EESTI MAAÜLIKOOL
Metsanduse ja inseneeria instituut

Lehar Laurits

VAHELDUVVOOLU MÕJU VESINIKUTORU KATOODKAITSESÜSTEEMILE

THE EFFECT OF ALTERNATING CURRENT ON THE CATHODIC PROTECTION SYSTEM OF A HYDROGEN PIPELINE

Magistritöö
Energiakasutuse õppekava

Juhendajad: Andres Annuk, PhD
Toivo Ardel, Msc

Tartu 2025

Eesti Maaülikool

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51006		Magistritöö lõputöö lühikokkuvõte	
Autor: Lehar Laurits		Õppekava: Energiakasutus	
Pealkiri: Vahelduvvoolu mõju vesinikutoru katoodkaitsesüsteemile			
Lehekülgi: 54	Jooniseid:14	Tabeleid:4	Lisasid: 6
ETIS-e valdkond ja CERCS-i kood: 4. Loodusteadused ja tehnika 4.17 Energeetikaalased uuringud T140 Energeetika Juhendaja(d): prof. Andres Annuk, Toivo Ardel, Msc Osakond või õppetool: Energiakasutuse õppetool Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2025			
Magistritöö keskendub vesiniku kui võimaliku tulevikuenergiakandja transpordi võimalustele ning sellega seotud infrastruktuurilistele ja tehnilistele väljakutsetele. Eesmärk on uurida, kuidas kavandada vesinikutorustik ühisesse trassikoridori kõrgepingeliiniga. Töö käsitleb katoodkaitse rakendamist kui tõhusat meetodit torustiku korrosioonikaitseks, samuti vahelduvvoolu mõju torudele pinnases, mis võib sobivates tingimustes kiiresti põhjustada kahjustusi. Läbiviidud mõõtmised Balticconnectori gaasitorul näitavad, et olemasolevad kaitsesüsteemid toimivad ning annavad usaldusväärse aluse vesinikutorude integreerimiseks kõrgepingeliinide trassikoridori.			
Võtmesõnad: Vesinik toru, katoodkaitse, vahelduvvoolu korrosioon, kõrgepinge liinid			

Estonian University of Life Sciences
Kreutzwaldi 1, Tartu 51006

Abstract of Master's Thesis

Author: Lehar Laurits

Curriculum: Energy Application Engineering

Title: The Effect of Alternating Current on the Cathodic Protection System of a Hydrogen Pipeline

Pages: 54	Figures: 14	Tables: 4	Appendices: 6

ETIS research field and (CERCS) code: 4. Loodusteadused ja tehnika 4.17 Energeetikaalased uuringud T140 Energeetika
Supervisor(s): prof. Andres Annuk, Toivo Ardel, Msc
Department / Chair: Energy Application Engineering
Place and year of defence: Tartu, 2025

This master's thesis focuses on the transportation of hydrogen as a potential future energy carrier and the associated infrastructural and technical challenges. The objective is to explore how a hydrogen pipeline can be planned within a shared corridor with a high-voltage power line. The study examines the application of cathodic protection as an effective method for preventing pipeline corrosion, as well as the impact of alternating current (AC) interference on buried pipelines, which can cause rapid damage under suitable conditions. Measurements carried out on the Balticconnector gas pipeline confirm that existing protection systems are effective and provide a reliable basis for integrating hydrogen pipelines into high-voltage corridor infrastructure.

Keywords: Hydrogen pipeline, cathodic protection, alternating current corrosion, high voltage electricity lines

SISUKORD

SISSEJUHATUS 5
1. VESINIKU TRANSPORT MAAALUSES TORUSTIKUS 6
1.1. Vesiniku omadused 7
1.2. Vesinik ja maagaas 8
1.3. Trassikoridor 10
1.4. Ohutusnõuded ja kaitsevöönd 12
1.5. Torustiku disain ja spetsifikatsioon 14
1.6. Toruliini isolatsioon ja maa alla paigutamine 16
2. KATOODKAITSE 17
2.1. Katoodkaitse süsteemi hindamise meetodid 19
2.1.1. Vahelduvvoolu pingegradiendi mõõtmine 19
2.1.2. Lähiintervall potensiaalimõõtmine 20
2.1.3. ON- OFF mõõtmine 20
2.2. Katoodkaitsejaama põhikomponendid 21
2.3. Mõõtepunktid 24
2.4. Uitvoolud 25
3. VAHELDUVVOOLU MÕJU TORUSTIKULE 28
3.1. Vahelduvvoolu kõrgepingeliinide häiringu tüübid 29
3.1.1. Mahtuvuslik sidumine 30
3.1.2. Induktiivne sidumine 31
3.1.3. Takistuslik või juhtiv sidumine 32
3.2. Vahelduvvoolu korrosioon 34
3.3. Vahelduvvoolu filter 36
3.4. Vahelduvvoolu filtri efektiivsuse kontroll 39
3.5. Kupongide kasutamine korrosiooniriski hindamiseks torustikul 41
3.6. Tark pingepõhine lahutusseade 42
3.7. Kontrolltegevused torustikul 44
KOKKUVÕTE 45
ALLIKALOEND 46
LISAD 48
Lisa 1. Mõõtepunkt tüüp 1 skeem 49
Lisa 2. Mõõtepunkt tüüp 3 skeem 50
Lisa 3. Mõõtepunkt tüüp 4 skeem 51
Lisa 4. Mõõtepunkt tüüp 7 skeem 52
Lisa 5. Mõõtepunkt tüüp 8 skeem 53
Lisa 6. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta 54

SISSEJUHATUS

Energiamajanduse areng ja üleminek puhtamatele energiaallikatele on toonud kaasa märkimisväärseid muutusi energiainfrastruktuuris. Üheks oluliseks sammuks selles suunas on vesiniktorustiku rajamine, mis võimaldab puhta energia efektiivset transporti. Eestis, kus võimalik trassivalik vesiniktorustiku rajamiseks oleks kõrgepingeliini kaitsevööndisse, kerkivad esile spetsiifilised tehnilised ja ohutusalased väljakutsed. Nendest üheks keskseks küsimuseks on katoodkaitsesüsteemi toimivus ja vahelduvvoolu mõju torujuhtmele.

Vesiniktorustiku ehitamine kõrgepingeliini kaitsevööndisse tähendab, et torujuhe paikneb piirkonnas, kus esineb tugev elektromagnetiline väli. See väli tekitab torujuhtmes vahelduvvoolu, mis võib mõjutada selle materjalide korrosioonikindlust. Tavapäraselt kasutatakse metalltorude korrosioonikaitseks katoodkaitsesüsteeme, mis toimivad elektrokeemilise protsessi põhimõttel, vähendades metalli lagunemist elektrolüütilises keskkonnas. Kui aga torustik paikneb kõrgepingeliinide lähedal, võib vahelduvvool indutseeruda toru pinnal, põhjustades täiendavat elektrokeemilist aktiivsust ja suurendades korrosiooniriski.

Antud magistritöö keskendub vahelduvvoolu mõjule katoodkaitsesüsteemile vesiniktoru puhul Eestis. Uurimistöö eesmärk on hinnata, kuidas kõrgepingeliini läheduses paiknev elektromagnetväli mõjutab torujuhtme korrosioonikaitset ja millised meetmed võiksid tagada vesiniktorustiku pikaajalise töökindluse, analüüsitakse katoodkaitsesüsteemi efektiivsust sellistes tingimustes ning tuuakse välja võimalused riskide maandamiseks. Lisaks viiakse läbi mõõtmised, et näha kuidas toimib olemasolev vahelduvvoolu kaitsesüteem.

Uurimuse tulemused on olulised, et tagada vesiniktorustike ohutu ja kestlik kasutamine Eestis, arvestades tehnilisi ja keskkonnaga seotud väljakutseid. Samuti aitab töö kaasa teadmiste täiendamisele katoodkaitsesüsteemide ja vahelduvvoolu koosmõju valdkonnas, pakkudes praktilisi lahendusi ja soovitusi vesiniktorustike projekteerimiseks ja hooldamiseks.

1. VESINIKU TRANSPORT MAAALUSES TORUSTIKUS

Käesoleva uurimuse aluseks on Põhjamaa – Balti vesinikukoridori insener- tehniline raport, mille eesmärk on toetada vesiniku kui madala süsinikuheitega energiakandja kasutuselevõttu regiooni energiasiirde strateegias. Arendatav koridor on kavandatud looma infrastruktuurse ühenduse Skandinaavia ja Baltikumi vahel, võimaldades puhta vesiniku ulatuslikku transporti ja integreerimist Euroopa vesinikuvõrgustikku.

Raport on üles ehitatud tervikliku metoodilise käsitlusena, hõlmates järgmisi temaatilisi osi[1]:

- Rahvusvaheliste ja Euroopa standardite ning regulatsioonide ülevaade, mis käsitlevad vesiniku kvaliteeti, torustike projekteerimist ja ohutust;
- Võimalikud trassikoridorid ja nende tehnilis-majanduslik teostatavus;
- Vesiniku transportimisega seotud ohutustegurid, sealhulgas riskihindamine ja lekkeanalüüs;
- Võrgu modelleerimine, sealhulgas dünaamilised vooluarvutused ja rõhu- ning mahuoptimeerimine;
- Torustiku tehnilised spetsifikatsioonid: materjalivalik, rõhuklassid, tihendustehnoloogiad ning sobivus vesiniku füüsikalis-keemiliste omadustega;
- Optimeerimisstrateegiad võrgu töökindluse, efektiivsuse ja investeeringutasuvuse tagamiseks;
- Strateegilised ja tehnilised soovitused huvirühmadele ning indikatiivne maksumuse hinnang, sõltuvalt trassi geomeetriast ja tehnoloogilistest valikutest.

Lisaks sisaldab analüüsi vesiniku ja maagaasi füüsikalis-keemiliste omaduste kohta. Tabelarvuline ja kirjeldav käsitlus toob esile nende kahe gaasi vahelised olulised erinevused,

millel on otsene mõju torustike projekteerimisele, materjalide valikule ning ohutusmeetmete määratlemisele.

1.1. Vesiniku omadused

Vesinik on perioodilisustabeli esimene ja kõige kergem element, millel on unikaalsed füüsikalised ja keemilised omadused. Selle aatom koosneb ühest prootonist ja ühest elektronist ning puudub neutron. Vesinik esineb looduses enamasti keemiliste ühendite kujul näiteks vees ning vabal kujul on see väga haruldane. Tööstuslikus ja energeetilises kontekstis kasutatakse peamiselt molekulaarset vesinikku.[2]

Molekulaarne vesinik on toatemperatuuril ja normaalrõhul värvitu, lõhnatu ja maitsetu gaas. See on kõige kergem teadaolev gaasiline aine, mille tihedus 0 °C juures on umbes 0,08988 g/L. Vesiniku keemistemperatuur on -252,87 °C ja sulamistemperatuur -259,14 °C, mistõttu esineb see atmosfäärirõhul vedelal kujul ainult äärmuslikult madalatel temperatuuridel. Sellel on väga väike viskoossus ja kõrge difusioonivõime, mistõttu lekib see hõlpsasti läbi mitmesuguste materjalide.[4]

Vesinik on keemiliselt väga reaktiivne, eriti kõrgetel temperatuuridel või katalüsaatori juuresolekul. Olles oksüdatiivses keskkonnas, reageerib see kergesti mitmete elementidega, moodustades ühendeid, mille hulka kuuluvad näiteks vesi (H_2O), ammoniaak (NH_3), vesinikkloriid (HCl) ja erinevad metallhüdriidid (NaH). Vesiniku põlemine on tugevalt eksotermiline protsess. See reaktsioon on aluseks ka vesinikupõhisele energiatootmisele kütuseelementides, kus vesiniku keemiline energia muundatakse elektrienergiaks, eraldades vaid veeauru kui kõrvalprodukti.[3]

Vesinik võib käituda nii redutseeriva kui ka mõnes kontekstis oksüdeeriva ainena. Näiteks metallide redutseerimisel eemaldab vesinik metalloksiididest hapniku. Samas võib vesinik ise mõnedes tingimustes elektronide kaotamisel oksüdeeruda. Vesinikugaasi molekul koosneb kahest aatomist, mis on seotud tugeva kovalentse sidemega. Selle tõttu on molekul stabiilne, kuid siiski reaktsioonivõimeline sobivates tingimustes.[2]

Keemiliste omaduste poolest on vesinik unikaalne ka seetõttu, et see ei kuulu selgelt ei metallide ega mittemetallide hulka. Kuigi vesinik asub perioodilisustabelis 1. rühmas, ei ole selle omadused sarnased leelismetallidega. Samas jagab vesinik sarnasusi halogeenidega, moodustades ühe sideme ja vajades ühe elektroni, et saavutada stabiilne konfiguratsioon.[2]

Vesinik on kergestisüttiv ja moodustab õhuga plahvatusohtlikke segusid kontsentratsioonivahemikus 4–75%. Leegi süttimistemperatuur on umbes 585 °C ja põlemine toimub suure kiirusega. Kuna vesiniku leek on peaaegu nähtamatu ja kõrge temperatuuriga, on selle kasutamisel oluline rakendada rangeid ohutusmeetmeid.[3]

1.2. Vesinik ja maagaas

Vesinik ja maagaas (metaan, CH_4) on mõlemad olulised gaasilised kütused, mille roll energiasüsteemides on viimastel aastakümnetel oluliselt kasvanud. Käesolevas peatükis võrreldakse neid kahte energiaallikat erinevate omaduste ja kasutusvaldkondade põhjal, pöörates tähelepanu nii nende keemilis-füüsikalistele omadustele kui ka keskkonnamõjudele ja sobivusele kestliku energiamajanduse kontekstis.

Vesinik on perioodilisustabeli kõige kergem ja lihtsama ehitusega element, esinedes toatemperatuuril värvitu ja lõhnatu gaasina. Selle molaarmass on umbes 2 g/mol, mis teeb vesinikust väga väikese tihedusega gaasi. Maagaas, mis koosneb peamiselt metaanist (CH_4), on samuti värvitu ja lõhnatu (kuigi tarbija jaoks lisatakse lõhnaaineid), kuid selle molaarmass (~16 g/mol) ja energiatihedus mahuühiku kohta on vesinikust oluliselt suuremad. Massiühiku kohta on vesinikul siiski kõrgem energiatihedus (~120–142 MJ/kg), samas kui metaanil on see umbes 50–55 MJ/kg. [4]

Energiatiheduse erinevus tähendab, et vesiniku kasutamiseks tuleb arvestada selle säilitamise ja transpordi keerukusega. Vesinik vajab kõrgsurvesäilitust (200–700 bar), vedelvormis -253 °C temperatuure või keemilist sidumist (nt metalli hüdriidid), mis muudab logistika keerukamaks ja kallimaks kui maagaasi puhul. Maagaasi olemasolev taristu (torustikud, mahutid, kompressorjaamad) on juba laialdaselt väljaarendatud, võimaldades kütust tõhusalt ja odavalt ladustada ning transportida.[3]

Keemilisest aspektist erinevad vesiniku ja maagaasi põlemisreaktsioonid oluliselt. Vesiniku täielikul põlemisel hapnikus tekib ainult veeaur:

See muudab vesiniku puhtaks kütuseks, kuna puudub CO_2 emissioon. Samuti ei teki väävel-ega tahmaühendeid. Siiski võib kõrgetel temperatuuridel tekkida väikestes kogustes lämmastikoksiide (NO_x), kui põlemine toimub õhus.

Maagaasi ehk metaani põletamisel toimub oksüdatsioonireaktsioon:

Kuigi see reaktsioon on keskkonnamõjude mõttes puhtam kui näiteks kivisöe või diislikütuse põletamine, tekib siiski märkimisväärne kogus süsihappegaasi. Veelgi enam, metaanil on kasvuhoonegaasina umbes 25 korda suurem globaalne soojendav potentsiaal kui CO_2-l. Seetõttu on oluline arvestada ka maagaasi tarneahela lekkekohtades atmosfääri sattuva metaani mõjuga.[6]

Tabel 1. Vesiniku ja maagaasi füüsikalised omadused[4]

Omadus	Ühik	Vesinik	Metaan
Molekulmass	g/mol	2.016	16.04
Tihedus	Kg/m^3	0.0899	0.717
Keemistemperatuur	^oC	-252.87	-161.5
Sulamistemperatuur	^oC	-259.14	-182.5
Mahupõhine energiatihedus	MJ/ Nm^3	10.8	35-39
Plahvatusohtlik kontsentratsioon õhus	%	4-75	5-15

Mõlemat gaasi kasutatakse laialdaselt energiasektoris, tööstuses ja transpordis. Maagaas on hetkel oluliseks allikaks soojatootmises, elektrijaamades ja kodumajapidamistes. Lisaks kasutatakse seda sisepõlemismootorites (CNG/LNG sõidukid). Vesiniku kasutamine on täna

piiratum, kuid kiiresti kasvav, eriti rohetehnoloogiate kontekstis. Vesinikku rakendatakse kütuseelementides, mis muundavad keemilise energia otse elektriks, eraldades ainsaks kõrvalproduktiks vee.[6]

Transpordisektoris on vesinik atraktiivne valik raskeveokitele, bussidele ja rongidele, kus akuenergia tihti ei ole piisav. Kütuseelemendiga sõidukid pakuvad lühikest tankimisaega ja pikka sõiduulatust. Samas on vesiniku infrastruktuur alles kujunemas, võrreldes välja arendatud maagaasivõrguga.[6]

Vesinikku ei leidu Maal vabal kujul, seega tuleb seda toota. Enamus vesinikust toodetakse täna maagaasi reformimise teel (nn hall vesinik), mis kaasneb CO_2 emissioonidega. Roheline vesinik saadakse aga vee elektrolüüsil taastuvenergia abil ning sellel on potentsiaal täielikult süsinikuneutraalsetele energiasüsteemidele üleminekul. Samas on elektrolüüsi energiatõhusus ja hind täna veel märgatavaks piiranguks.[2]

Maagaas on looduslik fossiilkütus, mille kättesaadavus on hea, kuid selle jätkusuutlikkus piiratud. Gaasi põletamine tekitab CO_2 ja metaanilekked on kliimamõjude seisukohalt probleemsed. Seetõttu nähakse vesinikku kui võimalikku asendajat just nende sektorite dekarboniseerimisel, kus elektrifitseerimine ei ole teostatav.[3]

1.3. Trassikoridor

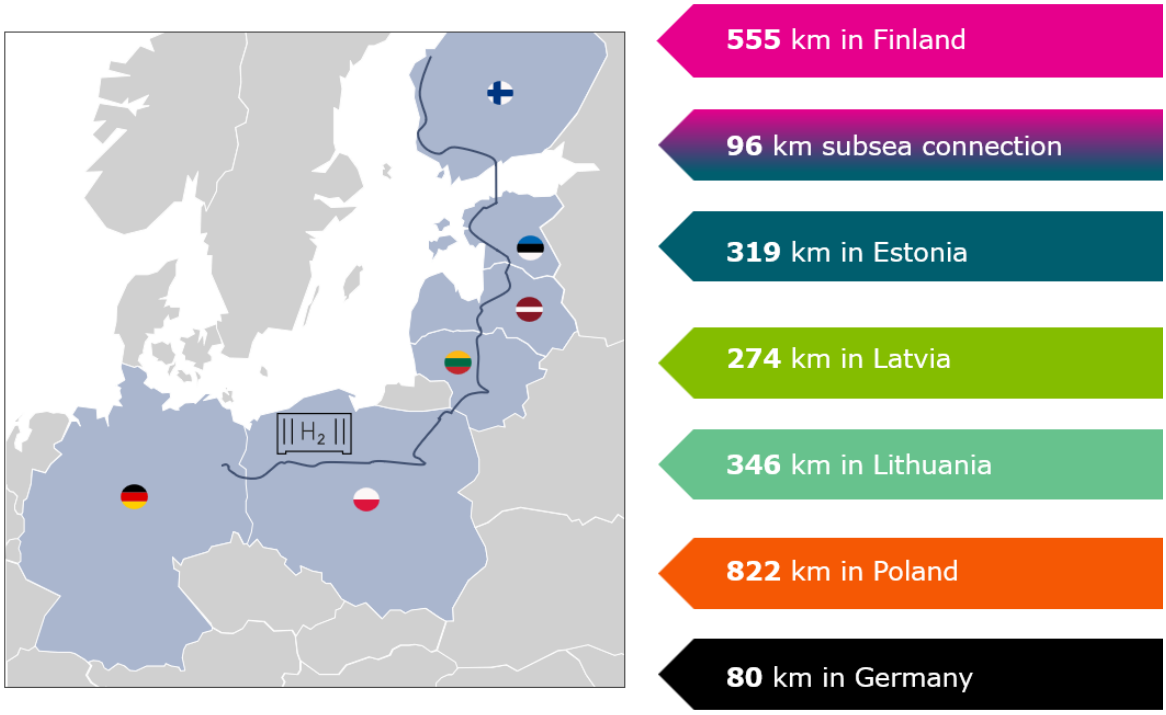
Marsruudi planeerimisel kasutati mitmekriteeriumilist hindamisraamistikku GoldSET Spatial tarkvara abil, mis võimaldab kompleksset ja läbipaistvat otsustustoetust lineaarobjektide – näiteks torustike – trasside määramisel. GoldSET ühendab automaatselt kõik klassifitseeritud ja kaalutud ruumilised indikaatorkihid (nt kaitsealad, reljeef, asustustihedus, tehniline infrastruktuur), mille tulemusel genereeritakse terviklik sobivuspind. See pind kajastab iga ruumipunkti sobivusastet antud eesmärgist – antud juhul vesinikutorustiku trassi rajamisest – lähtuvalt.[1]

Lõpp-produktina saadakse nn sobivussoojuskaart, mis kujutab endast integreeritud sobivusindeksit ning mille alusel saab tuvastada võimalikud optimaalsed trassivariandid. Meetod on korratav, põhjendatav ning metoodiliselt robustne, võimaldades vajadusel

kaasata ka avalikkuse või sidusrühmade tagasisidet piirangute ja eelisseisundite täpsustamiseks.[1]

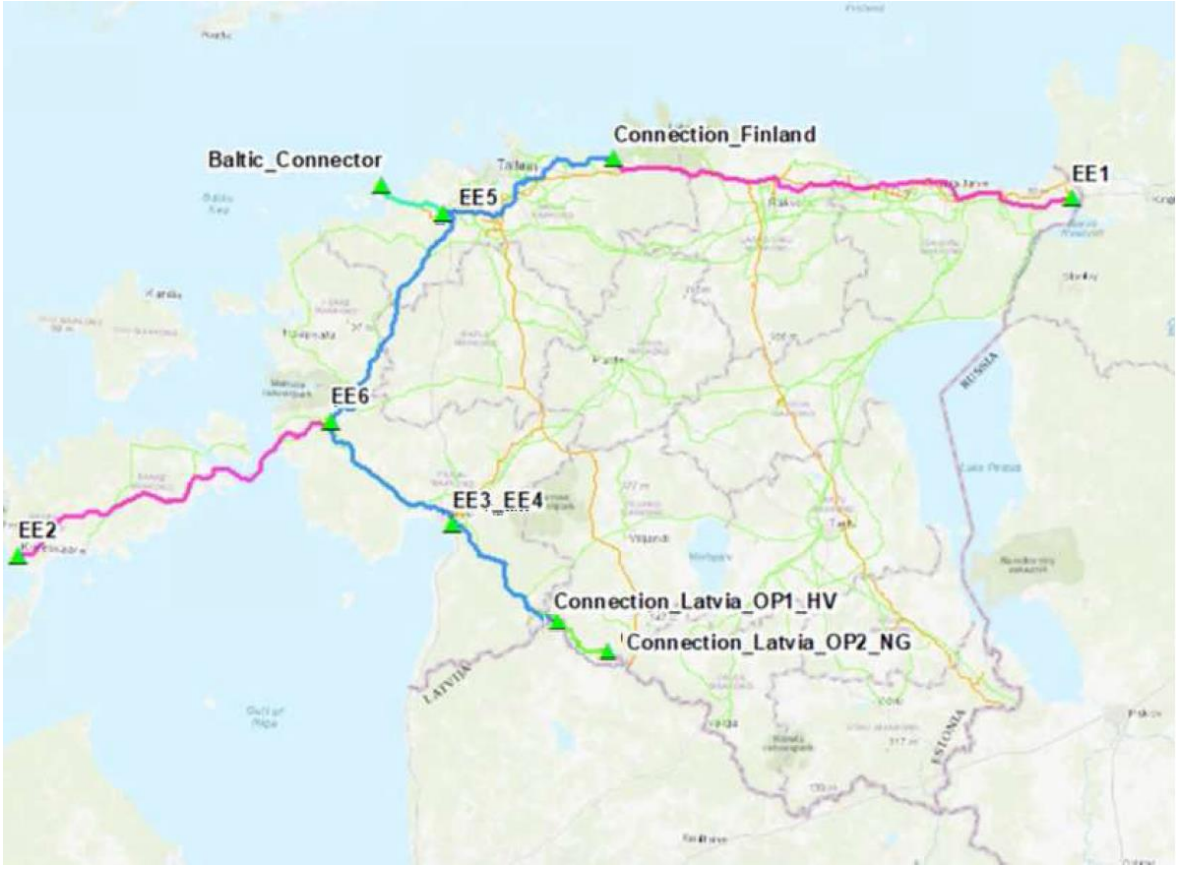
Sobivuskaartide alusel viidi läbi koridoripõhine marsruudioptimeerimine. Selle käigus tuvastati iga stsenaariumi puhul lähte- ja sihtpunkti vaheline kõrgeima sobivusega ning lühima arvutusliku pikkusega ühendus. Optimeerimisalgoritm arvestas kõiki ruumilisi piiranguid, ebasoovitavaid tegureid ja potentsiaalseid eeliseid, pakkudes seeläbi tasakaalustatud ja praktilist koridorivarianti.[1]

Tulemuseks saadud koridor tähistab eelistatud uurimisala, mille piires saab läbi viia detailsemaid uuringuid, sh kohapealseid inspekteerimisi ning lõpliku trassi määramist. Koridorid liigitati sobivusindeksi alusel.



Joonis 1. NBHC trassikoridori ülevaade.[1]

Eestisse rajatava vesiniktoru esmane trassikoridor on kaalutud luua Lääne- Eestisse ja osaliselt kattuks Harku- Lihula- Sindi 330 kV kõrgepingeliini kaitsevööndiga. Trassikoridori valikul on arvestatud võimalikke mere tuuleparkidega, et lääneranniku toota vesiniku ja potentsiaalne metanoolitehasega Pärnumaal, mis tarbiks vesinikku. Täpne trassikoridori valik sõltub tulevikus riigi eriplaneeringust, kus arvestakse erinevaid mõjusi. Lisaks mõjutab trassivalikut koht, kust Soomest saab tuua meretoru maismaalt merre, arvestades nende riskianalüüsi ja ranniku piiri.



Joonis 2. Võimalik trassikoridori kaart.[1]

1.4. Ohutusnõuded ja kaitsevöönd

Vesinik on eripäraste omadustega kütus, mille ohutusega seotud aspektid nõuavad eritähelepanu, eriti selle transportimisel torustikes. Vesiniku füüsikalised omadused erinevad märgatavalt teistest tavapärastest kütustest, näiteks maagaasist. Vesinik on kaheksa korda kergem kui maagaas ja neliteist korda kergem kui õhk. Tänu oma kergusele hajub see

avatud keskkonnas väga kiiresti, mis on oluline ohutust suurendav tegur – võimalik süttiv õhkkond väheneb kiiresti, kui puuduvad süüteallikad.[1]

Vesiniku ja maagaasi isesüttimistemperatuur on sarnane, ületades 538 °C, mis on märksa kõrgem kui näiteks bensiiniaurudel. Samas on vesiniku süttivusvahemik oluliselt laiem – 4% kuni 75% õhus. Optimaalses segus (29% vesinikku õhus) on süttimiseks vajalik energia väga väike, mistõttu võib isegi väike säde põhjustada plahvatuse. See muudab vesiniku eriti tundlikuks süüteallikate suhtes, kuigi madalates kontsentratsioonides on süttimisenergia võrreldav teiste kütustega. Vesinik põleb kahvatusinise leegiga, mis on päevavalges peaaegu nähtamatu. Seetõttu kasutatakse vesinikusüsteemides spetsiaalseid leegi- ja gaasiandureid, mis võimaldavad kiiret lekke või tule tuvastamist.[1]

Kaitsevöönd tähistab ala torustiku ümbruses, kus ehitustegevus on piiratud või keelatud. Vesiniku puhul on need tsoonid suuremad kui maagaasi puhul, kuna vesinik hajub kiiremini ja võib seetõttu tekitada suurema võimaliku süttiva ala.

Olemasolevate torustike suhtes puuduvad täiendavad regulatsioonid, mis keelaks vesinikutorude rajamise vahetusse lähedusse – torud võivad asuda kõrvuti või isegi üksteise peal. Praktikas ei ole see siiski soovitatav, kuna selline paigutus raskendab oluliselt ehitustöid ja võib põhjustada tehnilisi probleeme. Eriti tuleb tähelepanu pöörata vesinikutorude paigutamisel maagaasitorude lähedusse abiseadmete juures, näiteks kompressorjaamad, sest vesinikutorude puhul on ohutustsoonid ligikaudu kolm korda suuremad.[1]

Kaitsevöönd sõltub torustiku rõhuklassist ja läbimõõdust. Kui Eestis on D-kategooria gaasitorul, mille läbimõõt üle 500 mm 10 m + 10 m kaitsevöönd, siis vesiniktoru puhul peaks olema vähemalt 20 m + 20 m. Tähelepanu tuleb selle juhtida, et hetkel ei ole Eestis ega euroopas kehtivaid määruseid või standardeid, millega oleks kaitsevööndi laius reguleeritud ja kaitsevööndi saab iga riik seadustega määrata.[1]

Kõrgepingeliste õhuliinide läheduses ei kehti vesinikutorude paigutamisel täiendavaid õiguslikke piiranguid vastavalt standarditele ja kehtivatele määrsutele. Siiski tuleb arvestada mitmete tehniliste väljakutsetega. Kõige suuremaks probleemiks on korrosioonikaitse, kuna kõrgepingeliinidest indutseeritud vahelduvvool mõjutab tavapäraste katoodkaitsemeetodite tõhusust. Seetõttu tuleb torustike projekteerimisel kõrgepingeliinide koridorides kasutada alternatiivseid kaitseviise.[1]

1.5. Torustiku disain ja spetsifikatsioon

Antud peatükis tuuakse välja modelleeritud torustiku parameetrid ja millistele kriteeriumid on torustikule esitatud. Hetkel planeeritav transiittorustik oleks valmistatud madalasüsiniku sisaldusega terasest, mis vastab API standarditele, mida kasutatakse maagaasi transpordiks.

Tabel 2. Toru spetsifikatsioon [1]

Kirjeldus	ühik	väärtus
Kavandatud temperatuur	^{o}C	-40 – 110
Opereerimis temperatuur	^{o}C	-20 – 50
Arvutusrõhk	bar	80
Töörõhk	bar	40 – 75
Maksimaalne voolamiskiirus	m/s	40
Kavandatud eluiga	Aasta	40
Väline läbimõõt	Toll	48
Toruseina paksus	mm	40
Toru seina soojusjuhtivus	W/m/K	45

Uuringus on lähtutud konservatiivsest lähenemisest, eeldades ettevaatuspõhimõtet võimalike tarbimisandmete määramatuse tõttu. Tulemuseks on, et vesiniku jaoks vajalik torusein on ligikaudu 1,6 korda paksem kui samaväärne toru maagaasi jaoks.

Seinapaksuse arvutamisel kasutatakse järgmist valemit (vastavalt IGEM/TD/1 standardile)[1]:

$$t = P \cdot D \cdot (20 \cdot F \cdot S)^{-1} \quad (1)$$

Kus:

- t = arvutuslik seinapaksus (*mm*)
- P = töörõhk (*barg*)
- D = toru välisläbimõõt (*mm*)
- F = disainitegur
- S = minimaalne voolavuspiir, materjalitugevus, *N/mm²*

Arvutusel kasutatud disainitegurid:

- Vesinik: F = 0.5 → tulemuseks seinapaksus 40 *mm*
- Looduslik gaas: F = 0.8 → tulemuseks seinapaksus *25 mm*

Vesiniku ülekande süsteemides kasutatavate materjalide valiku juhised on esitatud ASME B31.12 standardis, mis sisaldavad erinevate terasesortide loetelu, mida võib kasutada vesinikutorude, torukomponentide jaoks. Samuti on seal toodud maksimaalne töörõhk, mida tuleb iga terasesordi puhul arvestada.

Lisaks vesiniku transpordil on lisa riskifaktorid, millega tuleb arvestada materjali valimise puhul[1].

- Vesiniku stressi praegunemine – see tähendab pragunemist pingestatud metallides
- Vesiniku haavatavus ehk metalli hapramaks muutmine ehk plastilisuse ja sitkuse vähenemine.
- Keevituspiirkondades tekkivad mikropraod, mis võivad tekkida vesiniku mõjul metallis keevituse ajal või vahetult pärast seda.

1.6. Toruliini isolatsioon ja maa alla paigutamine

Vesiniku toruliini jaoks ei ole välja töötatud eraldi standardit, millest lähtuda toru isoleerimisel. Torustiku isoleerimisel tuleks lähtuda kõrgsurve toru isolatsioonis standarditest näiteks ISO EN 1594 ja jälgida, et isolatsiooni tüüp sobiks kokku katoodkaitse süsteemiga.

Uuel torustikul kasutatakse tavaliselt kolme kihilist polüetüleen katte süsteemi, täiendavalt geotekstiil kangas. Lisaks on tänapäeval olemas sobivaid külmlint süsteeme, mis sobivad kokku vesinikutoruga.

Maa- alune torustiku kõik ühendused tehakse keevisühendsutega ja toru peaks olema maetud vähemalt 1.1 m sügavusele, tänu sellele oleks torustikul väiksem temperatuuri kõikumine ja mehaaniliselt paremini kaitstud. Muu infrastruktuuri olemasolul tuleb torustiku täiendavalt kaitsta ja vajadusel paigutada toru sügavamale.[1]

Tabel 3. Paigaldussügavuse nõuded[1]

Infrastruktuur	Miinimum sügavus, m
Pinnas	1.1
Tee	2
Veekogud	2.5
Raudtee	4

2. KATOODKAITSE

Katoodkaitse on tõhus aktiivne korrosioonikaitse meetod, mida rakendatakse peamiselt maa alla või vette paigaldatud metallkonstruktsioonide, näiteks torustike kaitsmiseks. Meetodi olemus seisneb selles, et metallist kaitstav konstruktsioon muudetakse elektrokeemilises protsessis katoodiks, vältides selle korrodeerumist. Esmakordselt rakendati katoodkaitset torustike puhul 1928. aastal [7].

Hoolimata tehnoloogia pikaajalisest kasutusest, eksisteerib endiselt arutelusid sobivate kaitsekriteeriumite, nende piirväärtuste ja aluseks olevate mehhanismide üle. Tänapäevased kvaliteetsed mitmekihilised polüetüleenkatted ja täpsed paigaldusprotseduurid on vähendanud defektide arvu, kuid tekitanud väljakutseid katoodkaitse efektiivsuse hindamisel traditsiooniliste meetoditega [7].

Katoodkaitse toimib elektroodide polarisatsiooni kaudu ning selle tõhusus sõltub eelkõige kahest peamisest mehhanismist:

Kontsentratsioonipolarisatsioon - kui torustik on hästi isoleeritud, on pinnas tihendatud ning massiülekanne piiratud, võimaldab see hüdroksiidioonide kogunemist teraspinnale. Selle tulemusel tõuseb pH, mis omakorda soodustab passiivkihi moodustumist terase pinnale. Passiivkiht takistab edasist korrosiooni. Kaitsevoolutihedus sellistes tingimustes on väga väike, tavaliselt umbes 1 mA/m² [8].

Vastupidiselt kontsentratsioonipolarisatsioonile esineb aktiveerimispolarisatsioon juhul, kui torustik on paigaldatud jämedamasse, vett läbilaskvamasse pinnasesse, kus vesi voolab ja eemaldab kiiresti tekkivad hüdroksiidioonid. Samuti piirab passiivkihi teket mikrobioloogiline aktiivsus (nt sulfaatide redutseerijad). Kaitseks on sel juhul vajalik IR-vaba potentsiaali nihutamine väga negatiivsetele väärtustele (kuni -1,2 VCSE), mis nõuab suuremat voolutihedust – suurusjärgus 1 A/m² või rohkem [7].

Katoodkaitse efektiivsust mõjutavad mitmed tegurid[8]:

- Pinnase elektritakistus (ρ) – mõjutab IR-langust ja vajalikku kaitsevoolu.
- Kattekahjustuste suurus ja paiknemine – suuremad defektid vajavad suuremat voolu kaitseks.
- Pinnase keemiline koostis – nt süsivesinike, sulfaatide, kloriidide olemasolu.
- Bioloogiline aktiivsus – sulfaatide redutseerijad võivad takistada pH tõusu ja passiivkihi teket.
- Interferentsivoolud – vahelduv- või alalisvoolude häired võivad muuta potentsiaali ning suurendada korrosiooniriski.

Tänapäevaste kõrgekvaliteediliste isolatsioonikatete ja sügavale paigaldatud torude korral ei ole traditsiooniliste mõõtemeetoditega (nt potentsiaalide vaatlused maapinna tasandil) alati võimalik hinnata kaitse tõhusust. Seetõttu on välja töötamisel uued hindamiskriteeriumid, mis arvestavad[7]:

- Kaitsemehhanismi (kontsentratsioon vs aktiveerimine),
- Pinnase ja vooderdusmaterjali mõju,
- Voolutiheduste ja pinnapotentsiaalide dünaamikat,
- pH muutust toru pinnal kui passivatsiooni indikaatorit.

Katoodkaitse hindamisel on üha olulisemaks muutunud voolutiheduse ja pinnasisese pH vaheline seos – madalate vooludega on võimalik saavutada kõrge pH ja seeläbi piisav kaitse passivatsiooni kaudu [7].

2.1. Katoodkaitse süsteemi hindamise meetodid

Katoodkaitse süsteemide tõhususe hindamiseks kasutatakse mitmeid elektro-keemilisi mõõtmismeetodeid. Kaasaegsed standardid (nt EN ISO 15589-1, EN 13509) nõuavad täpseid mõõtmisi, et hinnata torustiku potentsiaali, voolutihedust ja IR-vaba olekut. Käesolevas peatükis käsitletakse nelja peamist välitöödel kasutatavat mõõtmisviisi.

2.1.1. Vahelduvvoolu pingegradiendi mõõtmine

Vahelduvvoolu pingegradiendi mõõtmine (*ACVG Alternating Current Voltage Gradient)*

meetodit kasutatakse peamiselt võimalike isolatsioonikatte kahjustuste tuvastamiseks. Meetod põhineb madal sagedus (4–5 Hz) sisestamisel torujuhtme süsteemi ning resultantse maaspingegradiendi mõõtmisel.[7]

Peamised omadused[7]:

- Mõõdetakse vahelduvpinget, mis tekib isolatsiooni kattekahjustuste kohal.
- Sobib hästi kasutamiseks koos toru markerite ja GPS-tehnoloogiaga.
- ACVG abil on võimalik lokaliseerida defekte ja hinnata nende suurust, kuid see ei näita otseselt katoodkaitse efektiivsust.
- Võimalik kasutada piirkondades, kus esineb uitvoolusi.

2.1.2. Lähiintervall potensiaalimõõtmine

Lähiintervall potensiaalimõõtmine *(Close Interval Potential Survey – CIPS*) on oluline mõõtmine katoodkaitse süsteemis, mille abil saab hinnata katoodkaitsesüsteemi tõhusust. Pealispinnalt teostatav uuring võimaldab tuvastada korrosiooniohtlikke piirkondi, kattekihtide kahjustusi ja katoodkaitse ebapiisavat toimimist kogu torustiku ulatuses.[7]

Traditsioonilised mõõtepunktid asuvad sageli 1–2 km vahega, mis ei pruugi anda täpset ülevaadet torustiku kogu pikkuse ulatuses. *CIPS*-i käigus mõõdetakse toru ja pinnase vahelist potentsiaali tihedalt, tavaliselt iga 1–2 meetri järel, et saada detailne pilt kaitsetasemest kogu torustiku ulatuses.

Mõõtmised tehakse nii katoodkaitse voolu sisselülitatud ("ON") kui ka katkestatud ("OFF") olekus. Selleks katkestatakse CP vooluallikad sünkroonselt ja mõõtmised tehakse kohe pärast voolu katkestamist, enne kui toru depolariseerub.[7]

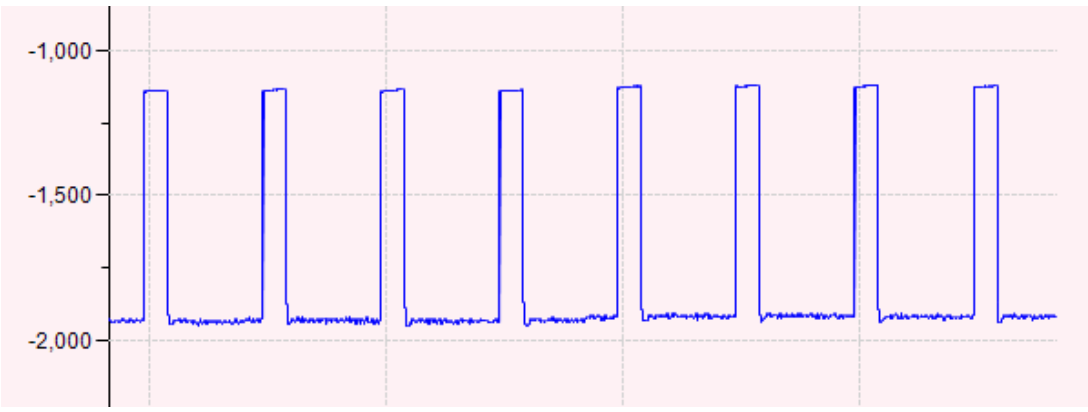
CIPS-i läbiviimiseks ühendatakse torustikuga mõõtekaabel, mis võimaldab mõõta toru ja pinnase vahelist potentsiaali. Mõõtmised tehakse maapinnal paikneva võrdluselektroodi abil, mis on ühendatud andmelogeriga. Mõõtmised salvestatakse regulaarselt, sageli iga 1–2 meetri järel, ning GPS-süsteem tagab täpse asukoha määramise.[7]

Mõõtmiste täpsuse tagamiseks kasutatakse GPS-sünkroniseeritud katkestusseadmeid, mis katkestavad katoodmuunduri vooluallikad sünkroonselt, võimaldades täpsete "ON" ja "OFF" potentsiaalide salvestamist. See on eriti oluline, kuna kõrvalised voolud või teised katoodkaitse süsteemid võivad põhjustada potentsiaalide ebastabiilsust.[7]

2.1.3. ON- OFF mõõtmine

ON-OFF potentsiaalide mõõtmised on standardne meetod katoodkaitse süsteemide tõhususe hindamiseks. Need mõõtmised aitavad eristada tegelikku kaitsepotentsiaali - polariseeritud potentsiaal ja vältida mõõtmisvigu, mis võivad tekkida voolu olemasolu tõttu. ON – OFF mõõtmised teostatakse torustikul olevates mõõtepunktides, kasutades selleks andmelogerit

ja võrdluselektroodi. ON – OFF mõõtmised teostatakse tavaliselt 12/3 suhtega ehk 12 sekundit ON potentsiaal ja 3 sekundit OFF potentsiaal.



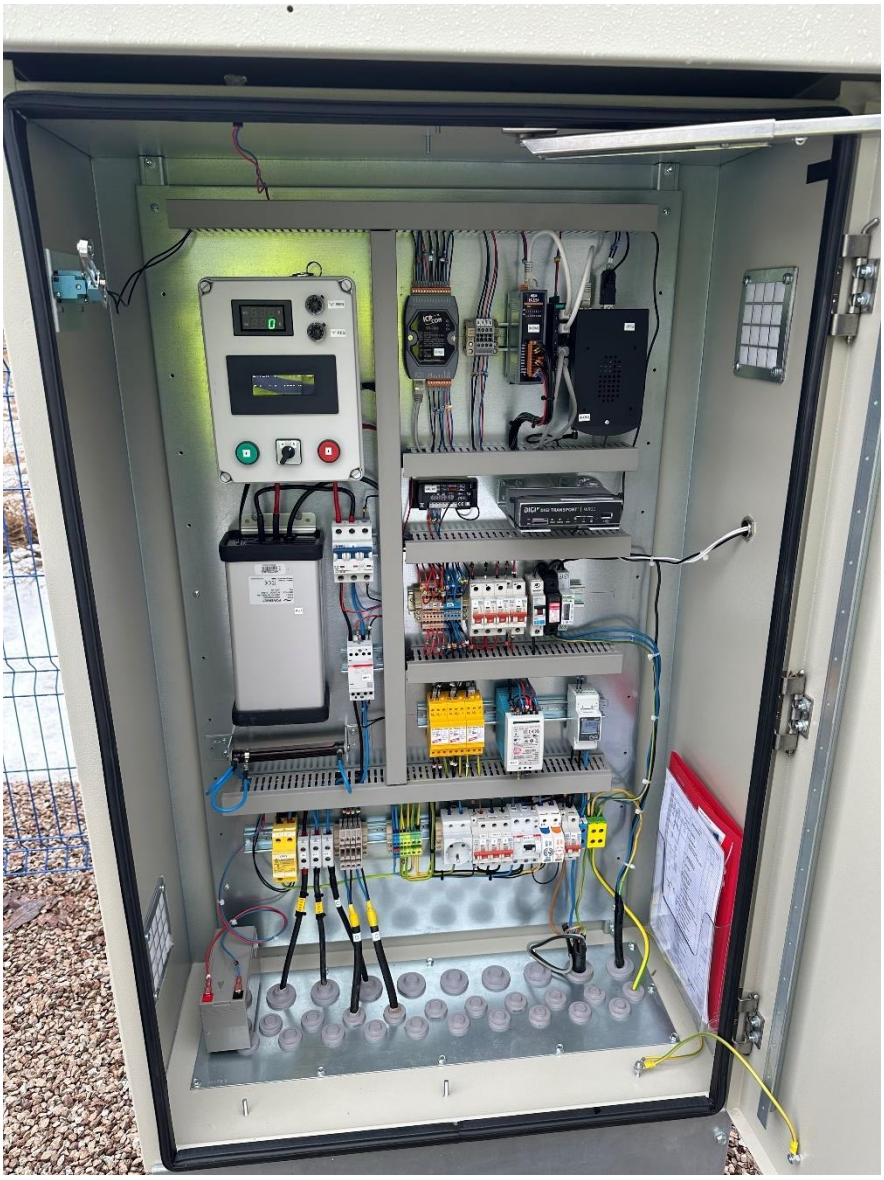
Joonis 3. Näidis ON – OFF graafik Winlog tarkvaras.

2.2. Katoodkaitsejaama põhikomponendid

Katoodkaitsejaam koosneb kolmest osast. Esimene osa on katoodmuundur, kus kontrollitakse katoodjaama tööd ja muundatakse vahelduvvool alalisvooluks, mida kasutatakse torustiku polariseerimiseks. Katood muunduris on kaughaldamissüsteem, kus on võimalik jälgida muunduri tööd. Muundurist üks ühendus luuakse torustikuga ja teine ots ühendatakse anoodväljakuga.

Anoodväljak Eestis koosneb peamiselt titaan anoodidest segametallioksiid kattega, mida paigutakse 20 tükki kas horisontaalselt või vertikaalselt. Paigutus sõltub maapinna tüübist ja pinnase eritakistusest. Anoodväljaku elueaks loetakse 30 aastat. Anoodid paigutakse tavaliselt 100 – 200 m eemale torust paralleelselt toruga. Anoodväljaku osa on ka mõõtepunkt, kus on võimalik kontrollida anoodide seisukorda.

Kolmas osa on torustiku kohal olev mõõtepunkt koos statsionaarse võrdluselektroodiga, milleks on $CuSO_4$ elektrood, mis paigutakse umbes 10 cm kauguse torust. Mõõtepunkti tuuakse klemmlauale ühendus katoodmuundurist, mõõtekontaktid torustikult ja punkt võrdluselektroodilt, et oleks võimalik teostada kontrollmõõtmisi.



Joonis 4. Katoodmuunduri kilbi sisevaade.

Joonis 5. Horisontaalselt paigaldatud anoodid.

2.3. Mõõtepunktid

Katoodkaitse süsteemis on väga tähtis osa mõõtepunktidel, tänu millele on võimalik teostada kontrolli, kas katoodkaitsesüsteem toimib või mitte. Peamiselt kasutatakse 5 erinevat tüüpi mõõtepunkti.

Mõõtepunkt tüüp 1 (MP1) on tavaline mõõtepunkt, mis paikneb toru peal ja on võimalik teostada potentsiaali mõõtmine koos kaasaskantava võrdluselektroodiga – skeem LISA 1

Mõõtepunkt tüüp 3 (MP3) on kasutusel kohtades, kus torustik paikneb metall hülsis. Antud mõõtepunkti eesmärk on kontrollida, et toru ja hülss ei oleks omavahel kontaktis. Kui Hülsi pikkus on üle 15 m, siis peab olema mõõtepunkt mõlemal pool hülssi – skeem LISA 2

Mõõtepunkt tüüp 4 (MP4) on katoodmuunduri juures paiknev mõõtepunkt, kuhu on kokku toodud katoodkaabel, mõõtekontaktid ja statsionaarse võrdluselektroodi kontaktid – skeem LISA 3

Mõõtepunkt tüüp 7 (MP7) on isoleerliidese juures olev mõõtepunkt, et saaks kontrollida isoleerliitmiku seisukorda – skeem LISA 4

Mõõtepunkt tüüp 8 (MP8) on kasutusel kohtades, kus on torustiku ristumine teise torustikuga, mis on katoodkaitsega – skeem LISA 5 ja joonis 6.

Joonis 6. Mõõtepunkt tüüp 8 vaade.

2.4. Uitvoolud

Uitvoolud (*stray currents*) kujutavad endast märkimisväärset korrosiooniohtu maa-alustele või veealustele metallkonstruktsioonidele, eriti torustikes, mis on varustatud katoodkaitsesüsteemidega. Uitvool tekib olukorras, kus elektrivool ei liigu kavandatud vooluringis, vaid hajub läbi pinnase või kõrvaliste metallkonstruktsioonide, otsides väikseima takistusega tagasiteed vooluallikasse. Kui sellised voolud sisenevad metalltorustikku ja väljuvad sellest mujal, võivad nad põhjustada tugevat lokaalse iseloomuga metalli lagunemist, eriti voolu väljumiskohtades, kus toimub anoodne lahustumine.[8]

Üheks peamiseks uitvoolude allikaks on elektrirongide ja trammide negatiivne maandustsükkel, kus vool ei liigu täielikult tagasi kontaktliini kaudu, vaid osaliselt maapinna ja maa-aluse torustiku kaudu. Teiseks ohuteguriks on katoodkaitsesüsteemide omavaheline häiring – olukord, kus kaks või enam katoodkaitsesüsteemi mõjutavad teineteise potentsiaalivälja, muutes ühe süsteemi kaitstud konstruktsiooni teise süsteemi vooluteeks. Lisaks võivad tööstuslikud maandusvõrgud ja keevisprotsessid põhjustada vahelduvat uitvoolu levikut läbi pinnase.[8]

Korrosioonikahjustused ilmnevad eelkõige seal, kus uitvool väljub metallpinnalt elektrolüüti näiteks pinnasesse. Väljumispunktides toimub anoodne reaktsioon, mille käigus raudioonid lahkuvad metallpinnalt, põhjustades seeläbi materjali kadu. See protsess võib põhjustada lokaalset punktkorrosiooni, mis progresseerub kiiresti, eriti kõrge voolutiheduse korral. [16]

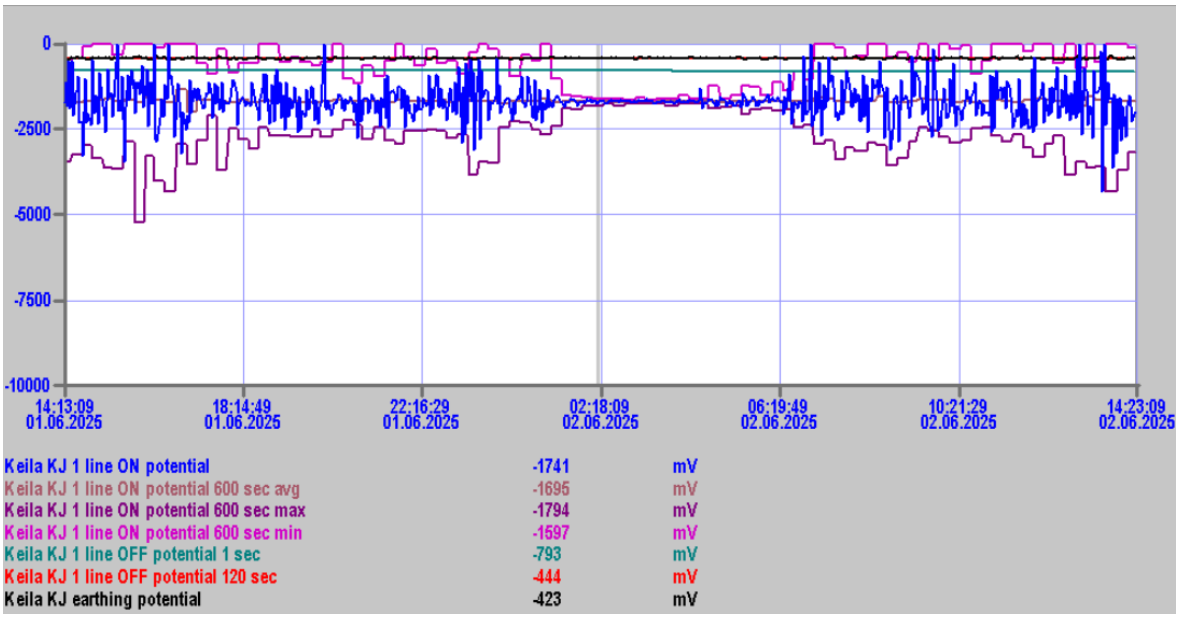
Tõhusaks kaitseks uitvoolude vastu kasutatakse järgmisi meetmeid[8]:

1. Polariseeritud äravoolusüsteemid, mis suunavad uitvoolu ohutult maandusse, blokeerides samas vastassuunalise voolu.

2. Galvaanilised või elektroonilised dekupongseadmed, mis takistavad voolu liikumist tundlikesse süsteemidesse, kuid säilitavad vajaliku katoodkaitse potentsiaali.

3. Isoleerühendused ja voolusuunalised dioodid, mis võimaldavad voolu liikumist vaid ühes suunas ning välistavad mittevajaliku ringvoolu.

4. Reaalajas jälgimissüsteemid, mis tuvastavad uitvoolude olemasolu pingelanguse, voolutiheduse või potentsiaalide muutuste kaudu.



Joonis 7. Uitvoolude mõju katoodkaitse süsteemile iFix SCADA keskkonnas.

3. VAHELDUVVOOLU MÕJU TORUSTIKULE

Tänapäevase infrastruktuuri kasvav tihedus ning piiratud maaressursside kättesaadavus on toonud esile järjest süveneva probleemi, kus puudub piisav vaba maa uute taristuobjektide rajamiseks või esineb olukordi, kus kõrgepingelised elektriliinid ja maa-alused metalltorustikud paiknevad samas kaitsevööndis või nende vahekaugus on minimaalne. Lisaks on üha sagedamini eesmärgiks kasutada olemasolevat maad võimalikult tõhusalt, kuivõrd kaitsevöönditesse jääv maa ei saa tihti majanduslikult rakendust ning kujutab endast kasutamata potentsiaali.

Sellest tulenevalt suureneb vajadus välja töötada tehnilisi lahendusi ja ohutusmeetmeid, mis võimaldaksid erinevatel taristuobjektidel paikneda üksteisele lähemal, ilma et see seaks ohtu nende toimivust või kasutusturvalisust. Eesmärgiks on luua eeltingimused ühiste kaitsevööndite kavandamiseks ja rakendamiseks, et toetada taristu kompaktset planeerimist ning maaressursside säästlikku kasutust tulevikus.

Terastorustike paiknemisel kõrgepingeliste elektriliinidega samas koridoris, kas paralleelselt või ristisuunas, võib torustik sattuda vahelduvvoolu elektromagnetilise mõju alla. Sellises konfiguratsioonis tekib oht, et kõrgepingeliinidest indutseeritud elektromagnetväljad – eriti madalsageduslik induktsioon – põhjustavad torustikus potentsiaalierinevusi, mis võivad viia lokaalse korrosiooni tekkeni. Indutseeritud pinged ja voolud võivad eriti tugevalt mõjuda kattevigastuste piirkondades, kus torumaterjal on otseses kontaktis pinnasega.

Et vältida vahelduvvoolu häiringute põhjustatud korrosiooni terastorustikel, on välja töötatud rahvusvahelised standardid ning läbiviidud põhjalikke teadusuuringuid. Näiteks standard ISO EN 18086 ning NACE SP21424 määratlevad tehnilised kriteeriumid ja metoodikad, mille abil on võimalik hinnata, ennetada ja leevendada vahelduvvoolu põhjustatud korrosiooniriski. Nimetatud juhendites käsitletakse muuhulgas vahelduvvoolu pinge piirtasemeid, voolutiheduse künniseid, pinnase takistuse mõju ning nõudeid maandus- ja seiresüsteemide projekteerimiseks.

Tuginedes teaduslikele uuringutele ja normatiivdokumentidele, on võimalik rakendada sobivaid tehnilisi meetmeid – näiteks maandusvõrgud, takistuslikud ühendused,

katoodkaitse optimeerimine ja reaalajas seire – tagamaks, et torustiku terviklikkus ei saaks kahjustatud kõrgepingeliinide vahetus läheduses paiknemisel. Süsteemne riskianalüüs ning standarditele vastav projekteerimine ja hoolduspraktikate järgimine võimaldavad oluliselt vähendada korrosioonist tulenevaid ohte torustiku elueale ja ohutusele.

3.1. Vahelduvvoolu kõrgepingeliinide häiringu tüübid

Elektrilised häiringud, mis tulenevad mahtuvuslikust, elektromagnetilisest induktiivsest ja juhtivast sidumisest, võivad mõjutada torustikke, mis paiknevad kõrgepingeliste vahelduvvoolu elektriliinide vahetus läheduses. Vahelduvvoolu häiringud on viimastel aastakümnetel muutunud erinevates tööstusharudes järjest olulisemaks, kuna torustike isolatsioonikatte kvaliteet on paranenud ja teeninduskoridoride (ROW) tihedus suurenenud, mis omakorda on suurendanud tuvastatud AC-korrosiooni juhtumeid. [12]

Viimased arengud kõrgepingelise elektri ülekandesektoris on viinud võimsuse ja töövoolude suurenemiseni, et kompenseerida pika vahemaa ülekandekadusid. Töövoolu suurenemisel on otsene mõju elektromagnetilise häiringu (EMI) tasemele ning seeläbi ka AC-häiringute tugevusele torustikes. See trend, kus töövoolud järjest suurenevad, kujutab endast olulist väljakutset tõhusa kaitse saavutamiseks torustikel, mis ristuvad või paiknevad kõrgepingeliste liinidega samas koridoris.[11]

Vahelduvvool (AC) võib torustikega häiritult “sidestuda” kolme peamise füüsikalise nähtuse kaudu[11]:

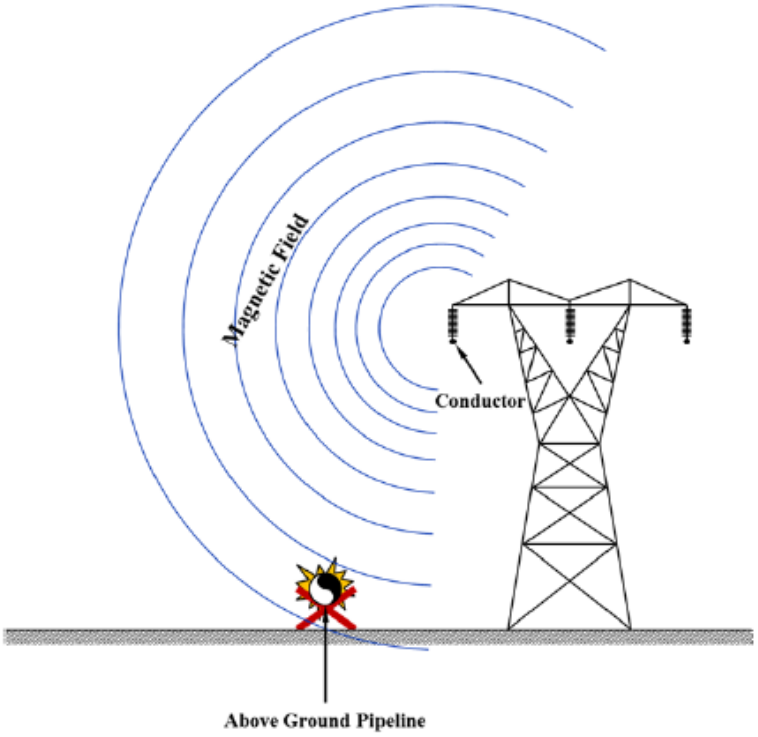
1. Mahtuvuslik sidumine (capacitive coupling)
2. Takistuslik ehk juhtiv sidumine (resistive or conductive coupling)
3. Induktiivne sidumine (inductive coupling)

Neid nähtusi käsitletakse täpsemalt järgnevates alajaotistes.

3.1.1. Mahtuvuslik sidumine

Mahtuvuslik sidumine ehk elektrostaatiline häiring tekib elektromagnetvälja mõjul, mida tekitab vahelduvvool, voolates kõrgepingelise elektriliini juhtmetes. See väli võib indutseerida elektrilaengu maapinnast eraldatud terastorustikule, mis on ehitatud maapinnale ja isoleeritud elektriliselt. Mahtuvuslikud efektid kujutavad endast eelkõige probleemi torustike ehituse ajal, kui torustiku osi paigaldatakse isolatsioonitugedele maapinnast kõrgemale, nagu näidatud joonisel 1. Torustik võib koguda laengut kondensaatorina, kus ümbritsev õhk toimib dielektrikuna – see võimaldab säilitada elektrivälja väikse võimsuskadudega, mille tulemuseks on potentsiaalide erinevus torustiku ja ümbritseva maa vahel.[12]

Potentsiaali suurus sõltub peamiselt torustiku kaugusest kõrgepingeliinidest, elektriliini voolutugevusest ning faaside paigutusest. Kui mahtuvuslik sidumine on märkimisväärne, võib elektrostaatiline häiring tekitada elektrilöögi või sädemekaare riski. Kuigi kõrgendatud mahtuvuslik pinge võib esineda, on vastav voolutugevus üldjuhul väike, mis tähendab, et elektrilöögi mõju on üldiselt madal.[12]



Joonis 8. Mahtuvuslik sidumine. [12]

3.1.2. Induktiivne sidumine

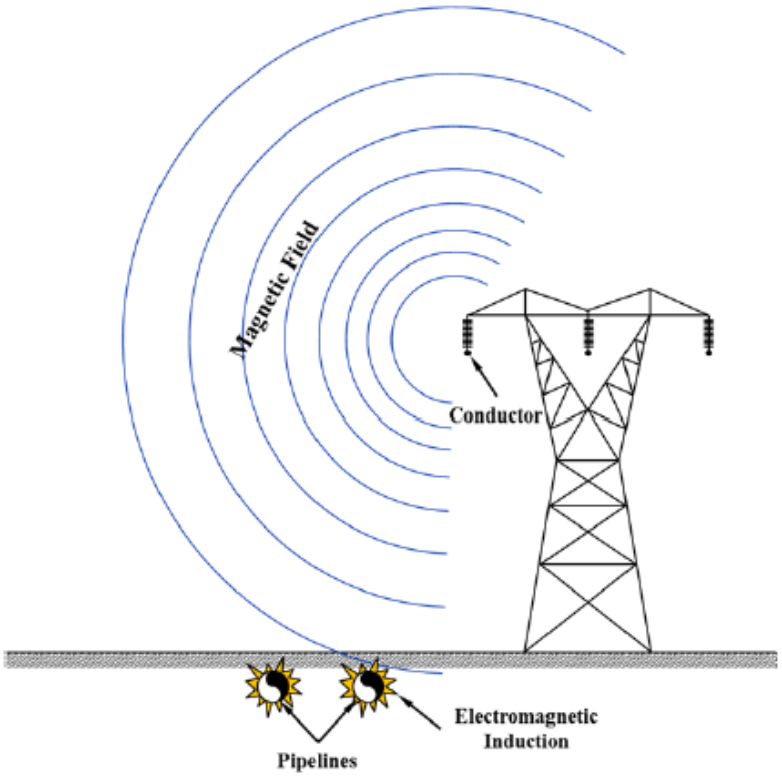
Elektromagnetiline induktsioon on üks peamisi häiringuallikaid, mis tekib siis, kui vahelduvvool liigub läbi kõrgepingeliini juhtmete. Selle tulemusel tekib juhtme ümber elektromagnetväli, mis võib sidestuda läheduses paiknevate terastorustikega ja põhjustada neis vahelduvvoolu pinge ning sellega seotud voolu. Selline indutseeritud potentsiaal kujutab endast ohtu nii torustiku töötajatele (elektrilöökide või sädemeohtude näol) kui ka võib viia vahelduvvoolu korrosioonini.[13]

kõrgepingeliini induktiivne mõju torustikule sõltub[12]:

- Geomeetriast ja kaugustest (nt toru ja liini vahekaugus, sügavus, läbimõõt, nurgad);
- Pinnase takistusest;
- Toru isoleerkatte seisukorrast ja vastupanust;
- Kõrgepingeliini töörežiimist (faasikoormus, pinge, voolutasemed, rikkevoolu võimekus).

Paljud geomeetrilised parameetrid püsivad stabiilsena kogu torustiku eluea vältel, kuid pinnase ja isolatsioonkatte omadused võivad aja jooksul muutuda. Kõige enam mõjutavad vahelduvvoolu häiringuid aga liini tööparameetrid, mis varieeruvad vastavalt koormustele, faasinihketele ja töörežiimide muutustele.
Tüüpilised ohukohad ja pingetipud[11]:

- Indutseeritud pinged on kõige suuremad torustiku ja liini ühisosa otstes.
- Pinge tase väheneb eksponentsiaalselt, liikudes kaugemale sidestuskohast.
- Pinge tipud võivad esineda geomeetriliste või elektriliste katkestuste juures:
    - kus torustik kaldub liinist kõrvale;
    - kus muutub pinnase takistus või kaugus liinist;
    - kus on paigaldatud isolatsiooniliitmikud;
    - kus liini elektromagnetväli muutub, nt faasivahetuste korral.



Joonis 9. Induktiivne sidumine[12]

3.1.3. Takistuslik või juhtiv sidumine

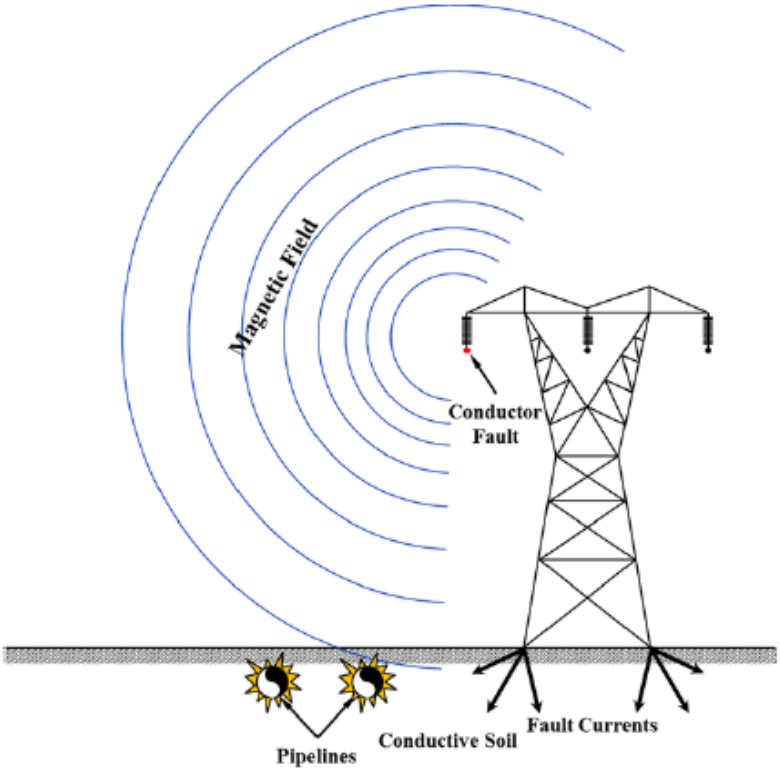
Kui vool liigub läbi pinnase torustikuni, võib see põhjustada takistuslikku (resistiivset) või juhtivat sidumist. See esineb eelkõige olukorras, kus kõrgepingeliini maandatud torn jagab elektrilist teekonda torustikuga, mis on pinnasesse maetud. Kui torustik on elektriliselt madalama takistusega kui muu pinnas, võib rikkevool selle kaudu levida.[11]

Takistuslik häiring muutub oluliseks eriti siis, kui lühisvoolu rike esineb piirkonnas, kus torustik asub kõrgepingeliini läheduses ja rikkevoolud on pinnases suured. Kui kõrgepinge liini süsteemil esineb faasitasakaalu häireid (nt maandatud neutraalpunktiga), võivad voolud liikuda tagasi maapinna kaudu ning kanduda torustikule.[12]

Rikkeolukorras muutub peamiseks probleemiks takistuslik häiring, mis levib läbi pinnase. Kuid lisaks suureneb ka induktiivne häiring, kuna rikke ajal on faasivoolud (ja nendega seotud elektromagnetväljad) oluliselt kõrgemad. See põhjustab võimendatud elektromagnetilist sidestust torustikuga.[11]

Kui need elektrilised mõjud on piisavalt tugevad, võib torustiku nähtava osa näiteks kraani, katoodkaitse mõõtepunkti puudutamisel tekkida oht elektrilöögiks. Normaalse töö korral võib AC voolutihedus kahjustatud torukattes (näiteks defektse isolatsiooni kohas) põhjustada kiirendatud välist korrosiooni.[11]

Lisaks võib rikete ajal torustiku ja seda ümbritseva pinnase vaheline pinge tõusta ohtlikule tasemele, mis omakorda võib tekitada füüsilisi kahjustusi nii torule kui selle kattele.[14]



Joonis 10. Takistuslik sidumine.[12]

3.2. Vahelduvvoolu korrosioon

Vahelduvvoolu korrosioon on elektrokeemiline nähtus, mis esineb metalltorustikes, kui need puutuvad kokku vahelduvvoolu elektriväljade või -vooludega, enamasti kõrgepinge elektriliinide läheduses.

Kuigi vahelduvvoolu põhjustatud korrosiooni tunti juba 20. sajandi alguses, hakati selle tõsist mõju terastorustike töökindlusele ja ohutusele teadvustama alles 1990. aastatel. Sel perioodil dokumenteeriti mitmeid juhtumeid, kus maa-alused terastorustikud lekkisid vaatamata nõuetekohasele katoodkaitsele, mis traditsiooniliselt tagab kaitse alalisvoolust põhjustatud korrosiooni vastu.[7]

Standardi EN ISO 18086 põhjal valitseb laialdane arusaam, et vahelduvvoolust põhjustatud häiring tuleneb suurenenud AC- ja DC- voolutihedustest. See on eriti kriitiline kontsentratsioonilise polarisatsiooni puhul, kuna suurenenud hüdroksiidioonide kontsentratsioon teraspinnal ja nende levik ümbritsevasse pinnasesse põhjustab märgatava levitakistuse vähenemise isolatsiooni kattevigastuste piirkonnas.[12]

Teatud häiringu tingimustes tekib pH taseme tõus ja levitakistuse langus tõstab voolutihendust ning suurendab seeläbi korrosiooniriski. EN ISO 18086 standardis kirjeldatud põhimõtete kohaselt on korrosiooni mõjutavad protsessid seotud passiivkihi vahelduva moodustumise ja lahustumisega.[12]

Passiivsus ja kaitsevõime pH väärtuse ~13 juures on seotud AC-korrosiooni mehhanismiga. Seni ei ole teada ühtegi AC-korrosiooni juhtumit, mis oleks toimunud aktiivse polarisatsiooni tingimustes. Teoreetiliste käsitluste põhjal võib aga eeldada, et lühiajaline katoodkaitse voolutiheduse langus, eriti koos AC-häiringu tõttu tekkivate anoodsete vooludega, põhjustab märkimisväärseid korrosioonikahjustusi.[14]

Aktiivse polarisatsiooni eelis seisneb selles, et pH ei tõuse ja levitakistus ei vähene – need tegurid vähendavad vahelduvvoolutihedust ja seega ka korrosiooniohtu. See on kinnitust leidnud näiteks Simploni tunnelis asuvate rööbaste puhul, kus katoodkaitse puudus ja pH ei tõusnud, kuid rongiliikluse tagasivool põhjustas siiski korrosioonikahjustusi.[13]

Vahelduvvoolu korrosioonimäär on tugevalt seotud pH taseme ja levitakistusega ning seda mõjutab ka metallipinna potentsiaal (ON-potentsiaal). Negatiivsemad potentsiaalid tõstavad pH-d ja alandavad levitakistust, mis omakorda suurendab AC-korrosiooni määra. See muudab vahelduvvoolukorrosiooni tundlikuks veel uurimata massiülekande protsesside suhtes, eriti nii anoodse kui ka katoodse häiringu puhul.[11]

Vahelduvvoolu häiring võib põhjustada terastorustikel lokaalseid ja intensiivseid punktkorrosiooni kahjustusi, eriti piirkondades, kus torustiku isolatsiooni terviklikkus on rikutud. Nendes piirkondades on metall otseses kontaktis pinnasega, võimaldades AC-voolul indutseerida kõrgeid voolutihedusi, mis soodustavad passiivkihi lagunemist ja korrosiooni fookuste teket.[12]

Uuringud on näidanud, et vahelduvvoolu korrosioon võib tekkida isegi siis, kui katoodkaitse süsteemid töötavad vastavalt standarditele. Näiteks on täheldatud, et vahelduvvoolu tihedused üle 30 A/m² võivad põhjustada märkimisväärset punktkorrosiooni, hoolimata sellest, et katoodkaitsesüsteemid hoiavad torustiku potentsiaali soovitatud vahemikus.[8]

Lisaks on leitud, et AC-korrosiooni risk on eriti kõrge väikeste kattevigastuste korral, mille pindala on 1–3 cm². Sellistes väikestes defektides võib vahelduvvool kontsentreeruda, põhjustades kõrgeid voolutihedusi ja seeläbi kiirendatud korrosiooni. [13]

Vahelduvvoolu korrosiooni tuvastamine on keeruline, kuna traditsioonilised katoodkaitse seiresüsteemid keskenduvad peamiselt alalisvoolu parameetritele ega pruugi kajastada vahelduvvoolust tingitud häiringuid. Seetõttu võib vahelduvvoolu korrosioon areneda märkamatult, kuni ilmnevad füüsilised kahjustused või töökindluse rikked. [12]

Efektiivne ennetus nõuab lisaks katoodkaitsele ka vahelduvvoolu komponentide reaalajas jälgimist ning maandusvõrkude ja maandustakistuse optimeerimist. Samuti on oluline regulaarselt kontrollida torustiku kaitsekatte terviklikkust ja parandada avastatud defektid, et vähendada vahelduvvoolukorrosiooni riski.

Vahelduvvoolu korrosiooniga seotud riskide maandamiseks peaks jälgima järgnevaid kriteeriume[10]:

- Mõõtma vahelduvvoolu suurust torustikul
- Mõõtma pinnase eritakistust

- Hindama torustiku isolatsiooni seisukorda
- Teostama torustikul sisediagnostikat ja analüüsima sisediagnostika andmeid
- Analüüsima mõõtmistulemusi

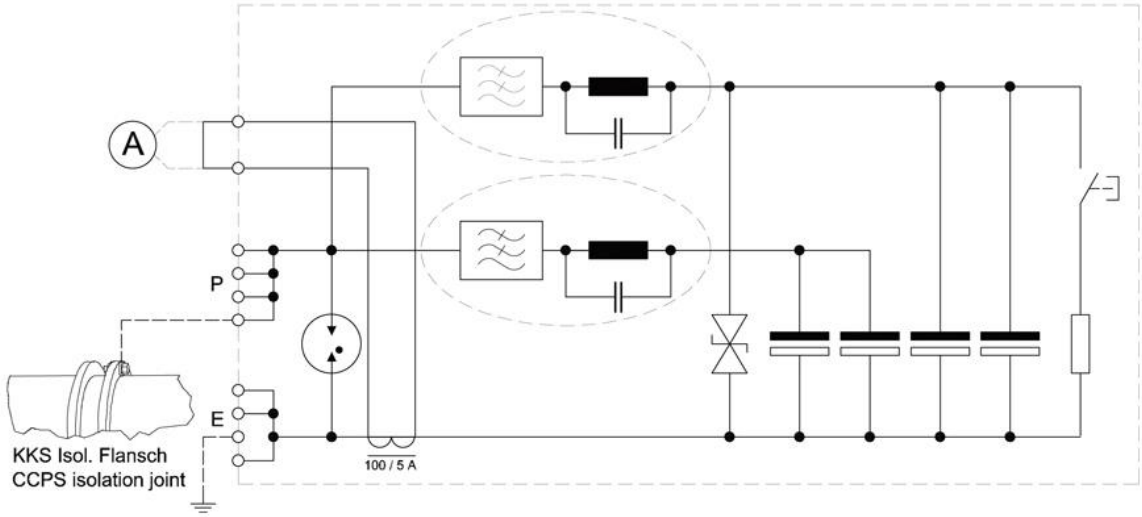
Kui torujuhe paikneb paralleelselt kõrgepinge elektrikaablitega, mille tööpinged on 132 kV või suuremad, võib tekkida vahelduvvoolu häirete risk maa-aluste torujuhtmete ja õhuliinide vahelise kauguse tõttu. Tuleks hinnata nende kaugust. Tuleb arvestada, et vahelduvvoolu korrosioon võib tekkida isegi väga madala pingega väga madala pinnase takistusega piirkondades.[13]

Rutiinsed katoodkaitse monitooringud peaksid sisaldama vahelduvvoolu pingemõõtmisi – näiteks kui vahelduvvoolu pinge on üle 2–3 V ja torujuhe asub selgelt õhuliinide lähedal, tuleks teha täiendavaid katseid.

3.3. Vahelduvvoolu filter

Vahelduvvoolu filter on passiivne komponent, mis võimaldab maandada torustiku indutseerinud vahelduvvoolu, samal ajal tagades katoodkaitse töö. Peamiselt kasutatakse vahelduvvoolu filtrit maa- aluste metalltorustike kaitsmiseks vahelduvvoolu korrosiooni eest kohtades, kus kõrgepinge liinid või vahelduvvoolu raudteed asuvad läheduses. [17]

Vahelduvvoolu filter töötab selektiivsel juhtivusel, kus alalisvool, mis katoodkaitsega suunatakse dioodidesse, et torult maandusesse ei jookseks. Vahelduvvool suunatakse läbi madala takistuse maandusesse, kasutades selleks kondensaatoreid, mis toimivad kõrgsagedusfiltrina lubades läbi vahelduvvoolu, aga ei lase läbi alalisvoolu. Lisaks võib filter olla üles ehitatud induktiivpoolile, mis suunab vahelduvvoolu edasi maandusesse. [17]



Joonis 11. Leutron PLPro- 80A- iV vahelduvvoolu filtri skeem [18]

Vahelduvvoolu filtri kasutamisel kasutatakse kahe tüüpi maandust, kas ehitatakse kõrvale eraldi seisev maanduskontuur varraste näol või uue toru ehitamisel saab paigaldada toru kohale paralleelselt tsingitud raud või vask lati.[12]

Joonis 12. Leutron PLPro- 80A- iV vahelduvvoolu filter

3.4. Vahelduvvoolu filtri efektiivsuse kontroll

Antud magistritöö käigus sai kontrollitud Leutron PLPro- 80A- iV vahelduvvoolu filtri toimimist. Selleks sai teostud Balticconnectori gaasitorul Keila – Paldiski LKS torulõigul mõõtmised. Antud lõigu 12.5 km lõik paikneb paralleelset kahe Keila – Paldiski 110 kV kõrgepinge liingiga. Antud lõigul paikneb 2 vahelduvvoolu filtrit, mis on ühendatud omavahel paralleellatiga, mis paikneb toru kohal 30 cm torust ja toimib maandusena. kui vahelduvvoolufilter on ühendatud toruga ja pärast teostatud mõõtmised, kui filter lahti ühendatud. Testlõiguks sai valitud see, kuna antud kohas projekteeritud vastavalt standardile korrektne süsteem ja on kasutusel tsingitud paralleel latt gaasitoru kohal, antud süsteem sobiks ka kasutada vesiniktoru puhul, kui toru paigaldada kõrgepinge liiniga paralleelselt ühes kaitsevööndis.

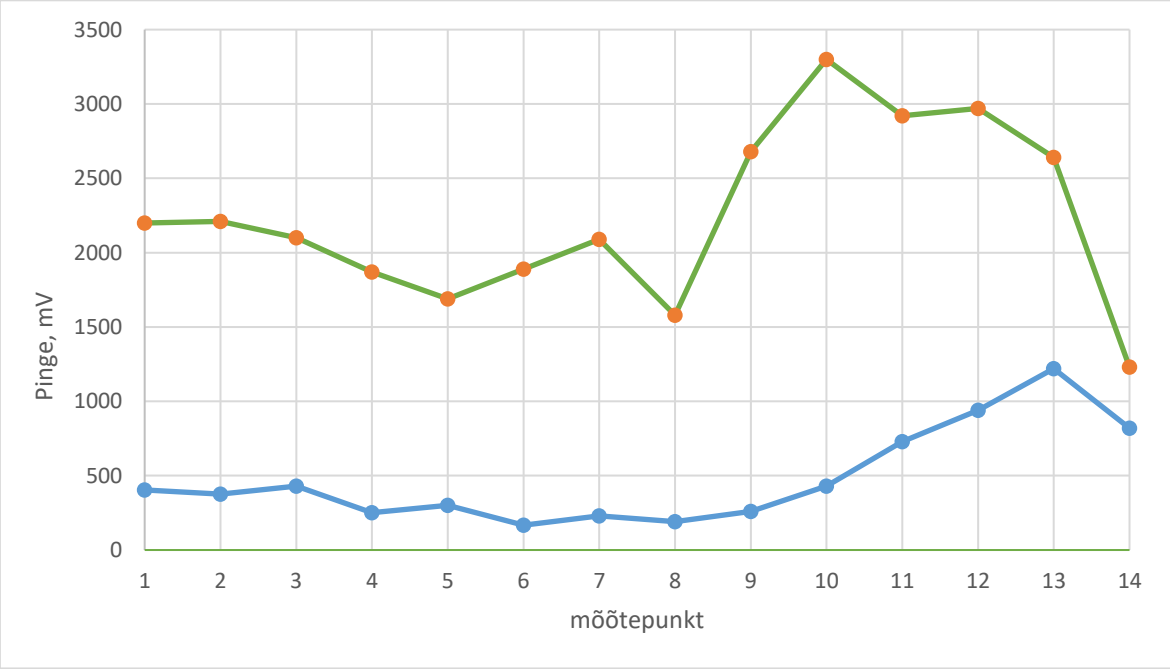
Mõõtmised on teostatud 12 - 13 Märts 2025 . Mõõtmeseadmena on kasutatud andmelogerit Minilog 2 ja andmetöötlus tarkvara Winlog. Iga mõõtepunkti juures on mõõtmis kestvuseks 5 minutit ja mõõtetulemus registreeritakse iga sekundi tagant. Mõõtmised on teostatud kahel päeval, et vahepeal on ööpäev filter lahti ühendatud torustikust. Mõõtmistulemuseks on arvestatud 5 minuti keskmine.

Tabel 4. Mõõtmistulemused

Mõõtepunkt	Pinge koos AC filtriga, mV	Pinge lahti ühendatud filtriga, mV
516093	405	2200
515516	375	2210
514552	430	2100
513779	252	1870
512710	300	1690
512027	167	1890

511332	230	2090
510646	190	1580
509951	260	2680
509303	430	3300
508734	730	2920
507934	940	2970
506979	1220	2640
506041	820	1230

Et antud tulemusi parem võrrelda, on kantud mõlemad tulemused graafikule.



Joonis 13. Mõõtmistulemused graafikul

Arvestades eelnevalt väljatoodud vahelduvvoolu korrosiooni kohta, siis pikaajaliselt olev madal vahelduvvoolu pinge võib ka kahjustada torustikku, seega mõõtmiste tulemusel on näha, et olemasolev vahelduvvoolu filter toimib ja kaitseb toru vahelduvvoolu eest.

3.5. Kupongide kasutamine korrosiooniriski hindamiseks torustikul

Vahelduvvoolu poolt põhjustatud korrosioon on tõsine oht katoodkaitsega varustatud maa-aluste metalltorustike terviklikkusele, eriti kui need asuvad kõrgepinge liinide läheduses. Vahelduvvoolu korrosiooni esinemine sõltub mitmetest teguritest, sealhulgas voolutugevusest, pinnase omadustest ja kaitsekihist. Vahelduvvoolu häiringute hindamiseks ja korrosiooniriski jälgimiseks kasutatakse laialdaselt spetsiaalseid mõõteseadmeid, mida nimetatakse kupongideks.

Kupongid on standardiseeritud metallproovid, mis paigaldatakse torustikuga samasse pinnase- ja keskkonnatingimustesse ning ühendatakse katoodkaitsesüsteemiga. Need võimaldavad mõõta torustikule mõjuvat AC ja DC voolutihedust ning hinnata selle põhjal potentsiaalset korrosioonimäära. Kupongid toimivad ka modelleeritud defektidena, mis jäljendavad kattekihi kahjustusi torul ning võimaldavad määrata lokaalseid korrosioonitasemeid.

Kupongid paigaldatakse tüüpiliselt katoodkaitse mõõtepunktide juurde ning nendele mõjuv vahelduv- ja alalisvool registreeritakse andmesalvesti abil. Et tagada tulemuste usaldusväärsus, viiakse mõõtmised läbi vähemalt 24-tunnise tsükli vältel, soovitatavalt seitsmepäevase perioodi jooksul, et arvesse võtta töönädala ja koormuste tsüklilisi muutusi.

Erinevad pinnasetüübid ja nende eritakistus mõjutavad kupongide kaudu registreeritavat voolutihedusi. Näiteks madalama eritakistusega pinnases võib kriitiline vahelduvvoolu tihedus tekkida madalal pingetasemel, samas kõrge eritakistusega pinnases on risk väiksem.

Kupongid võimaldavad hinnata tegelikku korrosiooni ohtu konkreetses kohas, arvestades vahelduvvoolu voolutugevust ja pinnast. Lisaks saab katoodkaitse toimimist ning hinnata, kas on vaja täiendavaid kaitsesüsteeme.

Samas tuleb arvestada, et kupongid kajastavad üksnes lokaalset keskkonda ning ei pruugi olla representatiivsed kogu torustiku ulatuses. Seetõttu on soovitatav kombineerida kupongide andmed matemaatilise modelleerimise ja muude jälgimissüsteemidega.

3.6. Tark pingepõhine lahutusseade

VCSD töötab pingejuhitava lühistusseadmena, mis aktiveerub, kui torustikul mõõdetav pinge ületab seadistatud piirmäära. Seade suunab kahjuliku vahelduv- või impulsspinge madala takistusega maandusele, piirates pinge tasemele, mis on ohutu nii inimestele kui ka metalltorule[19].

Olulised tehnilised näitajad[20]:

- Transientne tippvoolutaluvus: kuni 100 kA (10/350 µs),
- Ajutine pinge (kuni 200 ms): ≤ 400 V AC (1,1 kA),
- Püsiv pinge: piiratud ≤ 50 V AC (reguleeritav), pidev voolutaluvus 40 A.

VCSD sisaldab mitmeid funktsioone, mis muudavad selle ideaalseks kasutamiseks kaasaegses infrastruktuuris[19]:

- Integreeritud USB-liides ja digitaalne väljund võimaldavad pidevat andmete kogumist (nt pingetase, seadme temperatuur, vool),
- Kaugjuhtimine juhtimiskeskusest, sh seadme testimine ja välja lülitamine mõõtmise ajaks
- Isediagnostika ja enesetestimine, mis võimaldab kiiresti kontrollida seadme töökindlust ilma manuaalseid mõõtmisi tegemata.

Antud seadmega on võimalik analüüsida reaalseid mõõtmisväärtuseid torustikul ja samal ajal jooksvalt kaitseb vahelduvvoolu eest.

Joonis 14. VCDS näidis skeem.[19]

3.7. Kontrolltegevused torustikul

Kui ühte kaitsevööndisse paigaldatakse torustik ja kõrgepingeliin, siis peab arvestama, et torustik oleks kaitstud, selle jaoks peab teostama regulaarselt erinevaid kontrollmõõtmisi. Kontrollmõõtmiste eesmärk hinnata, kas katoodkaitse toimib, ega vahelduvvool ei tee kahjustusi torule. Torustike peaks tegema järgnevaid mõõtmisi ja diagnostikaid:

1. ON mõõtmised – eesmärk hinnata mõõtepunktis katoodkaitse toimimine ja koguda võimalik vahelduvvool
2. ON-OFF mõõtmine – antud mõõtmise eesmärk on tagada katoodkaitse toimimine
3. ACVG mõõtmine – antud eesmärk väliselt määrata torustikul isolatsiooni kahjustused.
4. Intelligentne sisediagnostika – eesmärk seest poolt kaardistada terve toru ja selle põhjal vaadata, kas torustikul on erinevaid kahjustusi.

KOKKUVÕTE

Käesolev magistritöö käsitleb vesiniku kui ühe võimaliku tulevikuenergialahenduse transpordi infrastruktuuri arendamist, keskendudes eeskätt vesinikutorustiku projekteerimise ja kaitsmisega seotud tehnilistele aspektidele. Uurimistöö käigus viidi läbi esmane analüüs vesiniku torustiku trassikoridori kohta, pöörates tähelepanu torustiku paigutamisele ühisesse trassikoridori kõrgepinge liinidega.

Oluliseks uurimisteemaks on katoodkaitse rakendamine vesinikutorustike puhul. Katoodkaitse võimaldab pikendada torustiku eluiga, ennetades korrosioonikahjustusi, mis võivad tekkida aja jooksul ja mille tuvastamine on mõõtmiste keerukuse tõttu sageli ajamahukas. Eraldi käsitletakse torustike kaitset vahelduvvoolu põhjustatud korrosiooni eest, mis võib teatud pinnase ja voolutiheduse tingimustes areneda kiiresti ning põhjustada arvestatavat kahju. Seetõttu on oluline, et nii katoodkaitse kui ka vahelduvvoolu mõju käsitletaks juba projekteerimise algfaasis ja hilisemalt teostakse korrektset hooldust ja mõõtmisi.

Magistritöö raames teostati mõõtmised Balticconnectori maismaa gaasitorul, mille tulemused kinnitasid olemasoleva katoodkaitsesüsteemi ja vahelduvvoolu filtri toimivust. Tulemused näitavad, et kui sarnane süsteem integreerida terviklikult vesinikutorustiku kaitseks, on võimalik planeerida vesinikutransporti ka kõrgepingeliinidega ühises trassikoridoris.

Edasiste uurimissuundadena on välja toodud kolm võimalikku teemat: analüüs, kas eelistada ühte suure läbimõõduga toru või kahte väiksemat toru, teiseks uuringud vesinikutorustiku materjalide kohta, sealhulgas terasesulamite täiustamine plastilisuse parandamiseks. Kolmanda uurimusena võiks ehitada tark pingepõhise eraldusseadme torustikule nt DEHN VCSD 40, millega saaks parema ülevaate, kuidas kõrgepinge liinide koormus mõjutab torustikku ja saaks teostada pikaajalist monitoorimist.

ALLIKALOEND

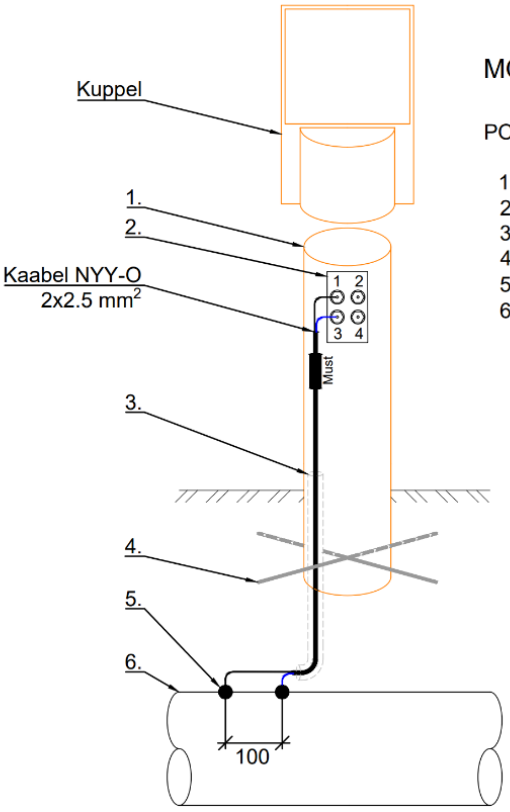
1. Elering 2024. Nordic – Baltic Hydrogen Corridor Engineering Final Raport.
2. The Future of Hydrogen Seizing today's opportunities[veebileht] https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen (01.06.2025)
3. European Commission (2022). Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe. https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-07/hydrogen_strategy_0.pdf (01.06.2025)
4. Hydrogen and Methane technical data [veebileht] https://encyclopedia.airliquide.com/ (31.05.2025)
5. Eestis kasutatava maagaasi üldised omadused [Veebileht] https://gaasiliit.ee/meie-teemad/maagaas/eestis-kasutatava-maagaasi-uldised-omadused/ (30.05.2025)
6. Gaasikoolituse OÜ 2024. Küttegaasipaigaldise kasutamise ja gaasitööde tegemise tehnilised normid
7. European Federation of Corrosion 2021. Cathodic protection criteria for buried carbon steel structures.
8. EVS EN ISO 15589. Petroleum, petrochemical and natural gas industries - Cathodic protection of pipeline systems - Part 1: On-land pipelines
9. EVS EN 18086 Corrosion of metals and alloys – Determination of AC corrosion – Protection criteria
10. Standard ASME B31.12: 2020. Hydrogen piping and pipelines
11. United Kingdom Onshore Pipeline Operators Association. AC corrosion Guidelines
12. The INGAA Foundation 2015. Criteria for Pipelines Co- Existing with electric power lines.
13. **Büchler M.** (2009). The effect of variation of ac-interference over time on the corrosion of cathodically protected pipelines.
14. **Büchler M., Joos D.** (2021). Assessing the effectiveness of cathodic protection in combined AC and DC interference conditions
15. **Gummow R.A., Wakelin R.G., Segall S.M**. (1998). AC Corrosion – A new Challange to pipeline integrity.
16. **Brenna, M., Foiadelli, F., Zambetti, M.** (2012). Stray current and corrosion: Experimental investigation and mitigation techniques. Politecnico di Milano.
17. Open AI(2025). ChatGPT 4o [suur keelemudel] https://chatgpt.com/ (01.06.2025)
18. Leutron (2025). Leutron PLPro-80A-iV [veebileht]

Main Catalogue – LEUTRON Blitz- und Überspannungsschutz (31.05.2025)

19. DEHN (2025). DEHN protection solutions for cathodic corrosion protection systems. VCSD limits external overvoltages (01.06.2025)
20. DEHN (2025). DEHN VCDS 40 datasheet VCSD limits external overvoltages (01.06.2025)

LISAD

Lisa 1. Mõõtepunkt tüüp 1 skeem

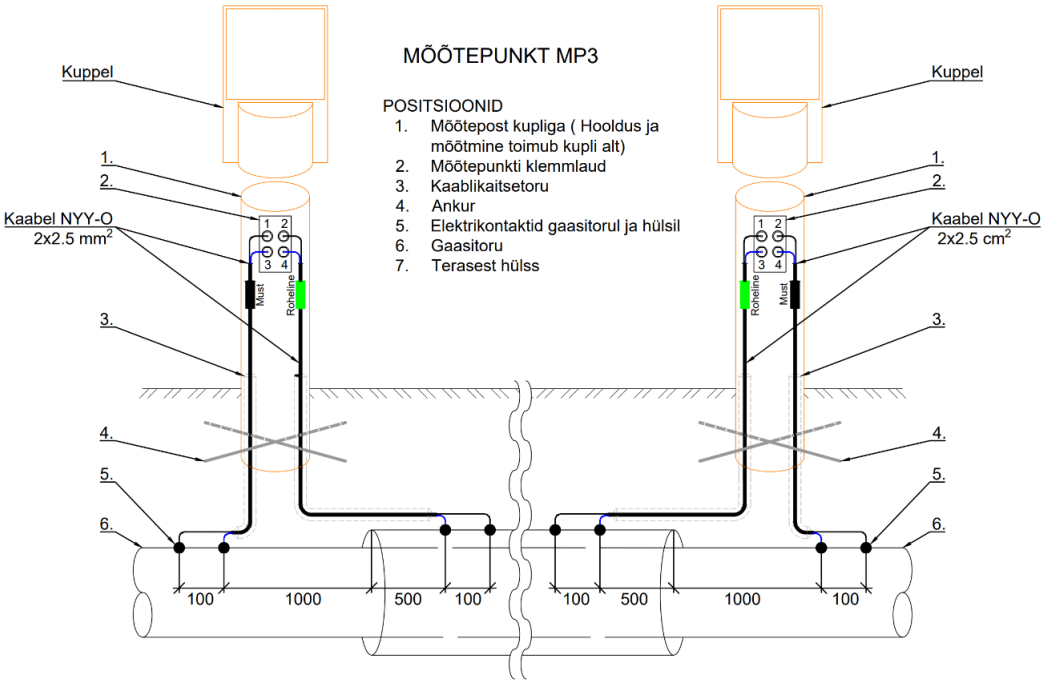


MÕÕTEPUNKT MP1

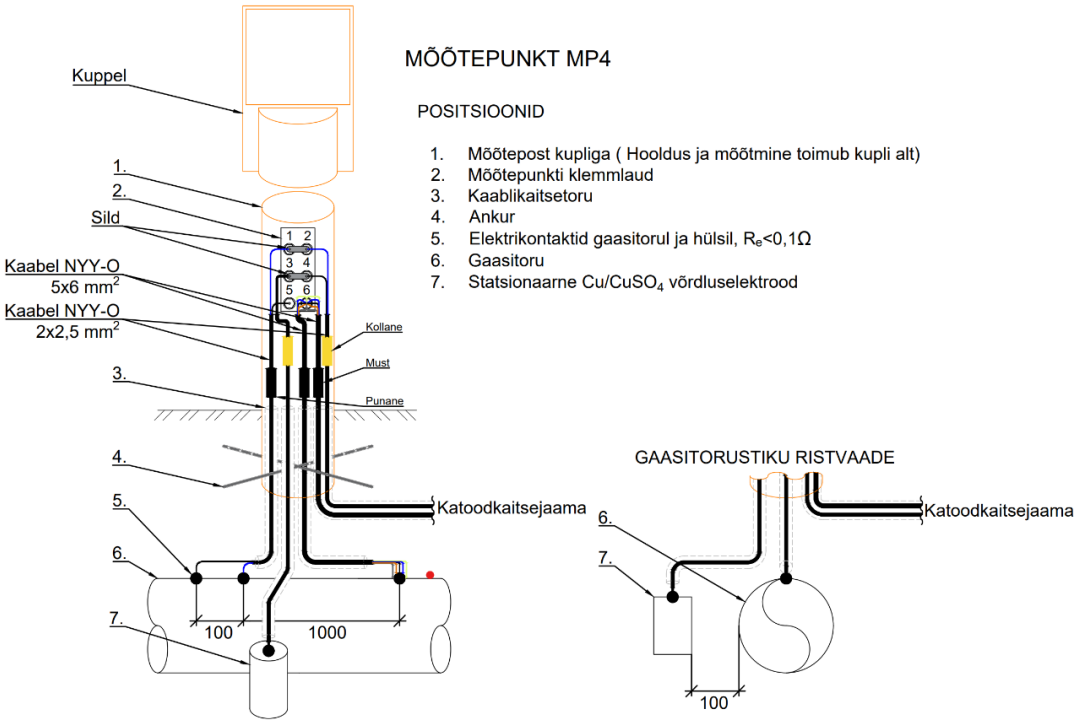
POSITSIOONID

1. Mõõtepost kupliga (Hooldus ja mõõtmine toimub kupli alt)
2. Mõõtepunkti klemmlaud
3. Kaablikaitsetoru
4. Ankur
5. Elektrikontaktid gaasitorul ja hülsil, R_e<0,1Ω
6. Gaasitoru

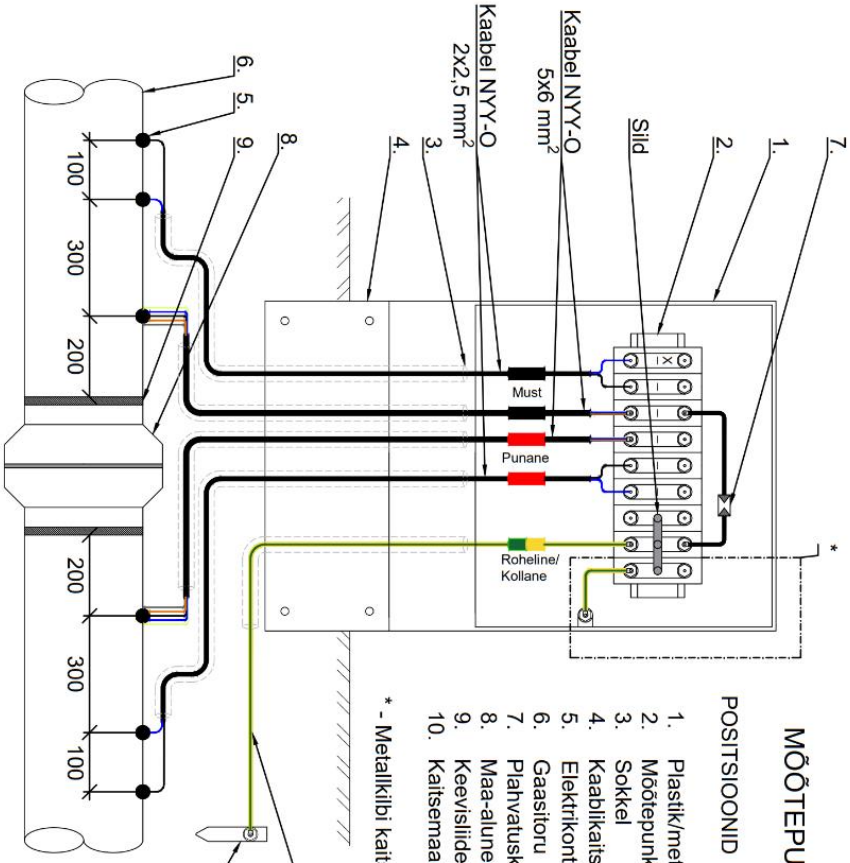
Lisa 2. Mõõtepunkt tüüp 3 skeem



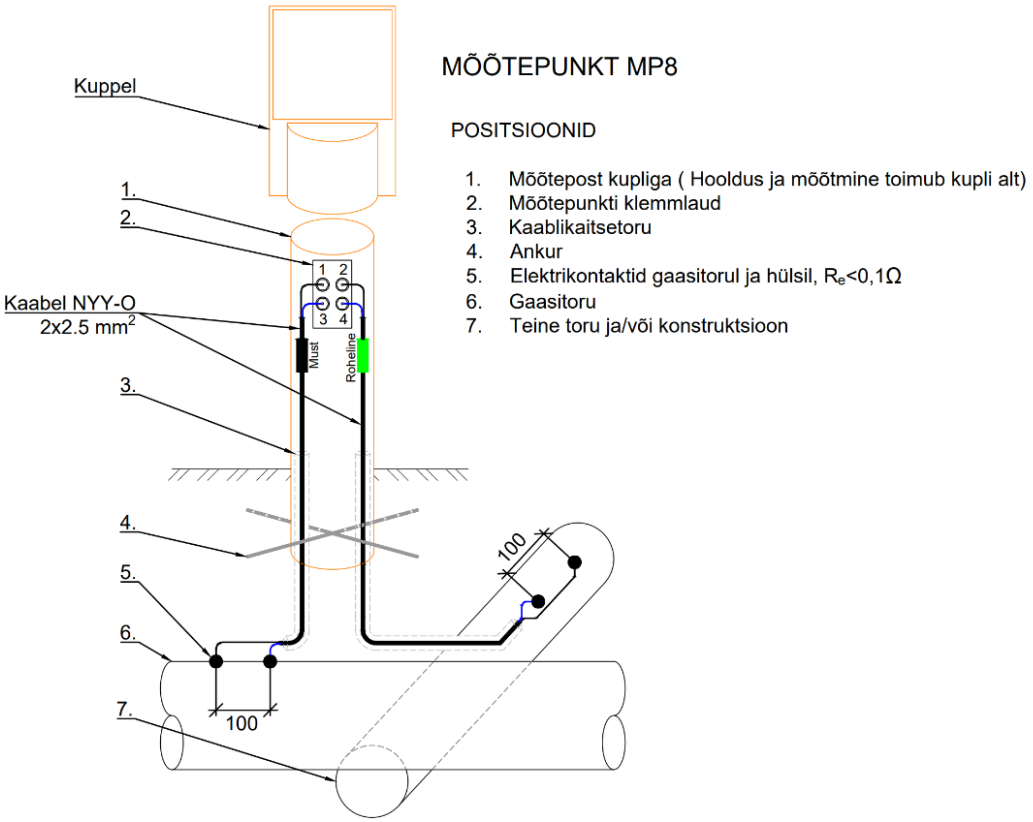
Lisa 3. Mõõtepunkt tüüp 4 skeem



Lisa 4. Mõõtepunkt tüüp 7 skeem



Lisa 5. Mõõtepunkt tüüp 8 skeem



Lisa 6. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Lehar Laurits_____,

(*autori nimi*)

sünniaeg 24.02.1994_____,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö VAHELDUVVOOLU MÕJU KATOODKAITSESÜSTEEMILE VESINIKTORU PUHUL EESTIS,

   (*lõputöö pealkiri*)

   mille juhendaja(d) on Andres Annuk ja Toivo Ardel,

   (*juhendaja(te) nimi*)

   salvestamiseks säilitamise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi EMU DSpace lisamiseks ja Creative Commonsi litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates lõputööd reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, üldsusele kättesaadavaks tegemiseks kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni;
2. olen teadlik, et lihtlitsentsiga antavad õigused jäävad alles ka mulle;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor (allkirjastatud digitaalselt, kuupäev digitaalallkirjas)

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

Juhendaja(d) (allkirjastatud digitaalselt, kuupäev digitaalallkirjas)