



B&B
VIŠJA STROKOVNA ŠOLA

Diplomsko delo višješolskega strokovnega študija
Program: Elektroenergetika
Modul: Elektroenergetska učinkovitost in elektroinstalacije

PREIZKUS KABLOVODOV Z MOBILNIM KABELSKIM LABORATORIJEM

Mentor: Matjaž Bobnar, univ. dipl. inž. el.
Lektorica: Klavdija Namurš, prof. slov.

Kandidat: Luka Vedlin

Celje, december 2024

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju Matjažu Bobnarju, univ. dipl. inž. el., za vso podporo, pomoč in strokovno svetovanje pri izdelavi diplomskega dela.

Zahvaljujem se mentorju v službi, Gregorju Kupcu, dipl. inž. el., iz podjetja Elektro Celje, d. d. za vso pomoč, spodbudo ter strokovno podporo in svetovanje pri izdelavi diplomskega dela.

Zahvaljujem se lektorici, Klavdiji Namurš, prof. slov., ki je moje diplomsko delo jezikovno in slovnično pregledala.

Zahvaljujem se tudi ekipi podjetja BAUR GmbH in g. Tomažu Pristovu iz podjetja Belmet MI, d. o. o., ki so pripomogli pri pridobivanju strokovne literature in mi bili v tehnično podporo.

Za konec se zahvaljujem tudi svojim domačim, partnerici Patriciji in vsem prijateljem, ki so mi tako ali drugače bili v pomoč in mi stali ob strani pri doseganju svojega cilja.

IZJAVA

Študent Luka Vedlin izjavljam, da sem avtor/ica tega diplomskega dela, ki sem ga napisal/a pod mentorstvom Matjaža Bobnarja, univ. dipl. inž. el..

Skladno s 1. odstavkom 21. člena Zakona o avtorski in sorodnih pravicah dovoljujem objavo tega diplomskega dela na spletni strani šole.

Dne _____

Podpis: _____

POVZETEK

V diplomskem delu smo na kratko predstavili sestavo in področje uporabe mobilnega kabelskega laboratorija, s katerim smo se lotili reševanja obravnavanega problema.

Kot osrednjo temo smo obravnavali izvedbo napetostnega preizkusa in kabelske diagnostike za srednje napetostne enožilne kable. Predstavili smo del zakonske podlage in smernice, ki se nanašajo na te preizkuse. Na podlagi teh smo pridobili določena navodila za izvedbo samih meritev in primerjav med opravljenimi obdobjnimi meritvami. Za tem smo opisali postopek priprave na delo in shemo ter način priključevanja na merjenca. Po izvedbi meritev smo obravnavali in primerjali pridobljene rezultate, njihov pomen in tehnično obrazložitev, kaj le-ti pravzaprav predstavljajo. Na podlagi rezultatov smo s pomočjo računskih enačb prišli do več kazalnikov, ki so nam po izvedbi analize in grafičnih prikazov podali stanje kablovoda.

Kazalnike smo obravnavali sproti, da smo zadevi lažje sledili in da ne bi prišlo do zmede. Po vseh izvedenih meritvah in analizi podatkov smo podali ugotovitev in predlagali določene ukrepe.

KLJUČNE BESEDE

- Mobilni kabelski laboratorij
- Napetostni preizkus
- Diagnostika energetskih kablov
- Merilne metode
- SN kablovod

SUMMARY

In this thesis, we briefly presented the structure and line for use of the mobile cable laboratory, which was also used to solve the problem we had.

As a main topic, we discussed how to do voltage test and cable diagnostics for medium voltage single-core cables. We have presented some legal basis and guidelines that refer to these tests. On that basis we have gained certain instructions for carrying out the measurements themselves. After that, we described the process of preparing for work, the scheme and the method of connecting to the measuring object. After the measurements, we discussed the results, their meaning and technical explanation of what they actually represent. Based on the help of calculation equations, we came up with several indicators that gave us the condition of the cable after performing the analysis and graphic displays.

We treated all the indicators regularly to make it easier to follow the case and to avoid confusion. After all the measurements and data analysis, we made a conclusion and proposed certain measures.

KEY WORDS

- Measuring cable laboratory.
- Voltage test
- Diagnostics of cables
- Measuring methods
- Medium voltage cables

KAZALO

1	UVOD.....	1
1.1	Predstavitev problema	1
1.2	Cilji dela	2
1.3	O podjetju	2
1.4	Predpostavke in omejitve	3
1.5	Metode dela	4
1.6	Zakonska podlaga	4
2	OPIS MOBILNEGA KABELSKEGA LABORATORIJA	5
2.1	Sestava vozila.....	5
2.2	Programska oprema kabelskega laboratorija.....	7
2.3	Področja uporabe kabelskega laboratorija.....	8
3	OPIS SN KABLA	9
3.1	Sestava kabla.....	9
3.2	Deformacije kabla.....	9
4	MERITVE	13
4.1	Podatki o merjencu	13
4.2	Priprava na meritev	13
5	MERILNE METODE.....	14
5.1	Enosmerna preizkusna napetost.....	14
5.2	VLF preizkusna napetost	14
5.3	Definicija Tan-Delta	15
6	IZVEDBA MERITEV.....	18
6.1	Meritve izolacije zunanjega plašča.....	18
6.2	Napetostni preizkus	19
6.3	Meritve TD.....	20
7	REZULTATI MERITEV LETA 2020	22
7.1	Tan-Delta leta 2020	22
7.2	Mean Tan-Delta leta 2020	24
7.3	Standardni odklon meritev Tan-Delta leta 2020	25
7.4	Δ Tan-Delta leto 2020	27
8	MERITVE 2024	28
8.1	Tan-Delta leto 2024.....	28
8.2	Mean Tan-Delta leto 2024.....	29
8.3	Standardni odklon meritev Tan-Delta leto 2024	30
8.4	Δ Tan-Delta leto 2024	31
9	MEJNE VREDNOSTI IN PRIMERJAVE.....	32
9.1	Obravnava rezultatov	33
9.2	Ocena stanja in izračun statistične življenjske dobe kablovoda.....	34
9.2.1	Faktor staranja R	34
9.2.2	Izračun statistične življenjske dobe kablovoda	35
10	UGOTOVITEV.....	36

11	ZAKLJUČEK.....	37
12	VIRI IN LITERATURA	38

KAZALO SLIK

Slika 1: Področja nadzorništev	3
Slika 2: Upravljalni prostor	6
Slika 3: Prikaz sestave VN prostora	7
Slika 4: Sestava SN kabla.....	9
Slika 5: Zrna peska v izolaciji	10
Slika 6: Tujki v termo krčljivi cevi.....	10
Slika 7: Poškodba z nožem.....	11
Slika 8: Prerez SN kabla z vodnimi drevesi.....	11
Slika 9: Vodna drevesa	12
Slika 10: Razvoj električnega drevesa	12
Slika 11: Nadomestno vezje enožilnega SN kabla	16
Slika 12: Kazalčni diagram izgubnega kota.....	17
Slika 13: Priklop 5 kV DC induktorja.....	18
Slika 14: Priključitev na merjenca za napetostni preizkus	19
Slika 15: Stopnje napetostnega preizkusa v letu 2020	20
Slika 16: Priključitev na merjenca za meritve TD.....	20
Slika 17: Grafični prikaz vrednosti Tan-Delta v letu 2020	23
Slika 18: Grafični prikaz povprečnih vrednosti MTD v letu 2020	25
Slika 19: Grafični prikaz vrednosti standardnega odklona meritev v letu 2020	26
Slika 20: Grafični prikaz vrednosti Tan-Delta v letu 2024	29
Slika 21: Grafični prikaz povprečnih vrednosti MTD v letu 2024	30
Slika 22: Grafični prikaz vrednosti standardnega odklona meritev v letu 2024	31

KAZALO TABEL

Tabela 1: Podatki o kablu	13
Tabela 2: Rezultati meritev izolacije zunanjih plaščev v letu 2020	18
Tabela 3: Rezultati meritev TD pri $0,5 \cdot U_0$ v letu 2020	22
Tabela 4: Rezultati meritev TD pri $1 \cdot U_0$ v letu 2020.....	23
Tabela 5: Rezultati meritev TD pri $1,5 \cdot U_0$ v letu 2020	23
Tabela 6: Preračunane povprečne vrednosti TD v letu 2020.....	24
Tabela 7: Preračunan standardni odklon meritev v letu 2020.....	26
Tabela 8: Izračunane razlike MTD med napetostnimi nivoji v letu 2020	27
Tabela 9: Rezultati meritev TD pri $0,5 \cdot U_0$ v letu 2024	28
Tabela 10: Rezultati meritev TD pri $1 \cdot U_0$ v letu 2024.....	28
Tabela 11: Rezultati meritev TD pri $1,5 \cdot U_0$ v letu 2024	29
Tabela 12: Preračunane povprečne vrednosti TD v letu 2024	29
Tabela 13: Preračunan standardni odklon meritev v letu 2024.....	30
Tabela 14: Izračunane razlike MTD med napetostnimi nivoji v letu 2024	31
Tabela 15: Ukrepi glede na vrednost rezultatov	32
Tabela 16: Odstopanje rezultatov glede na predhodne meritve	33

Tabela 17: Razlike v rezultatih meritev glede na predhodne meritve	34
Tabela 18: Faktor staranja.....	35

KRATICE IN AKRONIMI

TD:	izgubni kot
MTD:	povprečje vrednosti meritev TD
SDTD:	standardni odklon pri meritvah TD
VLF:	zelo nizka frekvenca
NN:	nizka napetost
SN:	srednja napetost
VN:	visoka napetost
DV:	daljnovod
SAIFI:	kazalnik povprečne frekvence prekinitev napajanja v sistemu
SAIDI:	kazalnik povprečnega trajanja prekinitev napajanja v sistemu
AC:	izmenična napetost
DC:	enosmerna napetost
GIZ DEE:	gospodarsko interesno združenje – distribucije električne energije
R:	faktor staranja kabla
CP:	kritična točka
DSP:	začetna točka staranja
RLT:	preostali čas obratovanja
DP:	obratovalna doba

1 UVOD

1.1 Predstavitev problema

Nemotena oskrba z električno energijo postaja za družbo vedno bolj pomembna. S tem namenom se distribucijsko omrežje redno obnavlja, saj lahko tako preprečimo morebitne nepredvidene izpade. Predvsem so vremenskim vplivom bolj izpostavljeni prostozračni vodi, zato se ti postopoma ukinjajo, nadomestijo pa jih kabelska omrežja in kablovodi. Le-ti so predvsem bolj odporni na vremenske razmere in so bolj varni, s seboj pa seveda prinašajo tudi določene izzive in zahteve.

Problem, ki ga bomo obravnavali, je srednjenapetostni kablovod, ki je bil zgrajen leta 2020 na področju upravljanja podjetja Elektro Celje, d. d., natančneje v savinjski regiji na področju nadzorništva Polzela. Izgradnja kablovoda je bila izvedena kot predmet investicije v posodobitev omrežja.

Investitor za izdelavo projekta in izgradnjo je zgoraj omenjeno podjetje Elektro Celje, d. d., ki s tovrstnimi investicijami želi izboljšati in nadgraditi svoje distribucijsko omrežje v smislu zmanjšanja okvar in nepredvidenih izpadov električnega omrežja. V izgradnjo in vzdrževanje so zajete tudi omenjene meritve, s katerimi se lahko na podlagi rezultatov oceni in spremlja stanje kablovoda, kar nam pomaga pri preprečevanju nepredvidenih izpadov omrežja, ki so večkrat vzrok tudi za nastanek gospodarske škode. Ob zmanjšanju tovrstnih izpadov se izboljšata tudi faktorja SAIFI in SAIDI, ki sta velik pokazatelj zanesljivosti omrežja.

Potreba po vse večji zanesljivosti obratovanja se v distribucijskih omrežjih vedno bolj izpostavlja. Predvsem se to odraža pri industrijskih porabnikih, katerih izpad napajanja lahko predstavlja veliko gospodarsko škodo. Srednjenapetostni kablovodi predstavljajo pomemben segment, kjer je ocena stanja izolacije bistvenega pomena za ovrednotenje obratovalne sposobnosti. Ne zadostuje samo, da je zagotovljena redundanca, pomembno je tudi preverjanje stanja kabla, ki se v distribucijah predvidoma izvaja ob polaganju novega kabla ali ob nastopu defekta. Življenjska doba kablov z XLPE izolacijo je ocenjena na približno 40 let. Le-ta se lahko zaradi električnih, termičnih in mehanskih obremenitev bistveno skrajša, ob doslednem izvajanju kabelske diagnostike pa se lahko tudi podaljša, zato je potrebno izolacijo preizkušati skladno s potrebo o zanesljivosti napajanja. (Vir: Smernica GIZ TS-11, 2023)

Z namenom zagotovitve kvalitete pri izvedbi del, ki je vezana na polaganje kablov in izdelavo kabelskega pribora, je pred vstavitvijo kablovoda v obratovanje potrebno upoštevati določila ustreznih standardov in pogodbe. Zahteve so vezane na preverjanje celovitosti izolacije zunanjega plašča in glavne izolacije. V ta namen se

izvedeta napetostni preskus zunanjega plašča kabla in napetostni preskus glavne izolacije z možnostjo dodatnih meritev delnih razelektrenj in izgubnega kota ($\tan \delta$). (Vir: Smernica GIZ TS-11, 2023)

Na osnovi pridobljenih rezultatov meritev je mogoče podati oceno o stanju kabla in pripadajočega pribora ter sprejeti odločitev za njihovo zamenjavo pred nastopom defekta zaradi zmanjšane izolacijske sposobnosti kabla. (Vir: Smernica GIZ TS-11, 2023)

1.2 Cilji dela

Cilj diplomskega dela je, da skozi izvedbo meritev in izračunov ugotovimo stanje obravnavanega kablovoda. Izvedli smo dvojne meritve v časovnem razmaku štirih let, ki jih bomo med seboj primerjali in tako ugotovili, v kakšnem stanju je kablovod in koliko se je stanje v času med meritvami spremenilo. S prvimi meritvami, ki smo jih izvedli leta 2020, smo ugotovili, če je bila v kablu prisotna vlaga, če se je morda med izgradnjo kablovoda kabel kje poškodoval in ali je na podlagi dobljenih rezultatov kabel primeren za obratovanje pri nazivni napetosti. Z drugimi meritvami, opravljenimi v letu 2024, ki smo jih izvedli na istem kablovodu in pod istimi pogoji kot leta 2020, smo pridobili rezultate, ki jih bomo lahko s pomočjo tehnologije in izračunov uporabili v primerjavi rezultatov meritev med leti 2020 in 2024. Tako bomo lahko podali oceno o predvideni življenjski dobi kabla in končno ugotovitev.

1.3 O podjetju

Podjetje "ELEKTRO CELJE, podjetje za distribucijo električne energije, d. d." se, kot nam pove že samo ime, ukvarja z zagotavljanjem zanesljive, kakovostne, stroškovno učinkovite in okolju prijazne oskrbe z električno energijo. Podjetje šteje trenutno 600 zaposlenih, organizacijska struktura pa je prikazana na sliki 1.

Distribucijsko območje Elektra Celje, d. d., zajema tri osrednje slovenske regije: savinjsko, koroško in posavsko s 40 občinami v celoti in dvema delno. Velikost distribucijskega območja je 4.345 km², cca 22 % površine Slovenije s 383.000 prebivalci. (Vir: Spletno mesto podjetja Elektro Celje d. d., b.l.)



Slika 1: Področja nadzorništev
(Vir: Spletno mesto podjetja Elektro Celje, d. d., b.l.)

1.4 Predpostavke in omejitve

Predpostavljamo, da je stanje kablovoda ustrezno, saj je ta pred izvedbo drugih meritev obratoval brezhibno in brez poškodb. Obratovalna doba kabla na dan izvedbe drugih meritev prav tako ne znaša več kot štiri leta, kar glede na predvideno skupno obratovalno dobo znaša približno 10 %.

Pri izdelavi diplomskega dela smo omejeni pri podaji ocen iz ekonomskega vidika. Meritve, ki jih bomo obravnavali v delu, so se pričele v našem podjetju izvajati leta 2018. Glede na to, da se meritve izvajajo na novo zgrajenih kablovodih in da je njihova obratovalna doba ocenjena približno na 40 let, še težko govorimo o primeru, kjer bi zaradi izvedbe diagnostike lahko ugotovili, da je kabel v slabem stanju, in predlagali

zamenjavo ali popravilo, prav tako pa iz istega razloga še ni možno ugotoviti izboljšanja stanja kazalnikov SAIFI in SAIDI.

1.5 Metode dela

V delu smo uporabili različne metode raziskovanja, in sicer opisno metodo, s katero smo najlažje opisali možne okvare in potek izvedbe meritev, metodo združevanja, ki smo jo uporabili pri razlagi teorije, ki smo jo črpali iz več različnih virov, in seveda tudi analitično metodo, s katero smo podrobno preučili rezultate in njihov pomen ter kaj pomenijo kot celota.

1.6 Zakonska podlaga

Na podlagi objavljenih dokumentov oziroma smernic, ki so bile zaradi izdaje številnih novih standardov in sprejetij novih zakonskih aktov objavljene maja 2023 s strani GIZ DEE, je potrebno upoštevati navodila za preizkušanje kablov pri novo zgrajenih kablovodih. Pri tem so zajeta navodila za izvedbo meritev celovitosti izolacije zunanjega plašča, napetostnega preizkusa in meritve izgubnega kota TD, ki nam bodo v pomoč pri reševanju podanega problema.

2 OPIS MOBILNEGA KABELSKEGA LABORATORIJA

Vozilo, ki je opremljeno z merilno opremo, je kombinirano vozilo tipa L2, H3 in spada v B kategorijo motornih vozil, saj skupna teža ne presega 3,5 t. Vozilo sestavljajo trije glavni prostori, in sicer kabina, upravljalna soba in VN prostor.

2.1 Sestava vozila

Kabina je namenjena potovanju in lahko sprejme voznika ter sovoznika. V kabini se poleg osnovne opreme nahaja tudi stikalo za vklop agregata, preko katerega se napaja oprema v upravljalni sobi, kadar napajanje iz omrežja ali drugega zunanjega vira ni omogočeno. Poleg teh dejstev v potniškem prostoru ni večjih posebnosti.

Upravljalni prostor je osrednji del vozila, kjer se nahajajo:

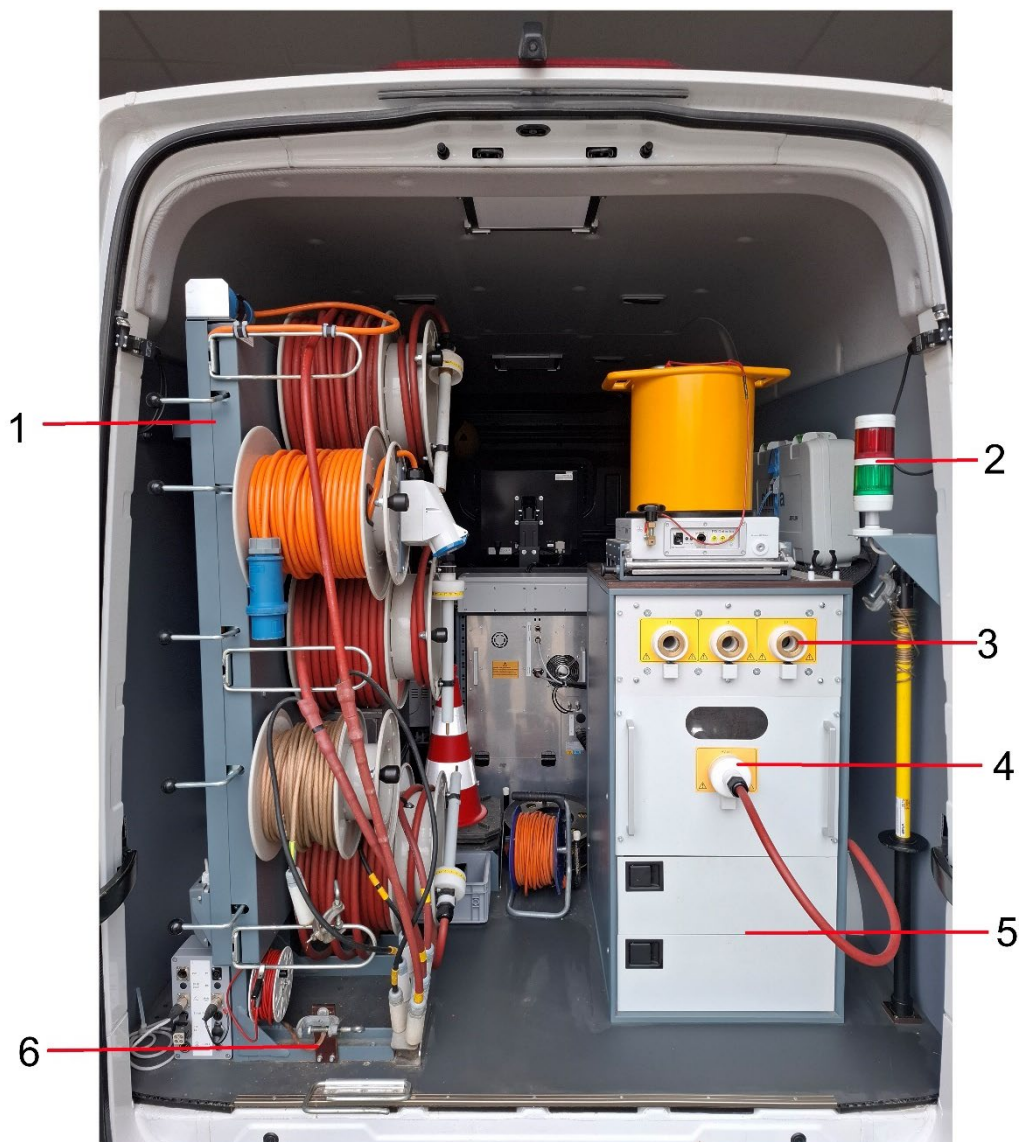
- Predali za shranjevanje opreme za posluževanje centralne krmilne enote, navodil za uporabo in ostale dokumentacije (1).
- Centralna krmilna enota, opremljena s programsko opremo Windows, se nahaja na delovni mizi. Enota služi za vklop sistema, preko katerega upravljamo s sprostitvijo visoke napetosti in razsvetljavo upravljalne sobe ter VN prostora (2).
- Monitor, ki omogoča prikazovanje uporabniškega vmesnika systemske programske opreme BAUR 4 (3).
- Števec delovnih ur, ki nam pove, koliko časa je obratoval dodatni generator.
- NN priključna plošča, ki služi za priključevanje zunanjih NN merilnih naprav do 1 kV za merjenje izolacijske upornosti in določanja položaja trase preko avdio frekvenčnega oddajnika. (4)
- Grelnik z ventilatorjem, ki služi za ogrevanje upravljalnega prostora, kar je tudi boljše za merilno opremo. (5)



Slika 2: Upravljalni prostor
(Lastni vir)

VN prostor se nahaja v zadnjem delu vozila, kjer se nahajajo naslednji elementi:

- Ogrodje za kableske bobne, ki je namenjeno shranjevanju, odvijanju in navijanju priključnih kablov, kjer so shranjeni trije visokonapetostni kabli, kabel za priključitev napajanja in kabel za ozemljitev (1).
- Signalne luči rdeče in zelene barve, ki prikazujejo delovno stanje sistema in nam s tem sporočajo, ali je vstop v VN prostor varen ali ne (2).
- VN koaksialne priključne vtičnice namenjene priklopu VN priključnih kablov za določanje položaja napake na kablih (3).
- VN koaksialna vtičnica namenjena priklopu VN priključnega kabla za diagnostične meritve in preizkušanje kablov (4).
- Predali za shranjevanje pripomočkov in elementov, ki jih potrebujemo za postopke merjenja (5).
- Ozemljitvena sponka za ozemljitev vozila in izničenje napetosti koraka (6).



Slika 3: Prikaz sestave VN prostora
(Lastni vir)

2.2 Programska oprema kableskega laboratorija

Vozilo oziroma centralna krmilna enota je opremljena s programsko opremo BAUR 4, ki nam omogoča krmiljenje sistema BAUR titron® in je glede na uporabo sistema namenjena za določanje položaja napake na kablu ter preskušanje in diagnostiko kablov, kar bomo uporabili pri reševanju problema. Preko programske opreme in odvisno od izvedbe priključitve bomo nastavili parametre glede na meritev, ki jo bomo izvajali. Programska oprema nam omogoča pregled zemljevida z vrisanimi kablenskimi trasami za lažjo orientacijo, meritev za določanje položaja napake na kablju, opravljanje napetostnih preizkusov kablov oziroma kablovodov, opravljanje

diagnostike, meritve delnih praznjenj in precej ostalih možnosti. Kadar želimo na kablu opraviti napetostni preizkus in diagnostiko, izberemo eno od možnosti in nastavimo željene parametre.

Preko programskega vmesnika lahko spremljamo vse meritve in trenutne rezultate, kar pomeni, da lahko med meritvijo točno vidimo, kaj se z merjencem dogaja in lahko temu primerno tudi ustrezno ukrepamo.

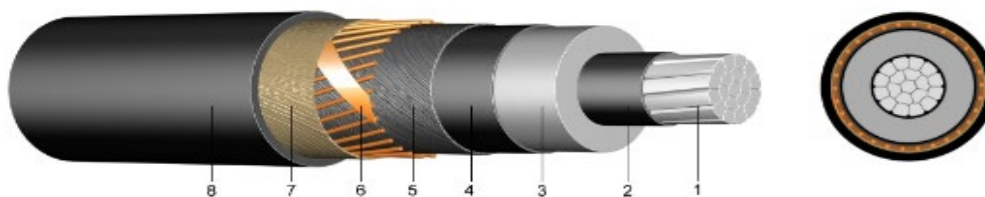
2.3 Področja uporabe kabelskega laboratorija

Kot je že bilo omenjeno v zgornjem podpoglavju, lahko torej z mobilnim kabelskim laboratorijem opravljamo napetostne preizkuse kablov, izolacijo plaščev, diagnostike kablov, meritve delnih praznjenj, določanje položaja trase in določanje položaja napake na kablju. Meritve lahko opravljamo na napetostnih nivojih 0–62 kV AC, 0–80 kV DC in frekvenci 0,01–1 Hz. Meritve lahko torej opravljamo tako na NN kot na SN nivojih.

3 OPIS SN KABLA

3.1 Sestava kabla

Da bi lažje razumeli obravnavano temo in določene izraze ter slike, je pomembno, da predstavimo tudi sestavo srednjenapetostnega kabla, na katerem smo opravili meritve. Elementi oziroma sestavni deli kabla so prikazani na spodnji sliki in označeni s pripadajočimi številkami.



Slika 4: Sestava SN kabla
(Vir: Spletno mesto Tesla cables, b.l.)

1. Vodnik iz aluminija
2. Notranja polprevodna plast na žili
3. Glavna izolacija žile iz polietilena
4. Zunanja polprevodna plast na glavni izolaciji
5. Vzdolžna vodna zapora – ekspanzirani trak
6. Bakreni zaslon
7. Preča vodna zapora
8. Zunanji plašč – izolacija

3.2 Deformacije kabla

Sedaj, ko poznamo zgradbo SN kabla, si lažje predstavljamo poškodbe katerih plasti najbolj vplivajo na stanje in staranje kabla ter posledično tudi na rezultate samih meritev in pogostost okvar. Največji vpliv na stanje kabla imajo poškodbe glavne izolacije in nečistoče v samem materialu ali pa poškodbe, ki lahko nastanejo ob izdelovanju končnikov in spojk.



Slika 5: Zrna peska v izolaciji
(Vir: Interna dokumentacija Baur GmbH, 2019)



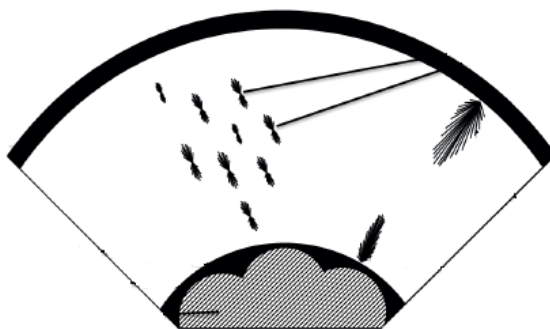
Slika 6: Tujki v termo krčljivi cevi
(Vir: Interna dokumentacija Baur GmbH, 2019)



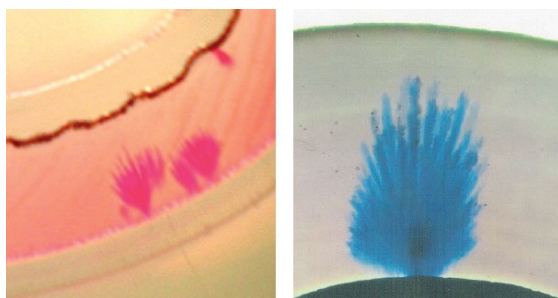
Slika 7: Poškodba z nožem
(Vir: Interna dokumentacija Baur GmbH, 2019)

Mehanske poškodbe, ki jih je povzročila neka tretja oseba, so lokalne narave, kar pomeni, da jih z lahkoto odkrijemo in odpravimo, saj se nahajajo na nekem določenem mestu, kjer je prišlo do poškodbe. Poleg teh poškodb poznamo tudi okvare glavne izolacije, ki se pojavijo zaradi nečistoč v kablu, ki so prisotne ob proizvodnji kabla ali ob povečani vlagi in so poleg rokovanja velikokrat tudi posledica okvar na kablu. Posledica teh nečistoč je nastanek vodnih dreves, ki traja več let in se lahko razvijajo, ne da bi pri tem kabel izgubil svojo funkcijo kapacitivnosti. Posledica take deformacije je uhajavi tok, ki se pojavlja vzdolž kabla, kar pa nam omogoča, da s pomočjo meritve Tan-Delta, ki smo jo opravili, ugotovimo, kakšna sta količina in intenzivnost teh vodnih dreves. Ker pri vodnih drevesih še ne prihaja do delnih praznjenj, je lokacijo teh za razliko od mehanskih poškodb in okvar kabla nemogoče določiti.

Na spodnjih slikah je za lažjo predstavbo skiciran prerez kabla z vodnimi drevesi in njihov izgled v praksi.

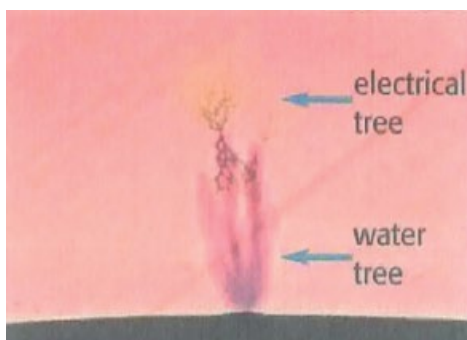


Slika 8: Prerez SN kabla z vodnimi drevesi
(Vir: Interna dokumentacija Baur GmbH, 2019)



Slika 9: Vodna drevesa
(Vir: Interna dokumentacija Baur GmbH, 2019)

Iz zgoraj predstavljenih vodnih dreves se na lokacijah, kjer je povečano električno polje, razvijejo električna drevesa, katerih posledica so lokalna delna praznjenja, ki ustvarjajo votle kanale. Preko teh se pojavi preboj napetosti med glavnim vodnikom in ozemljenim ekranom, ki povzroči izpad kablovoda. Ob pojavu električnih dreves nas za razliko od vodnih dreves in ostalih poškodb do okvare včasih loči le kratek čas v okviru dni, ur ali celo minut. Za razliko od vodnih dreves lahko z meritvijo delnih praznjenj določimo lokacijo električnih dreves in lahko tako pravočasno saniramo potencialno okvaro, da ne pride do nepričakovanih izpadov električne energije. Razvoj električnega drevesa iz vodnega je prikazan na spodnji sliki.



Slika 10: Razvoj električnega drevesa
(Vir: Interna dokumentacija Baur GmbH, 2019)

4 MERITVE

4.1 Podatki o merjencu

Da lahko opravimo meritve, moramo najprej imeti podatke o kablu, ki ga bomo preizkušali in diagnosticirali. Prav tako moramo zaradi kasnejših potreb in primerjav zabeležiti še datum polaganja in stanje vremena v času meritve, saj morajo za primerjavo meritev biti pogoji podobni. Podatki kablovoda so prikazani v spodnji tabeli.

Tip:	NA2XS(F)2Y
Snov vodnika [Al/Cu]:	Al
Presek [mm ²]:	3 x 1 x 150
Dolžina [m]:	2660
Nazivna napetost [kV]:	20
Obratovalna napetost [kV]:	20
Potek:	RP Ločica – TP Šentrupert BS
Datum polaganja:	2020

*Tabela 1: Podatki o kablu
(Lastni vir)*

4.2 Priprava na meritve

Po izvedbi strokovnega nadzora pri polaganju kabla in montaži kablanskega pribora, vključno s preverjanjem celovitosti zunanega plašča kabla, je potrebno preveriti celovitost izolacije kablovoda v skladu s standardom IEC 60840, ki navaja več različnih načinov preizkušanja. V našem primeru smo uporabili metodo VLF z izmenično napetostjo. Preizkus smo dopolnili še z meritvijo izgubnega kota TD.

Po posredovanem delovnem nalogu in informacijah o kablovodu smo se odpravili na lokacijo, kjer je bila potrebna izvedba meritev. Po prihodu na delovišče smo preverili, ali je kabel ustrezno pripravljen na izvedbo meritev, in ugotovili, na katerem koncu kabla bo dostop bolj primeren za naše vozilo. Ko smo to preverili, smo v skladu s pravilnikom o varstvu in zdravju pri delu ogradili mesto dela od delov, ki so med preizkušanjem ostali pod napetostjo, in namestili opozorilne table. Ker je bila lokacija dela od glavne ceste odmaknjena, ni bilo potrebe po dodatni signalizaciji ali ukrepah.

5 MERILNE METODE

V smernici GIZ TS-11, objavljeni na spletni strani gospodarskega interesnega združenja, so navedene zahteve za opravljanje meritev na novo zgrajenih kablovodih. Smernica se pri dajanju navodil sklicuje na standarde, ki določajo spodaj navedene merilne metode.

Meritve izolacije plašča:

- preizkušanje z uporabo induktorja 5 kV DC.

Preizkusne in diagnostične metode kabla:

- preizkušanje z izmenično napetostjo frekvence od 20 Hz -300 Hz,
- preizkušanje z napetostjo zelo nizke frekvence VLF (ang. Very Low Frequency),
- preizkušanje z dušeno izmenično napetostjo DAC (angl. Damped AC voltage),
- dielektrična spektroskopija FDS (angl. Frequency Domain Spectroscopy).

Oblike preizkusne napetosti:

- enosmerna napetost, ki je standardi ne priporočajo,
- napetost zelo nizke frekvence (angl. VLF: Very Low Frequency),
- napetost industrijske frekvence 50 Hz ter do nekaj 100 Hz z nihajočo napetostjo (polnilna enosmerna napetost).

5.1 Enosmerna preizkusna napetost

Preizkušanje zunanjšega plašča SN kabla nazivne napetosti 12/20 kV se izvaja na položenem kablu z namenom ugotovitve stanja izolacije in celovitosti zunanjšega plašča. Meritve se opravijo, ko je kabel zasut s plastjo drobne zemlje ali peska.

Pri meritvah se uporabi enosmerna napetost vrednosti 5 kV v trajanju 1 minute. Pri tem velja, da mora imeti plašč kabla pri preizkušanju z napetostjo 5 kV upornost izolacije večjo od 5 M Ω .

5.2 VLF preizkusna napetost

Ta preizkusna metoda je ena izmed prvih alternativnih metod, ki omogoča preizkušanje kableske izolacije brez uporabe visokih napajalnih moči. Namenjena je predvsem za diagnozo SN kablov, kar navaja standard IEC 60060-3. Predmetni standard navaja, da je VLF oblika preskusne napetosti primerna za vzorčno preskušanje, kar pomeni, da je primerna tudi za izvajanje diagnostičnih meritev.

Metoda se uporablja predvsem v povezavi z meritvami faktorja Tan-Delta. (Vir: Smernica GIZ TS-11, 2023).

Kot navaja smernica GIZ TS-11, sta poznani dve obliki VLF preskusne napetosti, in sicer VLF sinusna, ki smo jo uporabili v našem primeru, in VLF stopničasto-kosinusna oblika, ki pa ju standard ne razlikuje. Zaradi frekvenčne odvisnosti preskusne napetosti je pri VLF sinusni preskusni napetosti v standardu SIST HD 620 S2 za preskušanje po polaganju preskusna napetost nekoliko višja kot pri preskusni izmenični napetosti nazivne frekvence.

Napetostni preizkus kablovoda smo izvedli z merilno metodo VLF, ki je v smernici navedena kot najpogostejša. Meritve pri tej metodi se izvedejo z uporabo izmenične napetosti zelo male frekvence 0,1 Hz in napetosti $2 \cdot U_0$. Meritev je primerna za preizkus kablovoda pred priključevanjem v obratovanje, medtem ko ta metoda za kasnejše meritve oziroma ponovne preizkuse ni potrebna, razen v primeru meritev po odpravi okvare. Za kasnejše preizkuse je bolj pomembna metoda za ugotavljanje lastnosti dielektrika, kar storimo z izvedbo meritve faktorja TD pri frekvenci 0,1 Hz in napetosti $1,5 \cdot U_0$. S tem pridobimo oceno o količini in intenziteti vodnih dreves, ki vplivajo na obratovalno dobo kablovoda.

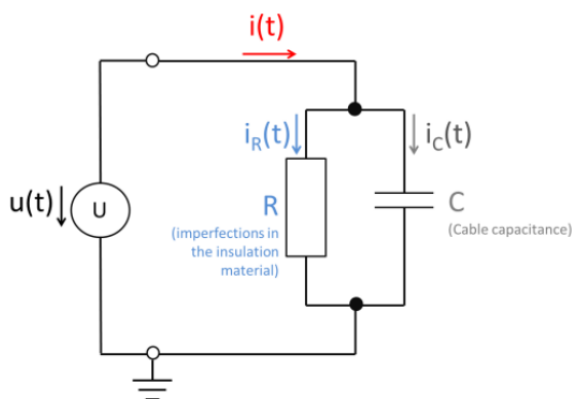
Tako torej opravimo napetostni preizkus, da vidimo, če je kabel primeren za obratovanje pri nazivni napetosti, za tem pa opravimo še meritve kota izgubnega faktorja Tan-Delta, s katerimi izvemo, v kakšnem stanju je kablovod, na podlagi česar lahko potem podamo oceno stanja, podatke pa nato uporabimo za primerjavo s kasnejšimi obdobjnimi meritvami, ki nam, kot v zaključku tega dela, podajo trend staranja kabla.

5.3 Definicija Tan-Delta

Meritve Tan-Delta ali z drugim imenom meritve izgubnega kota so diagnostična merilna metoda za preizkušanje lastnosti izolacije, kar nam pomaga pri izdelavi ocene stanja kabla na podlagi pridobljenih rezultatov. Kaj pravzaprav je izgubni kot TD, je nazorno prikazano na sliki 12, kjer vidimo, da gre za razmerje kapacitivnega in uporovnega toka.

Za lažjo predstavo si lahko sredjenapetostni enožilni kabel predstavljamo kot vezje idealnega kondenzatorja in neskončnega upora, kjer v idealnem tokokrogu tok prehiteva napetost za 90° . V kolikor si želimo predstavljati kabel v smislu nadomestnega vezja, se moramo zavedati, da v praksi ne poznamo idealnih kondenzatorjev kot tudi ne neskončnih uporov, predvsem pa se ta razlika pokaže pri obravnavanju kabla. Zaradi realnih razmer si kabel predstavljamo kot vzporedno vezavo realnega upora in kondenzatorja, s čimer dobimo tako imenovani RC tokokrog

in tako tudi dva tokova, ki tečeta skozenj. Na spodnji levi sliki imamo torej v obliki nadomestnega vezja prikazan SN kabel.



Slika 11: Nadomestno vezje enožilnega SN kabla
(Vir: Spletno mesto HV Technologies Inc., 2018)

Z našo meritvijo želimo torej ugotoviti, za koliko v danem tokokrogu tok prehitveva napetost, kar lahko na podlagi dobljenih rezultatov izračunamo po spodnji enačbi.

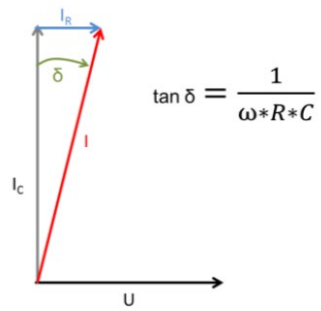
$$\tan(\delta) = \frac{I_R}{I_C} = \frac{V/R}{V/(1/\omega C)} = \frac{1}{\omega RC}$$

Kot vidimo v zgornji enačbi, je vrednost izgubnega kota TD enaka razmerju kapacitivnega in uporovnega toka, ki sta prisotna v času meritev. Uporovni tok se pojavi zaradi nečistosti glavne izolacije vodnika in prisotnosti vlage ter vodnih dreves, ki občutno zmanjšajo življenjsko dobo kabla. Večji je torej uporovni tok v primerjavi s kapacitivnim, toliko večji je izgubni kot TD.

Kot primer lahko uporabimo eno izmed povprečnih vrednosti meritev, obravnavanih kasneje v delu, iz katere lahko s pomočjo kotnih funkcij izpeljemo velikost izgubnega kota in ga tako prikažemo tudi na diagramu.

$$\tan^{-1} \delta = 0,374 \times 10^{-3} = 0,02^\circ$$

Pri idealnem kablu, kjer uporovnega toka ne bi bilo, bi tok zaostajal za napetostjo 90° , v našem primeru pa zaradi realnih razmer, kjer kabel ni enak idealnemu kondenzatorju, tok za napetostjo zaostaja malo manj, in sicer $89,98^\circ$. Spodnja slika nam tako nazorno prikaže ugotovljene razmere v obliki kazalčnega diagrama.



Slika 12: Kazalčni diagram izgubnega kota
(Vir: Spletno mesto HV Technologies Inc., 2018)

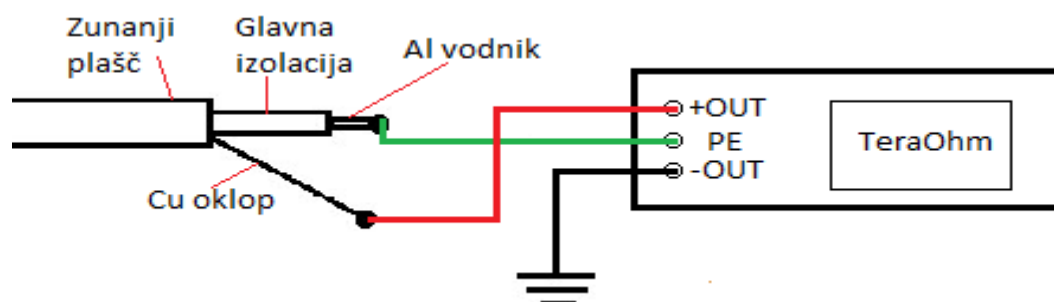
6 IZVEDBA MERITEV

Po prejemu delovnega naloga, dodeljenem s strani vodje objekta, smo pričeli z izvedbo same meritve na predmetnem kablovodu. K izvedbi smo pristopili po spodaj opisanem postopku.

6.1 Meritve izolacije zunanje plašča

Pri preizkusu na novo zgrajenega kablovodu smo kot prvi preizkus na kablovodu opravili meritev izolacije zunanjih plaščev vseh treh kablov obravnavanega sistema, s čimer bi lahko zasledili morebitne mehanske poškodbe pri polaganju kablov. Meritev smo, kot je zgoraj navedeno, izvedli z enosmerno napetostjo 5 kV, pri čemer velja, da naj bi dober kabelski plašč imel vrednost večjo od 5 M Ω .

Pri izvedbi preizkusa smo napetost priključili med bakreni ekran kabla in zemeljski potencial, kar pomeni, da smo pozitivno elektrodo generatorja napetosti priključili na ekran, negativno pa na ozemljitev transformatorske postaje. Priključitev najbolj nazorno prikaže spodnja slika.



Slika 13: Priklop 5 kV DC induktorja
(Lastni vir)

Pri izvedbi meritev smo prišli do rezultatov podanih v spodnji tabeli. Rezultati nam povedo, da je izolacija zunanje plašča ustrezna, kar pomeni, da ta ni poškodovan. Po pozitivnih rezultatih meritev v letu 2020 in ugotovitvi stanja lahko torej nadaljujemo z naslednjo točko.

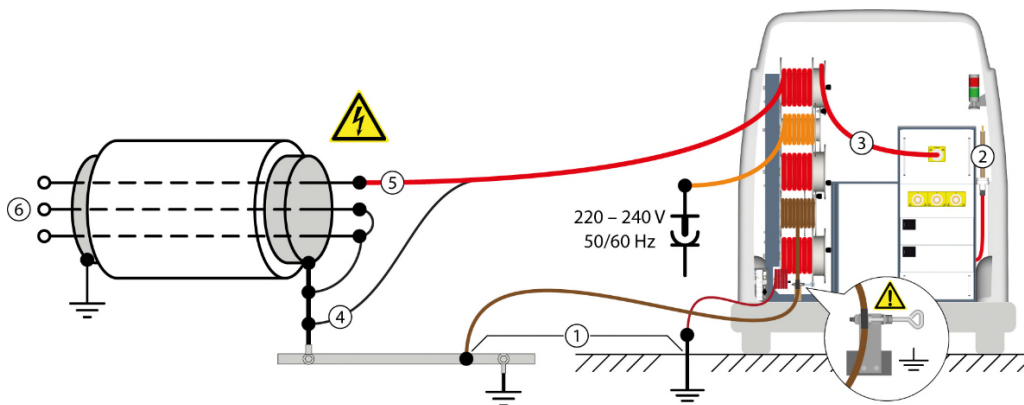
Faza	L1	L2	L3
Upornost izolacije	205 M Ω	472 M Ω	418 M Ω

Tabela 2: Rezultati meritev izolacije zunanjih plaščev v letu 2020
(Lastni vir)

6.2 Napetostni preizkus

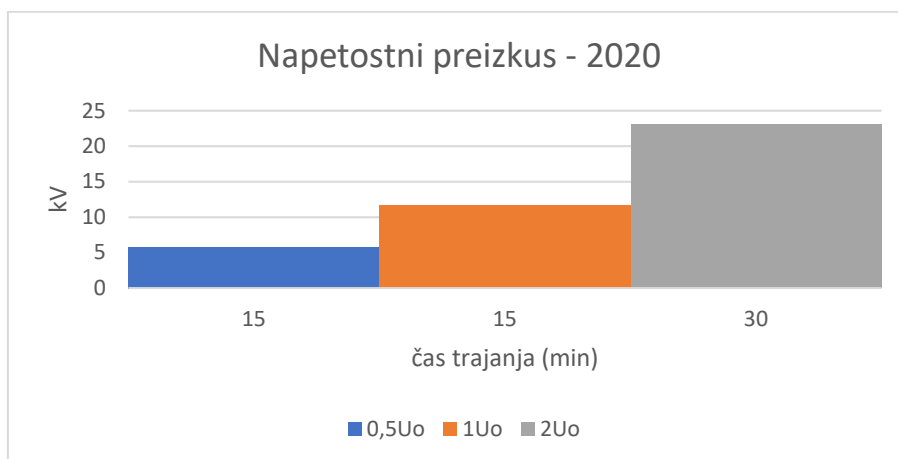
V nadaljevanju postopka smo opravili napetostni preizkus glavne izolacije kabla. Pri tem smo uporabili metodo preizkušanja, ki nam jo laboratorij omogoča, in sicer preizkus s sinusno napetostjo zelo nizke frekvence, ki smo jo uporabili za napetostni preizkus in izvedbo diagnostičnih meritev.

Pri preizkusu se sklicujemo na smernice za izvedbo in tako meritev opravimo po naslednjem postopku. Najprej se pripravimo na meritev tako, da se na merjenca priključimo po principu, ki je prikazan na sliki 14. Najprej smo vozilo ozemljili s priključno ozemljitveno vrvjo, da smo pridobili zemeljski potencial za potrebe meritev. Prav tako smo se na zemeljski potencial povezali preko dodatne samostojne sonde z vodnikom za izenačevanje napetosti koraka, kar nam je služilo kot varnostni ukrep. Za tem smo priključili VN priključni kabel na glavni vodnik SN kabla, oklop VN priključnega kabla pa na oklop SN kabla, ki smo ga prav tako ozemljili. Glede na potrebe pri opravljanju meritev smo izbrali tudi ustrezen VN koaksialni priključek. V našem primeru je bil to izhod z visoko napetostjo, označen kot HV OUT. Po vseh izvedenih priključitvah smo potrebovali še napetostni vir za napajanje samega laboratorija. Zaradi lokacije dela nismo imeli možnosti priključitve na zunanji vir, kot je na primer distribucijsko omrežje, zato smo za napajanje uporabili agregat, ki je za te primere vgrajen v samem vozilu.



Slika 14: Priključitev na merjenca za napetostni preizkus
(Vir: Interna dokumentacija Baur GmbH, 2018)

Ko smo končali s pripravami in priključki, smo v program vpisali podatke o kablu iz slike 15 in s pomočjo programske opreme nastavili parametre meritev, se pravi čas opravljanja meritve in napetostne nivoje. Pri izvedbi napetostnega preizkusa smo uporabili obliko sinusne napetosti pri nivojih $0,5 \cdot U_0$, $1 \cdot U_0$ in $2 \cdot U_0$, ki so v odvisnosti od časa prikazani v spodnjem grafu.

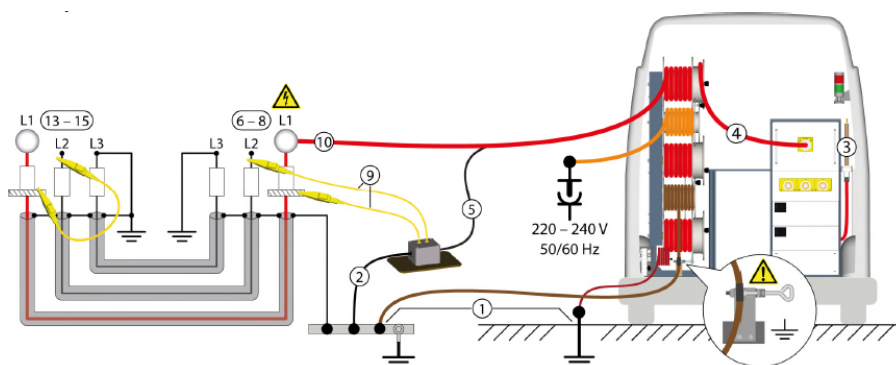


*Slika 15: Stopnje napetostnega preizkusa v letu 2020
(Lastni vir)*

Med meritvijo bi v primeru poškodbe glavne izolacije lahko prišlo do preboja ali preskoka. V katerem napetostnem nivoju bi se lahko to zgodilo, pa bi bilo odvisno od vrednosti izolacijske upornosti na mestu okvare. Kot rezultat meritev tu nismo podajali drugih vrednosti, razen prikaza v grafu. Pomembno je samo, da kabel vzdrži določeno napetost v določenem času.

6.3 Meritev TD

Glede na vrstni red opravljanja meritev, ki smo si ga zadali, so naslednje po vrsti meritve izgubnega kota TD. Sistem priključevanja je zelo podoben tistemu za napetostni preizkus z dodatkom enote za zaznavanje uhajavih tokov, kar sistem upošteva pri rezultatih meritev.



*Slika 16: Priključitev na merjenca za meritve TD
(Vir: Interna dokumentacija Baur GmbH, 2018)*

Po izvedbi spremembe priključitve smo nadaljevali tako, da smo v programu izbrali meritve izgubnega kota. V tej rubriki smo ponovno nastavili parametre, in sicer čas meritve ter napetostne nivoje. Meritve izgubnega kota TD smo izvedli v napetostnih nivojih $0,5 \cdot U_0$, $1 \cdot U_0$ in $1,5 \cdot U_0$. Frekvenca je ostala enaka kot pri napetostnem preizkusu, in sicer 0,1 Hz.

7 REZULTATI MERITEV LETA 2020

Po opravljenih prvih meritvah na kablovodu leta 2020 smo opravili analizo rezultatov in izračune nekaterih kazalnikov. Kot že omenjeno, pri napetostnem preizkusu nismo pridobili drugih podatkov ali vrednosti, saj je pri tem šlo le za preizkus. Pri meritvi izolacije zunanjšega plašča smo pridobili rezultate, ki so podani v tabeli 2 in so nam podali informacijo o stanju zunanjšega plašča, s čimer smo izključili tudi možnost vdora vode v kabel.

Pri zadnji opravljeni meritvi izgubnega kota TD smo prišli do oprijemljivih rezultatov, ki nam povedo, kakšno je začetno stanje kabla ob vgradnji, kar je, kot že povedano, velikega pomena v smislu preprečitve škode in načrtovanja vzdrževanja. Rezultati, ki smo jih pridobili pri tej meritvi, so navedeni v nadaljevanju poglavja.

7.1 Tan-Delta leta 2020

Rezultat meritev Tan-Delta predstavlja razmerje med uporovnim in kapacitivnim tokom, ki se pojavita med meritvijo. Rezultat je podan v obliki izgubnega kota, ki ga lahko prikažemo tudi s kazalnim diagramom (slika 12). Meritve opravimo v treh različnih napetostnih nivojih, in sicer pri $0,5 \cdot U_0$, $1 \cdot U_0$ in $1,5 \cdot U_0$. Zavedati se moramo, da so te meritve velik pokazatelj prisotnosti vlage v kablu, in sicer, če se pri posameznem napetostnem nivoju rezultati izboljšujejo, pomeni, da kabel sušimo, to pa pomeni, da je v njem prisotna večja količina vlage. Izmerjene vrednosti, ki nam jih je podal program, so razvidne iz spodnjih tabel.

Zap. št.	TD pri $0,5 \cdot U_0$ (5,8 kV)		
	L1	L2	L3
1	0,374	0,670	0,550
2	0,374	0,673	0,549
3	0,373	0,670	0,549
4	0,377	0,672	0,546
5	0,372	0,671	0,547
6	0,372	0,672	0,550

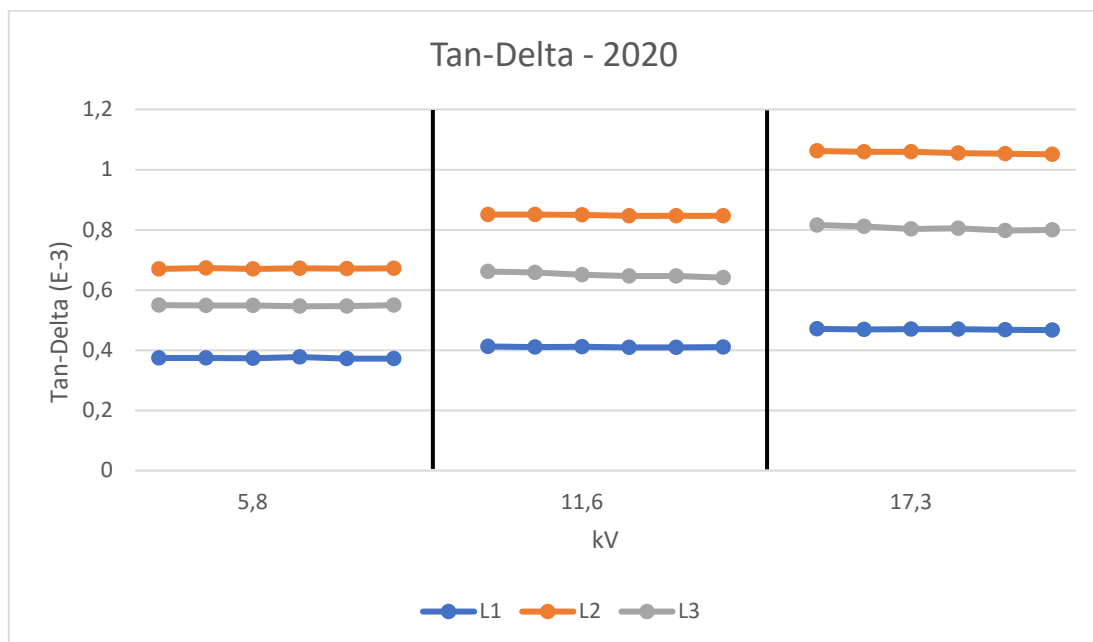
Tabela 3: Rezultati meritev TD pri $0,5 \cdot U_0$ v letu 2020
(Lastni vir)

Zap. št.	TD pri $1 \cdot U_0$ (11,6 kV)		
	L1	L2	L3
1	0,412	0,851	0,661
2	0,410	0,851	0,658
3	0,411	0,850	0,651
4	0,409	0,847	0,647
5	0,409	0,847	0,646
6	0,410	0,847	0,641

Tabela 4: Rezultati meritev TD pri $1 \cdot U_0$ v letu 2020
(Lastni vir)

Zap. št.	TD pri $1,5 \cdot U_0$ (17,3 kV)		
	L1	L2	L3
1	0,471	1,062	0,816
2	0,469	1,059	0,811
3	0,470	1,059	0,803
4	0,470	1,055	0,805
5	0,468	1,053	0,798
6	0,467	1,051	0,800

Tabela 5: Rezultati meritev TD pri $1,5 \cdot U_0$ v letu 2020
(Lastni vir)



Slika 17: Grafični prikaz vrednosti Tan-Delta v letu 2020
(Lastni vir)

7.2 Mean Tan-Delta leta 2020

Mean TD predstavlja povprečje izmerjenih vrednosti pri konstantni preizkusni napetosti. To nam poda realen rezultat, ki je bolj točen in je osnova za nadaljnje izračune. Povprečje izračunamo po spodnji enačbi.

$$MTD = \frac{TD_1 + TD_2 \dots \dots TD_N}{N}$$

Primer:

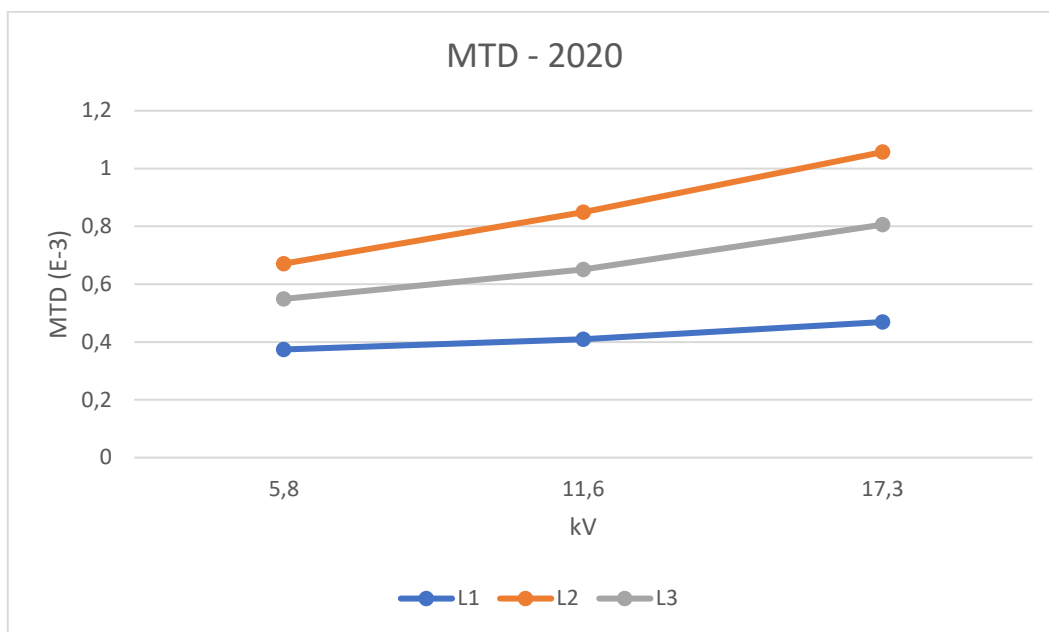
Izračunana povprečna vrednost meritev kabla L1 pri napetosti $0,5 \cdot U_0$, ki so krepko označene v tabeli 3.

$$\begin{aligned} MTD &= \frac{TD_1 + TD_2 + TD_3 + TD_4 + TD_5 + TD_6}{6} = \\ &= \frac{0,374 + 0,374 + 0,373 + 0,377 + 0,372 + 0,372}{6} = \\ &= \frac{2,242}{6} = \mathbf{0,374} \end{aligned}$$

Rezultati:

Napetostni nivo	MTD		
	L1	L2	L3
$0,5 \cdot U_0$	0,374	0,671	0,549
$1 \cdot U_0$	0,410	0,849	0,651
$1,5 \cdot U_0$	0,469	1,057	0,806

Tabela 6: Preračunane povprečne vrednosti TD v letu 2020
(Lastni vir)



Slika 18: Grafični prikaz povprečnih vrednosti MTD v letu 2020
(Lastni vir)

7.3 Standardni odklon meritev Tan-Delta leta 2020

Rezultat SDTD predstavlja standardni odklon izmerjenih vrednosti TD od aritmetične sredine rezultatov MTD. Faktor SDTD nam poda stabilnost merjenja, kar je velikega pomena pri podaji ocene stanja. Manjša je vrednost standardnega odklona meritev, bolj je merjenec oziroma izolacija stabilna, kar enostavno pomeni boljšo izolacijo, saj velja, da je stabilna izguba zaradi izolacije pokazatelj dobrega izolatorja. Vrednost SDTD ima torej zelo velik pomen pri ugotovitvi kvalitete kablovoda. V našem primeru je tudi razvidno, da je faktor stabilnosti v kablu L3 precej slabši od ostalih dveh, kar pomeni, da moramo biti nanj bolj pozorni. Omenjeni faktor smo izračunali po spodnji enačbi.

$$SDTD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (TD_i - \overline{TD})^2}{N}}$$

Primer:

Preračunana vrednost standardnega odklona (stabilnostnega faktorja) pri napetosti $0,5 \cdot U_0$.

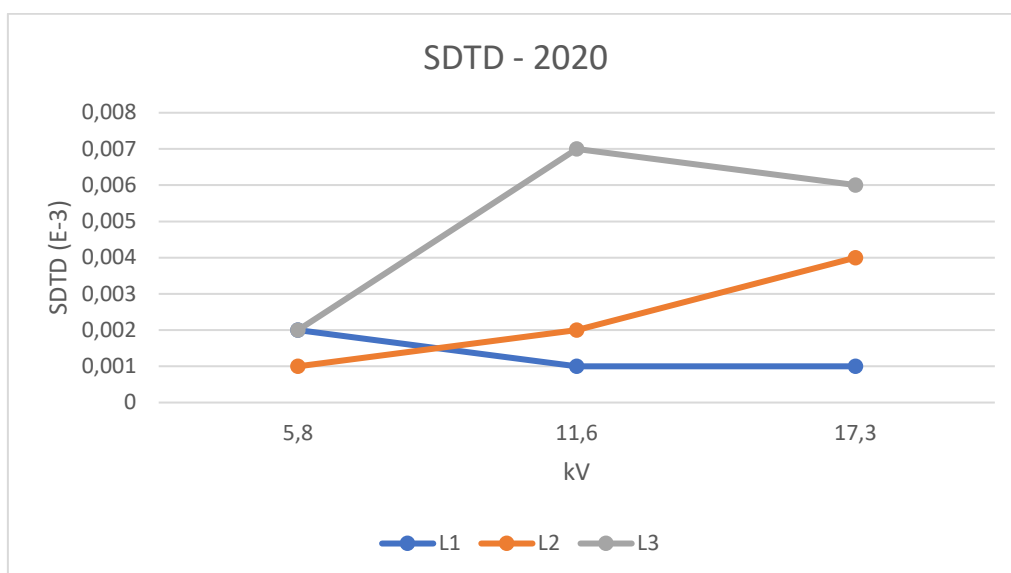
SDTD

$$\begin{aligned}
&= \sqrt{\frac{(TD_1 - \overline{TD})^2 + (TD_2 - \overline{TD})^2 + (TD_3 - \overline{TD})^2 + (TD_4 - \overline{TD})^2 + (TD_5 - \overline{TD})^2 + (TD_6 - \overline{TD})^2}{6}} \\
&= \sqrt{\frac{(0,374 - 0,374)^2 + (0,374 - 0,374)^2 + (0,373 - 0,374)^2 + (0,377 - 0,374)^2 + (0,372 - 0,374)^2 + (0,372 - 0,374)^2}{6}} \\
&= \sqrt{\frac{(-0,001)^2 + (0,003)^2 + (-0,002)^2 + (-0,002)^2}{6}} \\
&= \sqrt{\frac{0,000014}{6}} = \sqrt{0,000002333} = \mathbf{0,002}
\end{aligned}$$

Rezultati:

Napetostni nivo	SDTD		
	L1	L2	L3
$0,5 \cdot U_0$	0,002	0,001	0,002
$1 \cdot U_0$	0,001	0,002	0,007
$1,5 \cdot U_0$	0,001	0,004	0,006

Tabela 7: Preračunan standardni odklon meritev v letu 2020
(Lastni vir)



Slika 19: Grafični prikaz vrednosti standardnega odklona meritev v letu 2020
(Lastni vir)

7.4 Δ Tan-Delta leto 2020

Faktor Δ TD je podan kot razlika vrednosti TD med preizkusnimi napetostnimi nivoji. Z večanjem napetosti se je v našem primeru kot pričakovano povečevala tudi vrednost TD. Manjše kot so te razlike, boljše je stanje merjenca. Ponovno nam ta rezultat poda neke vrste podatek o stabilnosti merjenca. Pri oceni smo upoštevali razliko med napetostnima nivojema $1,5 \cdot U_0$ in $0,5 \cdot U_0$, ki jo navaja smernica GIZ TS-11. Ta razlika se izračuna po spodnji enačbi.

$$\Delta TD = MTD_{1,5U_0} - MTD_{0,5U_0}$$

Primer:

Izračunana razlika vrednosti MTD med napetostnima nivojema $1,5 \cdot U_0$ in $0,5 \cdot U_0$.

$$\Delta TD = 1,5 \cdot U_0 - 0,5 \cdot U_0 = 0,469 - 0,374 = \mathbf{0,095}$$

Rezultati:

Razlike MTD med napetostnimi nivoji	Δ TD		
	L1	L2	L3
$(0,5 \times U_0) - (1 \times U_0)$	-0,036	-0,178	-0,102
$(1 \times U_0) - (1,5 \times U_0)$	-0,059	-0,208	-0,155
$(1,5 \times U_0) - (0,5 \times U_0)$	0,095	0,385	0,257

Tabela 8: Izračunane razlike MTD med napetostnimi nivoji v letu 2020
(Lastni vir)

8 MERITVE 2024

Po štirih letih obratovanja kablovoda smo v letu 2024 opravili druge meritve, ki so nam kasneje v delu služile za izdelavo ocene statistične življenjske dobe kabla. Meritve so bile opravljene pri podobnih pogojih kot prve, vendar zaradi predhodnega obratovanja kabla ni bilo potrebe po napetostnem preizkusu, saj nam obratovalno stanje kablovoda pri nazivni napetosti in frekvenci služi kot potrditev, da je ta primeren za obratovanje. Rezultati izvedenih meritev TD v letu 2024 se nahajajo v nadaljevanju tega poglavja, ki mu sledi tudi primerjava rezultatov med leti 2020 in 2024 ter analiza.

8.1 Tan-Delta leto 2024

Zap. št.	TD pri $0,5 \cdot U_0$ (5,8kV)		
	L1	L2	L3
1	0,434	0,436	0,447
2	0,432	0,434	0,445
3	0,430	0,430	0,445
4	0,430	0,431	0,446
5	0,433	0,435	0,446
6	0,430	0,430	0,446

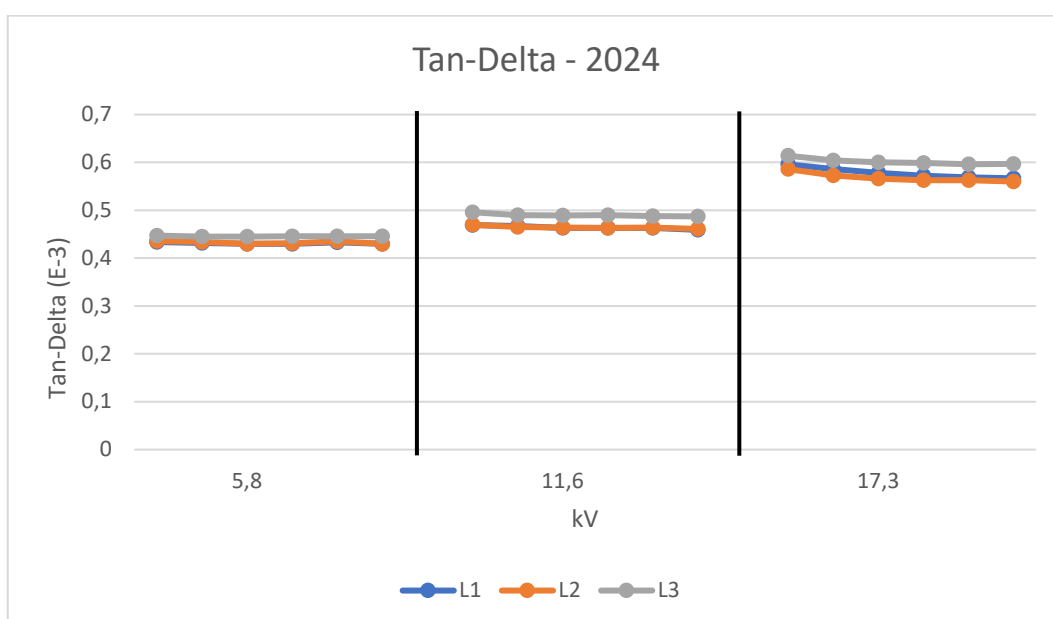
Tabela 9: Rezultati meritev TD pri $0,5 \cdot U_0$ v letu 2024
(Lastni vir)

Zap. št.	TD pri $1 \cdot U_0$ (11,6kV)		
	L1	L2	L3
1	0,469	0,470	0,496
2	0,467	0,465	0,490
3	0,463	0,464	0,489
4	0,463	0,463	0,490
5	0,463	0,464	0,488
6	0,459	0,461	0,487

Tabela 10: Rezultati meritev TD pri $1 \cdot U_0$ v letu 2024
(Lastni vir)

Zap. št.	TD pri $1,5 \cdot U_0$ (17,3kV)		
	L1	L2	L3
1	0,596	0,586	0,614
2	0,586	0,573	0,604
3	0,578	0,566	0,600
4	0,572	0,563	0,599
5	0,569	0,563	0,596
6	0,567	0,560	0,597

Tabela 11: Rezultati meritev TD pri $1,5 \cdot U_0$ v letu 2024
(Lastni vir)

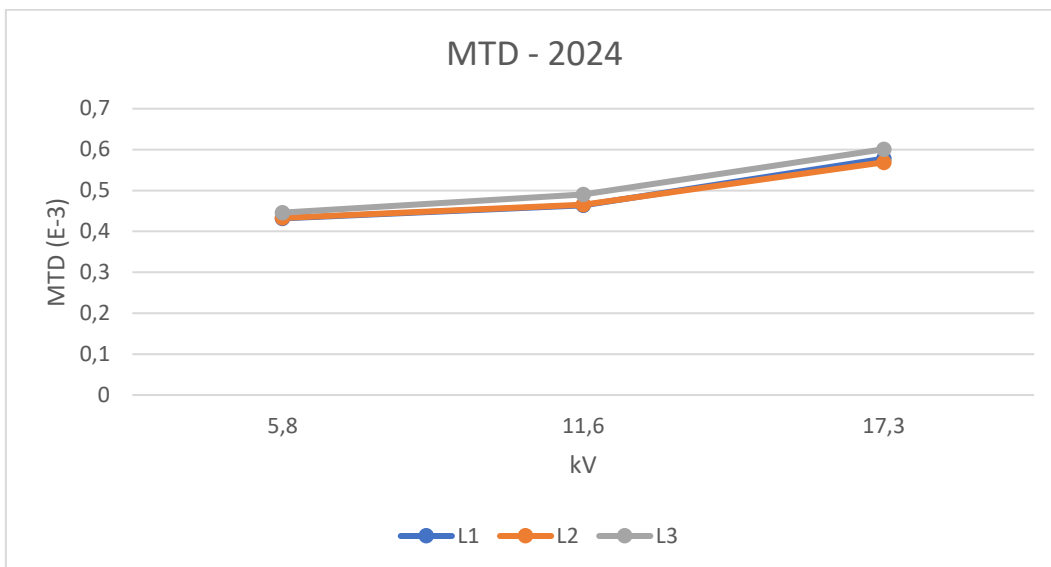


Slika 20: Grafični prikaz vrednosti Tan-Delta v letu 2024
(Lastni vir)

8.2 Mean Tan-Delta leto 2024

Napetostni nivo	MTD		
	L1	L2	L3
$0,5 \times U_0$	0,432	0,433	0,446
$1 \times U_0$	0,464	0,465	0,490
$1,5 \times U_0$	0,578	0,569	0,601

Tabela 12: Preračunane povprečne vrednosti TD v letu 2024
(Lastni vir)

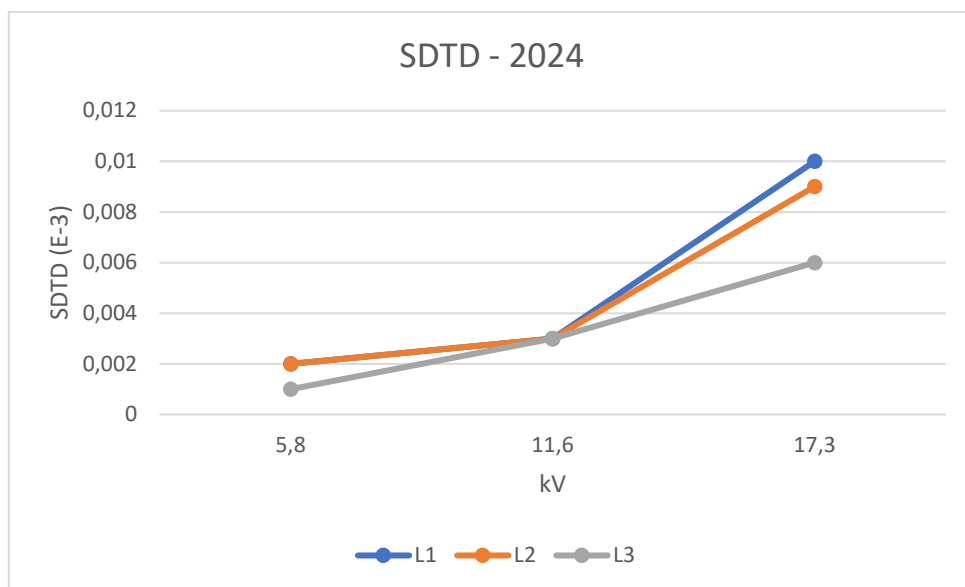


Slika 21: Grafični prikaz povprečnih vrednosti MTD v letu 2024 (Lastni vir)

8.3 Standardni odklon meritev Tan-Delta leto 2024

Napetostni nivo	SDTD		
	L1	L2	L3
$0,5 \times U_0$	0,002	0,002	0,001
$1 \times U_0$	0,003	0,003	0,003
$1,5 \times U_0$	0,010	0,009	0,006

Tabela 13: Preračunan standardni odklon meritev v letu 2024 (Lastni vir)



Slika 22: Grafični prikaz vrednosti standardnega odklona meritev v letu 2024 (Lastni vir)

8.4 Δ Tan-Delta leto 2024

Razlike MTD med napetostnimi nivoji	ΔTD		
	L1	L2	L3
$(0,5 \times U_0) - (1 \times U_0)$	-0,032	-0,032	-0,044
$(1 \times U_0) - (1,5 \times U_0)$	-0,114	-0,104	-0,111
$(1,5 \times U_0) - (0,5 \times U_0)$	0,147	0,136	0,156

Tabela 14: Izračunane razlike MTD med napetostnimi nivoji v letu 2024 (Lastni vir)

9 MEJNE VREDNOSTI IN PRIMERJAVE

V spodnjih dveh tabelah so iz smernice GIZ TS-11 izvlečene in podane vrednosti rezultatov s pripadajočimi ocenami stanj. V tabeli 15 so prikazane mejne vrednosti ob prvih meritvah, ki smo jih v nekaterih primerih tudi preseгли, kar pa nujno ne pomeni, da je kabel v slabšem oziroma kritičnem stanju, saj ima veliko vlogo pri rezultatih tudi dolžina kablovoda. V našem primeru smo za potrebe diplomskega dela izvedli meritve v krajši periodiki, kot bi to sicer bilo potrebno. V tabeli št. 16 so prikazane razlike oziroma dovoljena odstopanja vrednosti v primerjavi s predhodnimi meritvami. Druge meritve nam služijo za primerjavo, saj lahko vidimo spremembe lastnosti kablovoda po določeni dobi obratovanja, s čimer seveda tudi lažje ocenimo stanje kabla.

$\tan \delta \cdot 10^{-3}$	Ugotovitve – indikacija	Potrebne meritve	Ocena stanja
< 0,01	Stanje ustrezno, posamezna vodna drevesa	$\tan \delta$ PD	$\Delta \tan \delta$ nizek, gostota PD nizka
od 0,01 do 0,1	Prisotna vodna drevesa in PD, velika gostota PD	$\tan \delta$ PD	Zmerno staranje, ukrepi niso potrebni, zamenjava pribora pri veliki gostoti PD
od 0,01 do 0,5	Zmerna prisotnost vode	$\tan \delta$ PD	Preveriti celovitost zunanjega plašča, določiti lokacijo poškodbe plašča
> 0,5	Velika prisotnost vode	$\tan \delta$ PD	Preveriti celovitost zunanjega plašča, določiti lokacijo poškodbe plašča

*Tabela 15: Ukrepi glede na vrednost rezultatov
(Vir: Smernica GIZ TS-11, 2023)*

Ukrep	VLF-TDTS časovna stabilnost pri $1 \cdot U_0$		Δ VLF-DTD tan δ med $0,5 \cdot U_0$ in $2 \cdot U_0$		VLF-TD tan δ pri $1,5 \cdot U_0$
ni potreben	< 0,1	in	< 0,6	in	< 1,2
periodično preverjanje	0,1–0,5	ali	0,6–1,0	ali	1,2–2,0
popravilo	> 0,5	ali	> 1,0	ali	> 2,0

*Tabela 16: Odstopanje rezultatov glede na predhodne meritve
(Vir: Smernica GIZ TS-11, 2023)*

9.1 Obravnava rezultatov

V tabelah zgoraj so podane mejne vrednosti rezultatov meritev TD. Če vrednosti iz tabele 15 primerjamo z rezultati prvih meritev iz leta 2020, vidimo, da smo se meji, ki pomeni veliko prisotnost vlage v kablovodu, zelo približali oziroma jo tudi v nekaterih primerih presegli. V tej fazi je kot predlog podan ukrep, da se preveri celovitost zunanjšega plašča, katerega poškodba bi lahko bila vzrok za vdor vode v kabel, vendar smo ta razlog izključili, saj smo to že preverili z meritvami izolacije zunanjih plaščev. Razlog za pojav takšnih rezultatov meritev je lahko tudi napačno ravnanje s kablom v fazi skladiščenja in pri polaganju, kjer je možnost za vdor vode zaradi neizdelanih kablskih končnikov dosti večja.

Kljub povišanim vrednostim rezultatov meritev smo podali ugotovitev, da je kablovod primeren za obratovanje. Rezultati, ki smo jih pridobili ob prvih meritvah, nam bodo služili samo za primerjavo s periodičnimi meritvami, ki smo jih izvedli po štirih letih obratovanja kablovoda pri nazivni napetosti 20 kV. Pri pregledu rezultatov iz leta 2024 in ponovni primerjavi z mejnimi vrednostmi smo ugotovili, da je kabel še vedno primeren za obratovanje oziroma da se je njegovo stanje zaradi obratovanja v nekih primerih celo malo izboljšalo. Vzrok za to je, da se kabel zaradi prisotne napetosti in lastnosti obratovanja v notranjosti rahlo suši. Posledico tega pojava lahko opazimo tudi pri grafičnih prikazih rezultatov povprečnih vrednosti MTD iz leta 2020 in 2024 (sliki št. 18 in 21). Ugotovili smo, da so si rezultati meritev v letu 2024 med seboj bolj podobni in da so v primerjavi z rezultati iz leta 2020 precej bolj stabilni ob menjavah oziroma višanjih napetostnega nivoja med opravljanjem meritev.

Po navodilih smernice GIZ TS-11 torej primerjamo rezultate meritev iz leta 2020 in leta 2024, pri čemer razlika rezultatov ne sme presegati mej določenih v tabeli št. 16. V spodnji tabeli št. 17 imamo po navodilih izračunane razlike rezultatov in mejne vrednosti, iz česar lahko razberemo, da nobena razlika ne presega meje, ki bi določevala kakršen koli ukrep.

	SDTD razlike 2020-2024			Δ TD razlike 2020-2024	MTD razlike 2020-2024		
	$0,5 \cdot U_0$	$1 \cdot U_0$	$1,5 \cdot U_0$	$(1,5 - 0,5) \cdot U_0$	$0,5 \cdot U_0$	$1 \cdot U_0$	$1,5 \cdot U_0$
L1	0	0,002	0,009	0,052	0,058	0,054	0,1
L2	0,001	0,001	0,005	0,249	0,238	0,384	0,48
L3	0,001	0,004	0	0,101	0,103	0,161	0,205
Meja	< 0,1			< 0,6	< 1,2		

Tabela 17: Razlike v rezultatih meritev glede na predhodne meritve
(Lastni vir)

9.2 Ocena stanja in izračun statistične življenjske dobe kablovoda

V zgornjih poglavjih smo sedaj izvedli dvojne meritve in primerjavo z mejnimi vrednostmi, da smo si ustvarili približno sliko stanja merjenca. Po teh ugotovitvah smo prešli na korak, katerega rezultat je najpomembnejši za nas. To je izdelava statistične ocene življenjske dobe kablovoda, ki smo se je lotili po naslednjem postopku, ki vključuje tudi pomoč programske opreme, do katere sicer nimamo dostopa, smo pa s pomočjo podjetja BAUR GmbH in Belmet MI, d. o. o., pridobili vrednost faktorja staranja R , ki nam je omogočil nadaljnjo analizo. Za izračun sem uporabil samo en kabel sistema, in sicer tistega, ki je imel glede na podane vrednosti v tabeli 18 najslabši faktor staranja.

9.2.1 Faktor staranja R

Najprej moramo iz rezultatov meritev iz leta 2024 pridobiti faktor staranja kabla R , ki temelji na spodnji enačbi.

$$R = \sqrt{MTD_{norm}^2 + \Delta TD_{norm}^2 + TDSkirt_{norm}^2}$$

Pri tej enačbi smo naleteli na težavo, ki smo jo rešili s pomočjo programa. Ta enačba nam poda vrednost faktorja staranja R , ki ga sami ne moremo izračunati oziroma niti nimamo podatka o postopku za sam izračun. Faktor R se izračuna za vsak kabel posebej in je odvisen od rezultatov zadnjih opravljenih meritev TD, ki so bile v našem primeru opravljene leta 2024. Rezultati vseh treh faz obravnavanega sistema so navedeni v tabeli spodaj. Krepko označen rezultat, ki je najslabši, bomo uporabili v nadaljevanju izračuna.

Vodnik	Faktor staranja R
L1	0,064
L2	0,051
L3	0,057

Tabela 18: Faktor staranja
(Lastni vir)

9.2.2 Izračun statistične življenjske dobe kablovoda

Za izračun potrebujemo torej zadnje meritve, ki smo jih opravili v letu 2024 po štirih letih obratovanja kablovoda, na podlagi katerih smo pridobili faktor staranja R . Program nam je poleg tega faktorja podal tudi njegovo kritično vrednost CP . Kot točko, kjer se kabel začne starati, DSP pa smo v našem primeru podali kar začetek obratovanja.

Hitrost staranja kabla V_{R1} se lahko torej na podlagi faktorja R_1 iz leta 2024, obratovalne dobe kablovoda DP_1 in točke začetka staranja DSP izračuna po spodnji enačbi:

$$V_{R1} = \frac{R_1}{DP_1 - DSP} = \frac{0,064}{4 \text{ leta} - 0 \text{ let}} = \frac{0,064}{4} = \mathbf{0,016/leto}$$

Ko smo z izračuni pridobili hitrost staranja kablovoda, smo lahko na podlagi tega po naslednji enačbi izračunali njegovo preostalo življenjsko dobo RLT_1 .

$$RLT_1 = \frac{CP - R_1}{V_{R1}} = \frac{0,751 - 0,064}{0,016} = \frac{0,687}{0,016} = \mathbf{42,9 \text{ let}}$$

Preostali življenjski dobi kablovoda, ki po izračunu znaša 42,9 let, lahko prištejemo še leta obratovanja pred izvedenimi meritvami, kar nam poda oceno celotne obratovalne dobe kablovoda A_{CP1} oziroma čas, ki naj bi pretekel od začetka obratovanja kablovoda do nastanka okvare.

$$A_{CP1} = DP_1 + RLT_1 = 4 \text{ leta} + 42,9 \text{ leta} = \mathbf{46,9 \text{ let}}$$

V primeru, da bi bil kabel v obratovanju že dalj časa in bi v določeni periodi bile izvedene naslednje meritve, bi lahko na podlagi rezultatov naredili ponovno oceno stanja kabla po istem postopku, kot je naveden zgoraj.

10 UGOTOVITEV

Po vseh opravljenih meritvah in preizkusih lahko podamo končno ugotovitev stanja kablovoda. V skladu s smernicami smo pri prvih meritvah najprej izvedli napetostni preizkus plašča, ki nam je potrdil, da je zunanji plašč kabla nepoškodovan, kar pomeni, da vdor vode v trenutnem stanju kabla ni možen. Za tem smo opravili napetostni preizkus kablovoda, da smo se prepričali, ali je kabel primeren za obratovanje pri nazivni napetosti. Kot zadnje meritev v letu 2020 pa smo opravili še diagnostične meritve TD za ugotovitev stanja kabla, ki so bile glede na rezultate prav tako pozitivne.

Po štirih letih obratovanja smo ponovno izvedli meritve kablovoda in tako lahko primerjali rezultate prvih in drugih meritev. Po primerjavi smo ugotovili, da je stanje kablovoda še vedno v skladu s smernicami in ni potrebe po kakršnih koli popravilih ali drugih ukrepih. Ob tem smo imeli tudi možnost izdelave ocene življenjske dobe kabla, ki smo jo s pomočjo programske opreme in izračunov kar se da uspešno pripeljali do konca. Ugotovili smo, da naj bi kabel ob trenutnem stanju, če seveda izvzamemo morebitne mehanske poškodbe, brezhibno obratoval še približno 42,9 let, skupaj z že obstoječo obratovalno dobo pa bi to znašalo 46,9 let, kar pa je nekje v okvirju predvidene življenjske dobe teh vrst kablov.

Zaradi zagotavljanja nemotenega obratovanja kablovoda in preprečitve neželenih izpadov smo se glede na preostali čas obratovanja odločili, da bomo naslednje periodične meritve TD izvedli čez 10 let in naredili ponovno analizo rezultatov ter ocenili preostanek življenjske dobe kabla. Meritve bomo na tak način periodično ponavljali do bližine kritične točke, kjer bomo po potrebi iskali nove rešitve, predlagali rekonstrukcijo kablovoda ali pa del odseka, v kolikor bodo meritve in analize tako pokazale.

11 ZAKLJUČEK

V obravnavanem diplomskem delu je bil glavni namen ugotoviti in podati mnenje o stanju kablovoda za konkreten primer na področju delovanja podjetja Elektro Celje, d. d. Izvedba meritev in ugotovitev stanja je, kot že omenjeno, velikega gospodarskega pomena, saj se lahko s pravilnimi pristopi in analizo pripravi ustrezne ukrepe, preden se pojavijo težave. V primeru izpada kablovoda lahko pride do velike gospodarske škode v smislu izpada obratov, kar pomeni tudi izpad dohodka v gospodarstvu na splošno. Poleg tega se ob večjem številu teh pojavov na območju celotne distribucije precej poslabšata indeksa SAIFI in SAIDI, ki sta pomemben del delovanja distribucijskega podjetja.

V našem primeru smo ugotovili, da je kablovod v dobrem stanju in ne pričakujemo okvar do izvedbe naslednjih meritev, razen v primeru mehanskih poškodb, ki so najbolj pogoste ob izvajanju gradbenih del in na njih nimamo vpliva. Prišli smo torej do točke, ki nam poleg ugotovitve trenutnega stanja služi tudi kot odlično izhodišče za vse nadaljnje primerjave. Z ugotovitvijo stanja kablovoda smo zagotovili nemoteno obratovanje dela distribucijskega sistema, pri čemer smo seveda izvzeli vse vrste poškodb zaradi zunanjih vplivov. Po primerjavi, oceni in ugotovitvi stanja smo prišli do zaključka, da je kablovod v dobrem stanju, na podlagi česar smo se odločili za izvedbo obdobjnih meritev čez približno 10 let. Po opravljenih meritvah bomo nadaljevali z nadzorovanjem kabla, pri čemer se bo obdobje meritev krajšalo do kritične točke, pri kateri se bodo izvajali nadaljnji ukrepi. Na enak način se izvajajo meritve in primerjave tudi za druge kablovode.

Izvedba kableske diagnostike se torej pretežno nanaša na novo zgrajene kablovode, za katere bo možno na osnovi periodičnih meritev predvideti potrebo po preventivni zamenjavi odsekov ali celotnih kablovodov, iz česar bomo lahko izhajali tudi z dodatnimi analizami in izračuni v smislu dejanske ekonomične upravičenosti laboratorija. Sedaj o tem zaradi relativno kratke dobe izvajanja meritev še ne moremo govoriti, kasneje pa bodo te analize zelo koristne za nabavno službo, saj se bo ta lažje prilagajala razmeram na trgu, čez čas pa bo možno tudi primerjati izboljšave kazalnikov SAIFI in SAIDI, saj naj bi se ta zaradi preventivnih ukrepov v smislu nepredvidenih izpadov občutno izboljšala.

12 VIRI IN LITERATURA

Diagnostic Handbook/Theoretical background and practical application. (2019).

Sulz: BAUR GmbH

Navodilo za uporabo kablanskega mobilnega laboratorija BAUR titron®. (2018). Sulz:

BAUR GmbH.

Statex report. (2024). Sulz: BAUR, GmbH.

Statex. (2021). Sulz: BAUR, GmbH

Electrical Sphere. (2024). *What is Tan delta cable testing.* Pridobljeno 10.11.2024 z naslova <https://electricalsphere.com/what-is-tan-delta-cable-testing/>

Elektro Celje, d.d. (b.l.). *Distribucijsko omrežje.* Pridobljeno 2.10.2024 z naslova <https://www.elektro-celje.si>

Gospodarsko interesno združenje distribucije električne energije. (2023). *Smernice in navodila za izbiro, polaganje in prevzem elektroenergetskih kablov nazivne napetosti 1 kV do 110 kV.* Pridobljeno 1.10.2024 z naslova <https://www.giz-dee.si/TIPIZACIJA>

High Voltage Inc. (b.l.). *Overview & Answers to Frequently Asked Questions.*

Pridobljeno 7.10.2024 z naslova <https://hvinc.com/wp-content/uploads/2019/11/HVI-TD-FAQ-WEB-2019.pdf>

HV Diagnostics Inc. (b.l.). *Tan Delta diagnostics Information.* Pridobljeno 7.10.2024 z naslova <https://www.hvdiagnostics.com/tan-delta-diagnostics-info>

HV Tehnologies Inc. (2018). *VLF Tan Delta Test Equipment.* Pridobljeno 10.11.2024 z naslova <https://www.hvtechnologies.com/vlf-tan-delta-testing/>

Jenny M., Grestner A., Daniels T.A. (2018), *VLF-MWT- how to apply the new way of cable condition assessment.* Pridobljeno 12.11.2024 z naslova https://hvtechnologies.com/wp-content/uploads/2018/06/VLF-MWT-Booklet-w_frida.pdf

Testa Cables Ltd. (b.l.). *Single-Core XLPE Insulated Cable with PE Outer Sheath, longitudinally watertight.* Pridobljeno 3.11.2024 z naslova <https://www.teslacables.com/en/product/258>