*) tegeleb muuhulgas ka turuseirega ning kogub infot EL'is rajatud elektroenergeetika valdkonna infrastruktuuri kohta ning koostab kolme aastase välbaga infrastruktuuri võrdluskulude osas ülevaatlike raporteid. Nii eelmises, 2023 aasta raportis [17], kui selle aasta kevadel avaldatud raportis on toodud ka infot 330 kV õhu- ja maakaabelliinide rajamiskulude kohta [18].

Kuna 330 kV võrku on Euroopa Liidus suhteliselt vähe, siis sellesse pingeklassi tehtud varade (nt õhu- ja maakaabelliinid ning alajaamad) investeeringute arv on väikene. Eelmises raportis kasutati referentsina nt vaid kahe õhuliini rajamise infot. Selle aastases raportis aga kaheksa õhuliini ja nelja kaabelliini infot vastaval nimipingeklassil. Seega on alginfo valim väga tagasihoidlik. Täiendavat keerukust valmistab see, et raportis kasutatavate liinide pikkused pole eraldi välja toodud ning näidatud on vaid juba üldistatud väärtust €/km, ehk rahalist kulu kilomeetri kohta. Samuti pole toodud, mis materjalist (nt alumiinium või vask) on maakaabli voolujuhid. On põhjust eeldada, et

valimisse sattunud 330 kV kõrgepingelised vahelduvvoolu maakaabelliinid on suhteliselt lühikesed, st enamalt mõne kilomeetri pikkused ning nende reaktiivvõimsuse kompenseerimisvajadus vähene.

UIC indicators for overhead lines (OHL)

Per length (km)



Observations

- Only 400 kV – 2 circuit assets average above 1 million EUR/km.
- Small samples impact the capacity to identify outliers for some categories (e.g. 110-150kV or 330 kV lines).
- Cost spreads increase at higher voltages.
- Close-to-outlier values typically correspond to shorter routes.

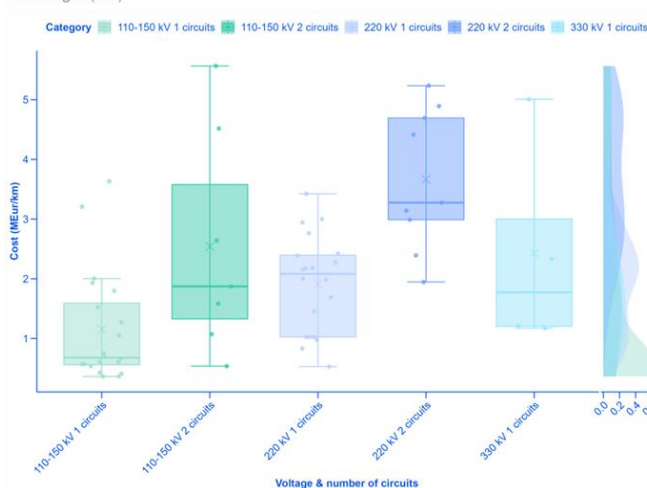
UIC indicators for overhead lines (MEur/km):

Category	Assets	Avg	P25	Median	P75	Min	Max
110-150 kV 1 circuits	6	0.67	0.57	0.69	0.91	0.13	0.98
110-150 kV 2 circuits	8	0.36	0.30	0.31	0.39	0.21	0.58
220 kV 1 circuits	15	0.41	0.32	0.40	0.51	0.04	0.73
220 kV 2 circuits	25	0.58	0.44	0.53	0.74	0.13	1.09
330 kV 1 circuits	3	0.33	0.32	0.33	0.34	0.31	0.36
330 kV 2 circuits	5	0.66	0.59	0.61	0.65	0.58	0.87
400 kV 1 circuits	23	0.60	0.33	0.52	0.72	0.04	1.43
400 kV 2 circuits	59	1.46	0.58	1.18	2.01	0.32	4.87

Joonis 31. Kõrgepingeliste õhuliinide rajamise maksumused megaeurodes liinikilomeetri kohta [18]

UIC indicators for underground lines

Per length (km)



Observations

- Overall average values x2.5 those of overhead lines
- Terrain type typically increases UIC value by a factor of 2.
- Small samples impact the capacity to identify outliers for some categories (e.g. 330kV).

UIC indicators for underground lines (MEur/km):

Category	Assets	Avg	P25	Median	P75	Min	Max
110-150 kV 1 circuits	20	1.15	0.56	0.68	1.59	0.36	3.63
110-150 kV 2 circuits	7	2.54	1.33	1.87	3.58	0.54	5.56
220 kV 1 circuits	20	1.91	1.03	2.08	2.40	0.53	3.42
220 kV 2 circuits	9	3.67	2.99	3.28	4.69	1.95	5.24
330 kV 1 circuits	4	2.43	1.20	1.77	3.00	1.17	5.01

Joonis 32. Kõrgepingeliste maakaabelliinide rajamise maksumused megaeurodes liini (km) kohta [18]

Näidatud tulemustest (joonised 31 ja 32) nähtub, et üheaahelise 330 kV vahelduvvoolu maakaabelliini rajamise keskmised kulud on õhuliini rajamisest $\approx 2,43/0,33 = 7,36$ korda kallimad. Minimaalsete rajamishindade erinevus on $\approx 3,77$ korda ja maksimaalne rajamishindade erinevus vastavalt $\approx 13,92$ korda.

Ühtlasi nähtub joonistest 31 ja 32, kus sama pingelassiga õhu- ja maakaabelliinide rajamismaksumused võivad praktikas erineda kordades, kuna iga individuaalse liini rajamismaksumus sõltub väga palju selle geograafilisest asukohast, tehnilisest konfiguratsioonist ja pikkusest.

Kui arvestada asjaolu, et senine avalikult teadaolev 500 kV ülikõrgepingelise maakaabelliini suurim pikkus on ≈ 40 km ja 330 kV maakaabelliini korral ≈ 28 km, on nendest pikemate maakaabelliinide tegelikku rajamise lõpphinda praktikas väga keeruline adekvaatselt prognoosida, sest tegu on senini – *rahvakeeli* – nn kaardistamata alaga.

Teadmist, et isegi Eestist oluliselt rikkamad ja/või suuremad riigid pole senini rajanud *ca* 40 kilomeetrist pikemaid vahelduvvoolu ülikõrgepingelisi maakaabelliine, võiks võtta väga tõsiselt. Füüsikaseadused kehtivad kõigile võrdselt ning nende ignoreerimine või nende vastu “võitlemine” läheb üldjuhul väga kulukaks maksma.

Ülemaailmse Kõrgepinge Elektrisüsteemide Nõukogu CIGRE (*Conseil International des Grands Réseaux Electriques*) töögrupi WG B1.07 tehtud uurimuse „*Statistics of AC underground cables in Power networks*” ja ICF Consulting poolt Euroopa Komisjonile koostatud aruande „*Overview of the Potential for Undergrounding the Electricity Networks in Europe*” baasilt võib järeldada, et eri-pingeklasside korral on õhu- ja kaabelliide rajamise hinnavaheemikud erinevad ning suure varieeruvusega.

Kui 110 kV õhu- ja kaabelliini rajamise hinnaerinevused kipuvad jääma 2–4 kordseks, siis 330 kV õhu- ja kaabelliini rajamise hinnaerinevused võivad küündida 5–21 kordseks. Kuna väiksemad hinnaerinevused on üldjuhul toodud suhteliselt lühikeste, alla 10 km kaabelliinide korral, siis pikemate ja mitmeahelaliste kaabelliinide planeerimisel tuleb arvestada pigem suurema hinnaerinevusega. Liini täpsem ja lõplik hind selgub üldjuhul alles pärast liini ehitamist. Liini esialgse hinna määramist raskendavad oluliselt rajatava elektriliini konfiguratsiooni võimalikud variatsioonid. Samuti mõjutab olulisel määral hindu kaablite hetkeline maailmaturu hind, mis on omakorda sõltuvuses müüjatele esitatud tellimuste määra ning kaabli toormaterjalide kättesaadavusest ja nende turuhindadest.

Kuna juba *ca* 40 kilomeetrine ülikõrgepingeline vahelduvvoolu maakaabelliin on äärmiselt pikk (kui võrrelda seda seni maailmas tehtuga), siis selle rajamishinna prognoosimisel võiks samuti lähtuda pigem kõige kõrgemast ühikhinnast (st *ca* 21 korda kallim kui õhuliin).

Seega kui praeguse seisuga on tulevikus rajatava *ca* 40 kilomeetrise Aulepa–Rehemäe 330 kV õhuliini maksumuseks planeeritud *ca* 13 M€, siis selle asendades vahelduvpinge maakaabelliiniga, tuleks arvestada tehtavate kulutustega, mis jäävad suurusjärku *ca* 270 M€.

Kuna senini pole – *avalikult teadaolevalt* – rajatud *ca* 100 km pikkust ülikõrgepingelist vahelduvvoolu maakaabelliini, ehk rajatava liini puhul oleks selgelt tegu “eksperimentaalliiniga”, siis selle rajamishinna prognoosimisel oleks kõige kõrgemast ühikhinnast (st *ca* 21 korda kallim kui õhuliin) lähtumine pigem väga konservatiivne ja tagasihoidlik eeldus.

Praeguse seisuga on tulevikus rajatava *ca* 100 kilomeetrise Mägi-Kurdla – Kotlandi 330 kV õhuliini hinnanguliseks maksumuseks *ca* 33 M€. Kui vastav vahelduvpinge õhuliin on soov asendada vahelduvpingelise maakaabelliiniga, siis tuleks arvestada tehtavate kulutustega, mis kujunevad suuremaks kui *ca* 700 M€.

Selliste, ligi ja üle kahekümnekordsete lisakulutuste põhjendamine peab elektritarbijatele olema väga hästi põhjendatud, sest vastavad hiigelinvesteeringud tõstaksid märkimisväärselt võrgutasusid.

Keerulisema konstruktsiooni ja spetsiaalsete erimaterjalide tõttu on kaabelliinide eeldatavad eluead *ca* 1,5–2 korda lühemad õhuliinide eeldatavast elueast. Õhuliinide eeldatavaks tehniliseks elueaks on *ca* 60...80 aastat [19] [20]. Seega vajavad kaabelliinid rekonstrueerimist iga *ca* 30...50 aasta järel [20] [21] [22] [23]. Rekonstrueerimine aga tähendab sisuliselt uue kaabelliini ehitamist. Kuuekümneme aasta jooksul tehtavad topeltinvesteeringud maakaabelliinidesse on nende selge puudus pikaajalisemate õhuliinide ees.

KOKKUVÕTE ÕHULIINIDE JA KAABELLIINIDE EELISTEST NING PUUDUSTEST

Lühidalt eelnevat kokku võttes võib vahelduvvoolu kõrge- ja ülikõrgepingelise **õhuliinide** korral nende positiivseteks omadusteks pidada:

- ehituslikku lihtsust,
- suhtelist töökindlust,
- püsivate rikete vähesust liinikilomeetri kohta,
- rikete tuvastamise ja eemaldamise kiirust,
- pikaajalisust,
- suurt ülekandevõimsust võrreldavatel juhistrüütel,
- sesoonset (talvist) ülekoormatavust,
- odavust.

Peamisteks negatiivseteks külgedeks võib pidada:

- suuremat visuaalset reostust,
- liinitrassi laiude koridore, mida tuleb teatud vältusega hooldada (metsade korral tähendab see üldjuhul lageraiet liinikoridorides).

Kõrge- ja ülikõrgepingeliste vahelduvvoolu **kaabelliinide** peamisteks positiivseteks omadusteks on:

- vähem visuaalset reostust,
- lühiajalise ülekoormamise võimalus,
- tormikindlus.

Negatiivseteks omadusteks on:

- suur mahtuvus,
- väiksem läbilaskevõimsus,
- eeldatav lühem tehniline eluiga,
- rikete suurem arv liinikilomeetri kohta,
- rikete kõrvaldamise pikk kestus (kordades pikem kui õhuliinide korral),
- kõrge maksumus.

Tabelites 5 ja 6 on toodud mõned olulised erinevused 330 kV õhu- ja kaabelliinide korral.

Tabel 5. 330 kV õhu- ja kaabelliinide ligikaudsetest maksumustest, genereeritavatest reaktiivvõimsustest ning šuntreaktorite arvust

	Õhuliin	Kaabelliin	Õhuliin	Kaabelliin	Õhuliin	Kaabelliin
	liini ligikaudne maksumus (M€)		liini genereeritav reaktiivvõimsus (MVar)		hinnanguline reaktorite arv (tk)	
Mägi-Kurdla – Kotlandi	33	700	50	1 730	0...1	10
Rehemäe – Aulepa	13	270	20	690	0...1	4
Tallinna ringliin	13	270	20	690	0...1	4

Tabel 6. 330 kV õhu- ja kaabelliinide eeldatavad rikke toimumise välbad ja rikete kõrvaldamise ajad

	Õhuliin	Kaabelliin	Õhuliin	Kaabelliin
	rikke kõrvaldamise eeldatav aeg (päevades)		rikke toimumise eeldatav välp (aastates)	
Mägi-Kurdla – Kotlandi	< 2	25...45	28	2,2
Rehemäe – Aulepa	< 2	25...45	70	5,3
Tallinna ringliin	< 2	25...45	70	5,3

Tabelitest 5 ja 6 on näha, et lisaks suurtele erinevustele liini rajamise maksumustes, on suured erinevused ka liinirikete toimumise eeldatavates välpades ning rikete kõrvaldamise eeldatavates kestustes.

ERINEVATEST ÕHU- JA MAAKAABELLIINI LÕIKUDEST KOOSNEV NN KOMBINEERITUD ÜLEKANDELIIN

Ülekandeliinide, mis on kombineeritud erinevatest õhu- ja maakaabelliini lõikudest, rajamisel tuleb arvestada ka nende eritüübiliste liinide kombineeritud positiivsete ning negatiivsete omadustega.

Kõrge- ja ülikõrgepingeliste vahelduvvoolu **kombineeritud** tüüpi ülekandeliini positiivseteks omadusteks on:

- visuaalse reostuse vähenemine soovitatavates liinilõikudes,
- eeldatav madalam ehitusmaksumus, kui liini rajamine terves ulatuses maakaabelliinina.

Mõne üksiku (1–2 tk) ja väga lühikese (kuni 2 km) maakaabelliini lõigu rajamisel on tehniliselt võimalik ka n-ö mööda vaadata spetsiaalsete lisašuntreaktorite vajadusest. Küll aga tuleb arvestada muude probleemidega, mida põhjustab liini kombineeritud olemus.

Negatiivsed tehnilised omadused on järgmised:

- kaob õhuliini positiivne omadus seda sesoonselt ülekoormata,
- kaob kaabelliini positiivne omadus seda lühiajaliselt ülekoormata,
- oht sagedasematele riketele maakaabellõikudes, kuna õhuliinidelt võivad edasi kanduda erinevad äikeseliigpinged,
- äikese liigpingete kaablisse edasikandumise vältimiseks tuleb kaabli otstes kasutada liigpingepiirikuid, mis aga ei suuda tagada täielikku tõrkekindlust (üldjuhul suudavad liigpingepiirikud kaitsta kaableid äikese liigpingete eest ca 80% tõenäosusega),
- rikete pikemad kestused isegi sellistel juhtudel, kui rikked toimuvad õhuliini lõikudes (lähtuda tuleb sellest, et vigastatud on maakaabellõik, mistõttu on raskendatud ka automaatse taaslülitamise kasutamine, mis aga omakorda põhjustab katkestuse kestuse pikenemist, samuti on liini kaitseautomaatika ning taaslülituse seadistused ja sätted keerukamad),
- rikkekoha tuvastamise oluliselt pikem kestus,
- rikke toimumisel maakaabelliini lõigus on rikete kestused väga pikad (nädalad ja kuud),
- kombineeritud liinide pikaajalised tõrked on ohuks elektrivõrgu töökindlusele (eriti ohtlik on olukord, kus kombineeritud liinil toimub rike ajal, kui mõni muu sama alajaama toitev liin ehk ringtoiteliin on hoolduses),
- kui maakaabellõikude osakaal kombineeritud liinis kasvab suureks, tekib vajadus reaktiivvõimsuste kompenseerimisele,
- õhuliinist kõrgem hind.

Olulisimate tehniliste puudustena kombineeritud liinis võib tuua maakaabelliinide lõigud, mis on nn nõrgimateks lülideks ketis.

Negatiivseteks eetilis/poliitilisteks külgedeks on:

- võrdse kohtlemise reegli eiramine (osades liinilõikudes/asulates on visuaalne reostus, osades mitte – tuleb koostada erisuste lubamise põhimõtted ja reeglid, millede praktiline ning kõiki osapooli rahuldav teostus on aga äärmiselt komplitseeritud ja aeganõudev ülesanne),
- võrdse kohtlemise reegli teostamine (praktilas tähendaks see liini rajamist täispikkuses maakaabelliinina)

Olulisimaks eetilis/poliitiliseks probleemiks kombineeritud liinidel on võrdse kohtlemise reegel. Võib eeldada, et isegi ühe erisuse lubamine viib olukorrani, kus suur enamus maaomanikke, kelle maid liinitrass läbib, soovivad või nõuavad ka enda maale jääva liiniosa maakaablistse viimist. See aga tähendab, et vältimaks kauakestvaid vaidlusi, oleks mõttekas juba terve liin sellisel juhul rajada maakaabelliinina. Nagu eelpool mainitud, on maakaabelliini rajamine finantsiliselt oluliselt kulukam kui õhuliini rajamine.

KOKKUVÕTE

Antud uuring võrdleb kõrge- ja ülikõrgepinge vahelduvvoolu õhu- ning maakaabelliinide tehnilisi, majanduslikke ja töökindlusega seotud omadusi. Täpsemalt käsitletakse kavandatavaid ligikaudu 40 km pikkust Aulepa–Rehemäe ja 100 km pikkust Mägi-Kurdla–Kotlandi 330 kV ühendust.

Uuringu kohaselt on 330 kV vahelduvvoolu maakaabelliinide peamine tehniline probleem nende väga suur elektriline mahtuvus. Maakaabli mahtuvus võib olla õhuliiniga võrreldes 10–20 korda suurem, mistõttu tekivad kaablis suured laadimisvoolud ja genereeritakse palju reaktiivvõimsust. Näiteks toodaks 40 km pikkune kaheahelaline Aulepa–Rehemäe kaabelliin ligikaudu 690 MVar ning 100 km pikkune Mägi-Kurdla–Kotlandi kaabelliin ligikaudu 1 730 MVar reaktiivvõimsust. See piirab kaabli aktiivvõimsuse ülekandevõimet, suurendab kadusid ja põhjustab pingetõusu.

Reaktiivvõimsuse ohjamiseks tuleks 330 kV kaabelliin jagada ligikaudu 20 km pikkusteks osadeks ning paigaldada liinile šuntreaktorid. Mägi-Kurdla–Kotlandi ühenduse puhul tähendaks see lisaks liini otstes asuvatele alajaamadele ligikaudu nelja uue kompenseerimisalajaama rajamist. Aulepa–Rehemäe liini puhul oleks vaja vähemalt üht täiendavat alajaama liini keskele. Kompenseerimisseadmed on suured, kallid ja muudavad võrgu juhtimise keerukamaks.

Kaabelliini läbilaskevõimet piirab ka soojuse hajumine. Õhuliini paljasjuhid jahtuvad ümbritsevas õhus ning neid saab külma ja tuulise ilmaga märkimisväärselt üle koormata. Maakaabli isolatsioon ja pinnas takistavad soojuse ärajuhtimist, mistõttu tuleb kasutada suurema ristlõikega juhte ning sama võimsuse edastamiseks rajada kaks või kolm paralleelset kaabliahelat (st paralleelliini). Kaabli läbilaskevõime sõltub oluliselt ka pinnase soojusjuhtivusest, kaablite paigutusest ning metallmantlite maandamis- ja ristühendusviisist.

Maakaabli kaitsevöönd on õhuliiniga võrreldes kitsam, kuid tegelik ehitus- ja hoolduskoridor oleks oluliselt laiem. Kaevamise korral tuleks arvestada kaheahelalise kaabelliini puhul ligikaudu 24 meetri ja kolmeahelalise liini puhul ligikaudu 30 meetri laiuse koridoriga. Seetõttu ei kao ka maakaabli puhul täielikult maastikuline mõju ega vajadus koridori regulaarselt hooldada.

Uuringus leiti, et maakaablid on küll tormikindlamad ja põhjustavad vähem visuaalset reostust, kuid neil võib esineda liinikilomeetri kohta õhuliinidega võrreldes oluliselt rohkem püsirikkeid ning ka rikete kõrvaldamine kestab oluliselt kauem. Õhuliini püsiv rike parandatakse keskmiselt vähem kui kahe ööpäevaga, maakaabli remont võib kesta ligikaudu 25–45 päeva. Pikkade 330 kV kaabelliinide kasutuskogemus ja rikkestatistika on maailmas piiratud, sest üle 40 km pikkusi sellelaadseid vahelduvvoolu maakaabelliine pole – *avaliku info alusel* – varem rajatud.

Majanduslikult on 330 kV maakaabelliin õhuliinist kordades kallim. Uuringus toodud allikate järgi võivad rajamiskulud olla ligikaudu 5–21 korda suuremad. Ligikaudu 13 miljonit eurot maksva Aulepa–Rehemäe õhuliini asendamine maakaabliga võiks maksta umbes 270 miljonit eurot. Ligikaudu 33 miljonit eurot maksva Mägi-Kurdla–Kotlandi õhuliini maakaablina rajamise kulu võib kujuneda üle 700 miljoni euro. Lisaks on kaabelliini eeldatav tehniline eluiga õhuliinist lühem ning liin võib vajada 30–50 aasta järele sisulist täielikku rekonstrueerimist.

Ekspert hinnangu lõppjäreldus on, et nii Aulepa–Rehemäe, Tallinna ringliin kui ka Mägi-Kurdla–Kotlandi 330 kV ühendused tuleks rajada täies ulatuses õhuliinidena. Samuti ei ole soovitatavad kombineeritud õhu- ja maakaablilõikudega lahendused, sest kaablilõigud muutuksid liini tehniliselt nõrgimaks osaks, suurendaksid kulusid ja rikete kestust ning tekitaksid maaomanike võrdse kohtlemisega seotud vaidlusi.

EKSPERTHINNANGU JÄRELDUS

Eksperthinnangu järelalusena on soovitatav nii ca 100 kilomeetrine Mägi-Kurdla – Kotlandi kui ca 40 kilomeetrised Tallinna ringliin ja Aulepa–Rehemäe 330 kV liinid täies ulatuses rajada õhuliinidena. Ülikõrgepingeliste maakaabelliinide rajamine on väga kulukas ning nende planeerimised peavad olema eelkõige elektritarbijatele väga hästi põhjendatud, sest ca 21 korda ja enam kallimate kaabelliinide ehitamine tõstab võrgutasude hinda ja aeglustab ülejäänud ülekandevõrgu osade kaasajastamist.

Samuti on nii tehnilistest, finantsilistest kui ka eetilisi/poliitilistest põhjustest lähtuvalt soovitatav mitte rajada erinevatest õhu- ja maakaabelliini lõikudest koosnevaid nn kombineeritud vahelduvvoolu ülikõrgepingeliine.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] E. Tiigimägi, Elektrivõrgud, Tallinn: TTÜ Elektroenergeetika instituut, 1997.
- [2] M. Meldorf, H. Tammoja, Ü. Treufeldt ja J. Kilter, Jaotusvõrgud, Tallinn: TTÜ kirjastus, 2007.
- [3] Elering, „Elektri tarbimine ja tootmine,“ 2026. [Võrgumaterjal]. Available: <https://elering.ee/elektri-tarbimine-ja-tootmine>. [Kasutatud 25 07 2026].
- [4] Elering, „Elektri ülekandevõrk,“ 2026. [Võrgumaterjal]. Available: <https://elering.ee/elektri-ulekandevork>. [Kasutatud 25 07 2026].
- [5] CIGRE Working Group B1.07, *Statistics of AC underground cables in power networks*, CIGRE, 2007.
- [6] University of Duisburg Essen.
- [7] ABB, *XLPE Land Cable Systems, User's Guide*, ABB, 2013.
- [8] A. Aurairatch, *A Preliminary Study of Loss Factor in Dielectric of Cable Produced in Thailand*, Bangkok: King Mongkut's Institute of Tehcnology North Bangkok, 2006.
- [9] Elering, „Kaitsevööndid,“ 2026. [Võrgumaterjal]. Available: <https://elering.ee/kaitsevoondid>. [Kasutatud 25 07 2026].
- [10] Elering, „Elektripaigaldise kaitsevöönd,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://elering.ee/elektripaigaldise-kaitsevoond>. [Kasutatud 25 07 2026].
- [11] Entsoe, „Experience of the operation of EHV-transmission cable systems (2006-2012),“ ENTSO-E, Brussels, 2013.
- [12] UK Government & Ramboll, „RAF021/2425 Study of the Potential for Cost Reduction in Undergrounding Transmission Lines over Long Distances (Literature Review and Cost Assessment),“ Department for Energy Security and Net Zero, 2025.
- [13] EirGrid, „North-South 400kV interconnection development,“ December 2017. [Võrgumaterjal]. Available: https://cms.eirgrid.ie/sites/default/files/publications/North-South-Interconnector_Comparative-Assessment-of-Transmission-Techno....pdf. [Kasutatud 23 07 2026].
- [14] Cigré Technical Brochure 379, „Update of Service Experience of HV Underground and Submarine Cable Systems,“ CIGRE , ISBN 978-2-85873-066-7 , Aprill 2009.
- [15] CIGRE, Update of Service Experience of HV Underground and Cable Systems, CIGRE, 2009.
- [16] Elering, „Kuidas taastada kõrgepingeliin loetud tundidega,“ 17 07 2026. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.facebook.com/eleringAS>. [Kasutatud 25 07 2026].

- [17] ACER (European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators, „Unit Investment Cost Indicators - Project Support to ACER,“ ACER, 2023.
- [18] ACER (European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators, „Energy infrastructure unit investment cost (UIC) indicators,“ ACER, 2026.
- [19] J. Schenk, „Technologies in the extra-high-voltage grid,“ Swissrid, 2024.
- [20] Comission oh the European communities, „First UCTE Comments on the Background Paper Undergrounding of Electricity Lines in Europe,“ UCTE, Brussels, 2003.
- [21] Chunbin Cable Co., Ltd, „What are the restrictions on XLPE cable?,“ Chunbin Cable Co., Ltd, 2026.
- [22] A. S. Alghamdi ja R. K. Desuqi, „A study of expected lifetime of XLPE insulation cables working at elevated temperatures by applying accelerated thermal ageing,“ *Heliyon*, kd. 6, 2020.
- [23] R. Mutepe, B. Thango ja P. Bokoro, *Practical Study on the Lifetime Prediction of High Voltage Cross-Linked Polyethylene Cable (XLPE) using Thermal Aging*, Johannesburg, 2023.
- [24] P. Ashworth, *Comparing high voltage overhead and underground transmission infrastructure (up to 500 kV)*, Sydney: The University Of Queensland, 2023.