



B&B
VIŠJA STROKOVNA ŠOLA

Diplomsko delo višješolskega strokovnega študija
Program: Elektroenergetika
Modul: Zaščita in učinkovitost

**TEHNIČNA ANALIZA PRIMERA
NADOMEŠČANJA BAKRENIH KABLOV Z
ALUMINIJASTIMI V
SREDNJENAPETOSTNEM OMREŽJU**

Mentor: dr. Viktor Lovrenčič, univ. dipl. inž. el.
Lektorica: Nina Balažek, mag. angl. in mag. prof. slov.

Kandidat: David Urankar

Kamnik, julij 2025

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem mentorju, dr. Viktorju Lovrenčiču, univ. dipl. inž. el., za strokovno usmerjanje, dragocene nasvete, ažurnost in napotke pri izdelavi diplomskega dela.

Zahvaljujem se sodelavcem iz podjetja Elektro Ljubljana, d. d., ki so mi z nasveti, izmenjavo praktičnih izkušenj in strokovno podporo pomagali pri pripravi diplomskega dela.

Hvaležen sem tudi Elektroinštitutu Milan Vidmar, ki mi je omogočil prisotnost pri izvajanju laboratorijskih meritev. Neposreden vpogled v potek preizkušanja je pomembno dopolnil moje strokovno razumevanje in prispeval h kakovostnejši vsebini diplomskega dela.

Hvala lektorici Nini Balažek, mag. angl. in mag. prof. slov., ki je moje diplomsko delo jezikovno in slovnično pregledala.

Posebej hvaležen sem svoji družini – ženi Manci, sinu Lovru in hčerki Viti za vso podporo, potrpežljivost in spodbudo. Hvala, ker ste mi stali ob strani, me bodrili in verjeli vame.

IZJAVA

Študent David Urankar izjavljam, da sem avtor tega diplomskega dela, ki sem ga napisal pod mentorstvom dr. Viktorja Lovrenčiča, 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

Diplomsko delo se osredotoča na vprašanje, ali je v distribucijskem omrežju smiselno in zanesljivo nadomestiti uveljavljeni srednjenapetostni bakreni kabel preseka 240 mm² z aluminijastim kablom večjega preseka 400 mm². V okviru dela je bila izvedena tehnična in ekonomska analiza, ki je temeljila na primerjavi uradnih tehničnih podatkov in na rezultatih konkretne poskusne vgradnje v omrežju Elektro Ljubljana.

Tehnična presoja je vključevala analizo električnih, mehanskih in konstrukcijskih lastnosti obeh kablov. Uporabljeni so bili tehnični listi proizvajalcev, veljavne tehnične smernice, standardi in laboratorijske meritve, opravljene na Elektroinštitutu Milan Vidmar. Rezultati kažejo, da aluminijasti kabel ob ustreznem dimenzioniranju dosega povsem primerljive tehnične zmogljivosti kot bakreni. Laboratorijski preizkusi so celo pokazali nekoliko boljše vrednosti pri nekaterih parametrih, kar dodatno potrjuje njegovo primernost nadomestitve.

Poseben poudarek je namenjen praktičnim izkušnjam iz izvedene poskusne gradnje na lokaciji med dvema transformatorskima postajama na območju Brda v Ljubljani, kjer je bil vgrajen aluminijasti kabel preseka 400 mm². Ugotovitve kažejo, da je aluminijasti kabel tehnično ustrezen rešitev, ko so trase ravne, elektro kabelska kanalizacija pravilno zasnovana in ko so zagotovljeni ustrezni pogoji za montažo.

Ekonomski del pričujočega dela obravnava primerjavo gibanja cen bakra in aluminija na svetovni borzi ter vpliv materialnih stroškov, montaže in dolgoročnega obratovanja na skupno investicijsko upravičenost. Analiza potrjuje, da se razlika v nabavni ceni aluminijastega in bakrenega kabla najbolj občuti pri daljših trasah, kar omogoča večje investicijske prihranke in s tem možnost hitrejše obnove distribucijskega omrežja.

Celovita analiza potrjuje, da je aluminijasta izvedba kablov enakovredna zamenjava bakrenim, ko so izpolnjeni določeni tehnični pogoji. Končna odločitev mora vedno temeljiti na realnih značilnostih posamezne trase in strokovni tehnično-ekonomski presoji.

KLJUČNE BESEDE

- srednjenapetostni kabel (SN)
- elektro kabelska kanalizacija (EKK)
- aluminijasti vodnik
- tehnično-ekonomska analiza
- laboratorijski preizkus

SUMMARY

This thesis focuses on the question of whether it is reasonable and reliable to replace the established 240 mm² medium-voltage copper cable with a larger 400 mm² aluminium cable in a distribution network. A technical and economic analysis was carried out as part of the thesis, based on a comparison of official technical data and the results of a pilot installation conducted within the Elektro Ljubljana network.

The technical assessment included an analysis of the electrical, mechanical and structural characteristics of both cables. The evaluation was based on manufacturer data sheets, applicable technical guidelines, standards, and laboratory tests performed at the Milan Vidmar Electrical Engineering Institute. The results show that, with appropriate dimensioning, the aluminium cable achieves technical performance comparable to the copper cable. In fact, laboratory tests showed slightly better values in certain parameters, further confirming its suitability as a replacement.

Special attention was given to the practical experience gained during the pilot installation between two transformer substations in the Brdo area of Ljubljana, where a 400 mm² aluminium cable was installed. The findings indicate that the aluminium cable is a technically viable solution when cable routes are straight, the cable duct system is properly designed, and suitable conditions for installation are ensured.

The economic part of the thesis addresses the price trends of copper and aluminium on the global market and examines the impact of material costs, installation work, and long-term operation on overall investment viability. The analysis confirms that the price difference between aluminium and copper cables becomes most significant on longer routes, which allows for greater investment savings and, consequently, faster network refurbishment.

The overall analysis confirms that aluminium cable systems can be a fully valid alternative to copper, provided that certain technical conditions are met. The final decision must always be based on the specific characteristics of each installation route and a thorough technical and economic assessment.

KEYWORDS

- medium - voltage cable (MV)
- electrical cable duct system
- aluminium conductor
- technical and economic analysis
- laboratory testing

KAZALO

1	UVOD.....	1
1.1	Predstavitev problema.....	1
1.2	Cilji naloge	1
1.3	Predstavitev okolja	2
1.4	Predpostavke in omejitve	3
1.5	Metode dela	3
2	SREDNJENAPETOSTNI KABLI	5
2.1	Zgodovina	5
2.2	Predpisi in standardi za SN kable	6
2.2.1	SIST HD 620 S3:2023	6
2.2.2	SIST EN IEC 60228:2024 (2005)	7
2.2.3	SIST EN 60332-1-2	7
2.3	Enožilni SN energetske kabli	8
2.3.1	Označevanje SN kablov	8
2.3.2	Konstrukcija SN kablov	9
2.3.3	Transport	13
2.3.4	Prevzem in preizkušanje	14
3	ELEKTRO KABELSKA KANALIZACIJA	15
3.1	Cevni sistemi in materiali	15
3.2	Kabelski jaški	18
3.3	Polaganje kablov v EKK	19
3.3.1	Vlečna sila	22
3.3.2	Radius krivljenja	23
3.3.3	Vplivi na okolje in prostorski vidik	23
3.3.4	Varnost in zdravje pri delu	24
4	TEHNIČNE LASTNOSTI PRIMERJANIH KABLOV	26
4.1	Električne lastnosti	26
4.1.1	Električna upornost vodnika	26
4.1.2	Tokovna zmogljivost	27
4.1.3	Kapacitivnost in faktor dielektričnih izgub tan δ	28
4.2	Mehanske in geometrijske lastnosti	29
4.2.1	Radius krivljenja	30
4.2.2	Vlečna sila	31
4.3	Termične lastnosti	33
4.4	Konstrukcijske razlike in vpliv na delovanje	34
4.5	Praktična ocena uporabe kabla NA2XS(FL)2Y 1x400/35 RM	34
4.6	Sklepna ugotovitev	37
5	LABORATORIJSKI PREIZKUS KABLA NA2XS(FL)2Y 1X400/35 RM	39
5.1	Meritev specifične upornosti vodnika in ekrana	39
5.2	Meritev izolacijskih lastnosti: izolacijska upornost, kapacitivnost in dielektrične izgube	40

5.3	Napetostni preizkus glavne izolacije.....	43
5.4	Meritve delnih razelektrenj glavne izolacije.....	44
5.5	Termični preizkusi XLPE izolacije in zunanjega HDPE plašča	45
5.6	Sklepna ocena rezultatov meritev	48
6	EKONOMSKA ANALIZA.....	49
6.1	Gibanje in struktura cen bakra in aluminija na svetovnem trgu.....	49
6.2	Stroški polaganja in vpliv na izvedbo projekta	50
6.3	Obratovalni stroški in dolgoročna učinkovitost	51
7	ZAKLJUČEK	54
8	LITERATURA IN VIRI.....	55
	PRILOGE	57

KAZALO SLIK

Slika 1: Izgled in sestava SN kabla IPO 13.....	5
Slika 2: Oznaka SN kabla	9
Slika 3: Izgled in sestava enožilnega SN kabla tipa NAXS(F(L))2Y.....	11
Slika 4: Primer transporta kabla.....	13
Slika 5: Primer skladiščenja kabla.....	13
Slika 6: Prečni prerez EKK z elektroenergetskimi kabli	16
Slika 7: Primer vzporednega poteka elektroenergetskih kablov in vodovoda	17
Slika 8: Značilnosti dimenzij jaškov po številu cevi, pokrovov in funkciji.....	19
Slika 9: Priprava na polaganje SN KB.....	20
Slika 10: Vlečna naprava Bagela KW4000 za strojno polaganje kablov.....	21
Slika 11: Prikaz nadzora nad vlečno silo pri strojnem polaganju SN KB	23
Slika 12: Vleka SN kabla preko uvodnice v kabelskem jašku	33
Slika 13: Načrt predvidenega stanja prvega dela trase novega kablovoda	35
Slika 14: Namestitev vlečne nogavice na SN kabel NA2XS(FL)2Y 1x400/35 RM... 36	
Slika 15: Priklop NA2XS(FL)2Y 1x400/35 RM v SN postroj in izvedba meritev.....	37
Slika 16: Izvedba izolacijskih meritev na EIMV	41
Slika 17: Merjenje tanδ na EIMV	43
Slika 18: Časovni potek napetostnega preizkusa glavne izolacije na kablu NA2XS(FL)2Y 1x400/35 RM.....	44
Slika 19: Izvedba meritev delnih razelektrenj glavne izolacije na EIMV.....	45
Slika 20: Naprava za pripravo vzorcev za izvedbo nateznih preizkusov.....	46
Slika 21: Izvedba nateznega preizkusa XLPE izolacije.....	47
Slika 22: Odčitavanje raztezka XLPE izolacije.....	47
Slika 23: Povprečna cena bakra in aluminija v zadnjem letu	50

KAZALO TABEL

Tabela 1: Vrednost vzdržnih napetosti za izvajanje električnega preizkusa kablov .	14
Tabela 2: Upornost vodnika pri 20 °C	27
Tabela 3: Tokovne obremenitve primerjanih SN kablov	28
Tabela 4: Kapacitivnost primerjanih SN kablov.....	28
Tabela 5: Pregled mehanskih in geometrijskih lastnosti primerjanih SN kablov	29
Tabela 6: Izračun radija krivljenja po EIC 60502-2	30
Tabela 7: Izračun vlečne sile za SN KB N2XS(FL)2Y 1X240/25 RM.....	31
Tabela 8: Izračun vlečne sile za SN KB NA2XS(FL)2Y 1X400/35 RM	32
Tabela 9: Specifična upornost vodnika in ekrana	40
Tabela 10: Meritve upornosti glavne izolacije	41
Tabela 11: Rezultati meritev faktorja dielektričnih izgub tanδ in kapacitivnost na bakrenem kablu N2XS(FL)2Y 1x240/25 RM	42
Tabela 12: Rezultati meritev faktorja dielektričnih izgub tanδ in kapacitivnost na aluminijastem kablu NA2XS(FL)2Y 1x400/35 RM	42

POJMOVNIK

ELES: Sistemski operater prenosnega električnega omrežja v Sloveniji, ki upravlja prenosno omrežje v Sloveniji v državni lasti (400 kV, 220 kV in 110 kV daljnovodi).

EKK: Elektro kabelska kanalizacija je enostaven ali manj zahteven objekt, ki predstavlja sistem cevi in pripadajočih kabelskih jaškov vkopanih v zemljo, ki so namenjeni mehanski zaščiti položenih kablov.

TP: Transformatorska postaja je objekt, prostor ali steber, kjer imamo vgrajen en ali več transformatorjev s pripadajočo opremo, njihova naloga je namenjena transformaciji srednje napetosti (SN) na nizko napetost (NN) in napajanju odjemalcev z električno energijo.

KABLOVOD: Je celoten sistem, ki vključuje enega ali več kablov skupaj z načinom njihovega polaganja, zaščite, podpornimi strukturami in pripadajočimi elementi (npr. kabelska kanalizacija, jaški, cevovodi, kabelske police, objemke, spojke, zaključki).

IPO: Izoliran podzemni oljni kabel je vrsta srednjenapetostnega kabla, ki ima izolacijo iz papirja in impregnirano z oljem.

XLPE: Omrežni polietilen (angl. *Cross – Linked Polyethylene*) je sodoben izolacijski material v srednje in visoko napetostnih kablilih z visoko toplotno, mehansko in dielektrično odpornostjo.

EKSTRUZIJA: Industrijski postopek, pri katerem se material pod pritiskom in segrevanjem stisne skozi šobo in se nanese na vodnik.

HDPE: Polietilen visoke gostote (angl. *High – Density Polyethelene*) se uporablja za zunanji plašč SN kablov in ker ima visoko mehansko in kemično odpornost, je slabo gorljiv in dimenzijsko stabilen.

LME: London Metal Exchange je vodilna svetovna borza za trgovanje z industrijskimi kovinami.

KRATICE IN AKRONIMI

VN:	visoka napetost (od 110 kV do 400 kV)
SN:	srednja napetost (od 1 kV do 35 kV)
NN:	nizka napetost (do 1 kV)
Al:	aluminij
Cu:	baker
I:	tok
U:	medfazna napetost med vodniki
U_0 :	napetost med vodnikom in ozemljenim za zaslonom/ekranom
U_m :	najvišja dovoljena sistemska napetost
R:	upornost
C:	kapacitivnost
f:	frekvenca
EIMV:	Elektroinštitut Milan Vidmar
GIZ:	Gospodarsko interesno združenje distribucije električne energije

EZ:	Energetski zakon
ZOEE:	Zakon o oskrbi z električno energijo
NEPN:	Nacionalni energetski in podnebni načrt
XLPE:	zamreženi polietilen
EPR:	etilen-propilen
RTP:	razdelilna transformatorska postaja
VZD:	varnost in zdravje pri delu
OVO:	osebna varovalna oprema
PD:	delna razelektrenja (angl. <i>Partial Discharge</i>)
lpd.:	in podobno
Npr.:	na primer

1 UVOD

1.1 Predstavitev problema

V elektrodistribucijskih podjetjih se v zadnjem času soočamo z velikimi investicijami v posodobitev omrežja, kar nas je pripeljalo v iskanje stroškovno učinkovitih rešitev pri gradnji srednjenapetostnih (SN) kablovodov, pri čemer se vse pogosteje postavlja vprašanje smiselnosti zamenjave bakrenih vodnikov z aluminijastimi. Cena bakra in povečana potreba po investicijskih stroških močno vplivata na izbiro materiala kablovodov.

V diplomskem delu je obravnavan konkreten primer nadomestitve bakrenega kabla N2XS(FL)2Y 1x240/25 RM 12/20 (24 kV) z aluminijastim kablom NA2XS(FL)2Y 1x400/35 RM 12/20 (24 kV). Zamenjava materiala vodnika ima vpliv na številne parametre, in sicer od električnih zmogljivosti in mehanskih lastnosti do polaganja kablovoda, dolgoročnega upravljanja in njegovega vzdrževanja.

Ugotavljamo, da so za odločitev o nadomestitvi ključne tehnične in ekonomske analize, ki morajo upoštevati prevodnost materiala in dimenzije, prav tako pa tudi vpliv na polaganje, spojke, preizkuse, mehansko odpornost in stroške montaže. Upoštevajo se tudi praktični vidik, kot so primernost elektro kabelske kanalizacije (EKK), zasedenost kabelskih jaškov, razpoložljiv prostor, radij krivljenja in varnost pri delu.

Z uporabo konkretnih podatkov, laboratorijskih preizkusov in analitičnih izračunov želimo preveriti, v katerih primerih je uporaba aluminijastih kablov tehnično ustrezna in ekonomsko upravičena.

1.2 Cilji naloge

Cilj naloge je ovrednotiti tehnične in ekonomske vplive zamenjave bakrenih vodnikov z aluminijastimi pri gradnji srednjenapetostnih kablovodov v distribucijskem omrežju. Na podlagi konkretnega primera kabla želimo predstaviti strokovno analizo, ki bo podprta z dejanskimi podatki in rezultati meritev.

S tem namenom naloga sledi konkretnim ciljem:

- ovrednotiti tehnične značilnosti obeh vodnikov (električne, mehanske montažne);
- oceniti vpliv materiala vodnika na izvedbo kablovoda (transport, polaganje);
- podati primerjalno analizo stroškov izvedbe;
- oblikovati priporočila za izbiro ustreznega vodnika v distribucijski praksi;

- pripraviti povzetek izsledkov meritev (napetostni preizkus, izolacijske upornosti, kapacitivnosti, delnih razelektrenj glavne izolacije ipd.);
- predlagati smernice za odločanje v primerih, kjer je izbira med aluminijem in bakrom odprta.

Na ta način želimo prispevati k racionalnemu odločanju pri načrtovanju in izvedbi srednjenapetostnih kablovodov ter ponuditi podlago za morebitno širšo uporabo aluminijastih vodnikov večjega preseka v slovenskem distribucijskem omrežju.

1.3 Predstavitev okolja

Diplomsko delo umeščamo v okolje podjetja Elektro Ljubljana, d. d., ki upravlja največje elektrodistribucijsko omrežje v Sloveniji. Njegovo območje delovanja zajema več kot 30 % celotne površine države, natančneje 6.166 km², kar omogoča oskrbo z električno energijo za več kot 356.000 odjemalcev. Leta 2024 je podjetje distribuiralo 3.910.474 MWh električne energije, kar predstavlja 37,4 % vse energije, ki so jo v istem letu razdelila vsa slovenska elektrodistribucijska podjetja.

Elektro Ljubljana, d. d., je delniška družba, katere osnovni kapital presega 243 milijonov evrov, razdeljenih na več kot 39 milijonov delnic. Večinski lastnik je Republika Slovenija z deležem 79,5 %, medtem ko pet največjih delničarjev skupaj obvladuje več kot 89 % kapitala. Sedež podjetja je v Ljubljani, kjer se izvajajo osrednje upravne in tehnične naloge, poleg tega pa so operativne enote, organizirane še v petih regijah, in sicer Kočevje, Ljubljana mesto, Ljubljana okolica, Novo mesto in Trbovlje. Podjetje je organizirano v skladu s pravilnikom o notranji organizaciji, ki zagotavlja učinkovito izvajanje dejavnosti preko specializiranih služb in operativnih enot. Družbo vodi uprava, pod katero delujejo službe za tehnološki razvoj, komuniciranje in notranjo revizijo, medtem ko operativne naloge izvajajo organizacijske enote s področij obratovanja, storitev, informacijskih tehnologij, računovodstva in skupnih podpornih funkcij.

Elektro Ljubljana je lastnik celotne elektrodistribucijske infrastrukture na svojem območju, ki jo v skladu s pogodbo oddaja v uporabo nacionalnemu operaterju ELES, d. o. o., skladno z veljavno zakonodajo. Poleg tega družba izvaja vrsto podpornih in tehničnih nalog, od vodenja in obratovanja omrežja, izvajanje meritev, izgradnje in vzdrževanja do načrtovanja razvoja in spremljanja kakovosti oskrbe.

Na področju reguliranih dejavnosti družba deluje v skladu z določili Energetskega zakona (EZ-2), Zakona o oskrbi z električno energijo (ZOOE) in Nacionalnim energetskega podnebnim načrtom (NEPN). Poleg teh nalog Elektro Ljubljana razvija storitve na trgu, kot so projektiranje elektroenergetskih objektov, gradnje, vzdrževanje

in upravljanje z mrežo javnih polnilnic za električna vozila, kar jo umešča med tehnološko sodobna energetska podjetja v Sloveniji.

1.4 Predpostavke in omejitve

Pri zamenjavi bakrenih kablov z aluminijastimi predpostavljamo, da so tehnični podatki kablov ustrezno primerljivi in potrjeni s strani proizvajalcev. Za omenjenimi podatki stoji strokovna in neodvisna institucija, ki pregleda, preizkusi in izda uradno poročilo o preizkusu kabla. Vsi preizkusi so izvedeni v skladu s predpisanimi metodami in standardi.

Predpostavljamo, da je zamenjava kablov tehnično izvedljiva in ekonomsko upravičena, kadar so izpolnjeni pogoji ustreznega dimenzioniranja, kakovostne montaže in pravilnega rokovanja pri vgradnji. Izhajamo tudi iz izkušenj, distribucijskih podjetij, kjer so že bile izvedene posamezne rešitve z aluminijastimi kabli, predvsem na območju z lažjim dostopom in manj zahtevnimi mehanskimi pogoji.

Pri polaganju kablovodov se morajo elektro distributerji držati tipizacije ELES, katere namen je poenotiti bistvene zahteve za načrtovanje, projektiranje, gradnjo in vzdrževanje kablovodov. V aktualni tipizaciji srečamo samo kable do preseka 240 mm², zato je treba pri večjih presekih proučiti specifične rešitve (večji presek, debelina izolacije, večji radij krivljenja ipd.), da se lahko odstopa od tipizacije. Vse te rešitve moramo tehnično utemeljiti.

V diplomskem delu smo se osredotočili na tehnično analizo kablov za sredjenapetostno raven 12/20 (24) kV. Ekonomski del analize ni detajlno razdelan, saj je pridobitev nabavnih in prodajnih cen kablov pri dobaviteljih težko dostopna zaradi konkurence med njimi in bi javno razkritje podatkov lahko vplivalo na njihovo poslovanje. Pri ekonomski analizi smo si pomagali s tržno ceno materialov in standardnimi ceniki izvedenih del, kar nam je dalo razmerje cene investicije med posameznima vrstama kablov.

1.5 Metode dela

Diplomsko delo temelji na kombinaciji teoretičnih in praktičnih pristopov, pri čemer so uporabljene različne raziskovalne metode, prilagojene ciljem dela in vsebini obravnavanega problema.

V teoretičnem delu sta uporabljena opisna metoda, s katero predstavljamo trenutno stanje na področju uporabe aluminijastih in bakrenih vodnikov v SN omrežju in metoda združevanja, saj so povzeti podatki iz standardov, strokovne literature, člankov in dokumentacije elektroenergetskih podjetij.

V raziskovalnem delu je uporabljena analitična metoda, s katero je izvedena primerjave tehničnih lastnosti obeh vrst vodnikov. Izvedeni so bili tehnični izračuni električne prevodnosti, napetostnega padca, tokovne zmogljivosti, radijev krivljenja in dovoljenih vlečnih sil.

Poseben poudarek je bil namenjen praktičnemu sodelovanju z Elektroinštitutom Milan Vidmar (EIMV), kjer so bili na vzorcih SN kablov izvedeni tehnični in mehanski preizkusi.

Za ekonomsko primerjavo so bili uporabljeni aktualni ceniki surovin in standardne priporočene cene kablov. Pregledana je bila tipizacija ELES, standardi za kablovode in analizirana projektna dokumentacija podjetja Elektro Ljubljana.

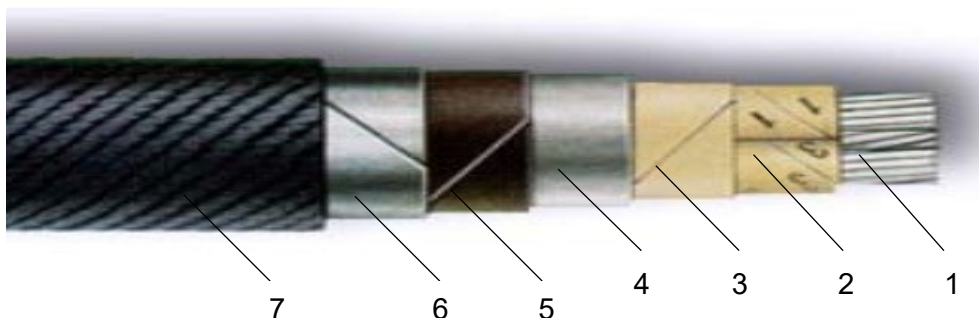
Izbira metod nam je omogočila celovito oceno smiselnosti uporabe aluminijastih in bakrenih vodnikov v praksi, in sicer z vidika tehničnih lastnosti, stroškov in učinkovitosti.

2 SREDNJENAPETOSTNI KABLI

2.1 Zgodovina

V elektrodistribucijskih omrežjih se je skozi desetletja razvijala tehnologija SN kablov, ki so pomembno vplivali na zanesljivost in varnost prenosa električne energije. V nadaljevanju je predstavljen zgodovinski pregled razvoja od starejši izoliranih podzemnih oljnih kablov tipa IPO 13 in IPO 14 do sodobnih XHE polietilenskih kablov z XLPE izolacijo.

Prve množične uporabljene izvedbe so torej predstavljali kabli IPO 13 in IPO 14. Gre za izolirane podzemne oljne kable, kjer številka pomeni nazivno napetost (na primer IPO 13 – 13 kV). Ti kabli so poleg aluminijastega ali bakrenega vodnika vsebovali še papirnato izolacijo, impregnacijo z normalnim kompavndnim oljem, brezšiven svinčen ovoj, jekleni oklep in zunanjo protikorozijsko zaščito iz vlaken, ki je impregnirana z bitumensko zmesjo. Kompavndno olje je posebna mešanica mineralnih olj, ki se uporablja za impregnacijo papirne izolacije v energetskih kabljih in služi kot dielektrični medij, ki preprečuje prodiranje vlage, zmanjšuje pojav praznih in delnih praznitev in izboljšuje toplotno in električno stabilnost papirne izolacije. Ti kabli so robustni, vendar zaradi papirne izolacije in olja občutljivi na poškodbe, in težavni za sodobno kabelsko diagnostiko.



*Slika 1: Izgled in sestava SN kabla IPO 13
(Vir: Holding Kablovi a. d., 2025)*

1. *Vodnik: poln aluminij sektorske oblike*
2. *Izolacija: naviti papirnati trakovi*
3. *Polnilo: naviti papirnati trakovi, impregnirani z normalnim kompavndnim oljem*
4. *Plašč: brezšivna svinčena cev*
5. *Notranja zaščita: impregniran papir ali impregnirana juta z bitumenskim premazom*
6. *Mehanska zaščita: dva jeklena trakova*
7. *Zunanji plašč: protikorozijska zaščita iz vlaken, impregnirana z bitumensko zmesjo*

Z napredkom proizvodnje in potrebami po bolj zanesljivih rešitvah se je pojavila nova generacija kablov, označenih kot XHE, ki za razliko od oljnih kablov za izolacijo uporabljajo zamreženi polietilen (XLPE). XLPE je posebna oblika polietilena, kjer so molekule med seboj kemijsko in fizikalno zamrežene. To pomeni, da so med verige dodane navzkrižne povezave, ki ustvarjajo tridimenzionalno mrežo.

Prednosti uporabe XLPE v SN kablovodih:

- odlične električne lastnosti – visoka dielektrična trdnost,
- toplotna odpornost,
- odpornost proti vlagi,
- mehanska odpornost in fleksibilnost,
- okolju prijazen (ne vsebuje olja in svinca),
- združljiv s sodobnimi diagnostičnimi metodami,
- dolga življenjska doba,
- ekonomske prednosti.

Zaradi teh prednosti XLPE kable postopoma in sistematično nadomeščajo zastarele IPO kable, pri čemer omogočajo zanesljivejše, varnejše in trajnostno naravnane elektroenergetske rešitve prihodnosti.

2.2 Predpisi in standardi za SN kable

Pri projektiranju, izbiri in vgradnji SN energetske kablov je ključno upoštevanje veljavnih predpisov, standardov in tehničnih smernic, ki zagotavljajo varno in zanesljivo obratovanje kablovodov. V Republiki Sloveniji področje urejajo nacionalni zakoni, kot so Gradbeni zakon (GZ-1), Energetski zakon (EZ-2) in Zakon o tehničnih zahtevah za proizvode in o ugotavljanju skladnosti ter podzakonski akti s področja elektromagnetne združljivosti in zaščite okolja. Poleg zakonodaje so za SN kable bistveni še tehnični standardi in tipizacija.

2.2.1 SIST HD 620 S3:2023

Standard SIST HD 620 S3:2023 določa tehnične zahteve za energetske kable z ekstrudirano izolacijo in njihove dodatke, namenjene za nazivno napetost od 3,6/6 (7,2) kV do vključno 20,8/36 (42) kV. Nanaša se na enožilne in večžilne kable z izolacijskimi materiali, kot sta zamreženi polietilen (XLPE) in etilen-propilen (EPR), ki predstavljajo sodoben standard v srednjenapetostnih kablovodih. Trenutno je v tipizaciji še vedno naveden standard SIST HD 620 S2, ki pa ga postopoma nadomešča novejša in posodobljena različica S3. Ta različica je usklajena z aktualnimi evropskimi tehničnimi smernicami, kot sta IEC 60502-2 (za konstrukcijo in preizkuse SN kablovodov) in EN 50575 (enotna pravila za trženje v Evropski uniji).

Vsebuje zahteve za:

- konstrukcijo kabla (vodniki, izolacija, zasloni, plašči),
- lastnostni materialov (mehanske, električne, požarne),
- vrste preizkusov (delne praznitve, dielektrična trdnost, vodotesnost, toplotna odpornost, preizkus vnetljivosti).

Novi standard S3 v primerjavi s S2 dodaja razrede glede na okolje uporabe, upošteva UV odpornost in halogen – free izvedbe, uvaja obvezno označevanje kablov in se prilagaja evropski zakonodaji CPR, katere načelo je zagotavljanje varnosti ljudi in objektov ob uporabi gradbenih materialov (Uredba EU št. 305/2011).

2.2.2 SIST EN IEC 60228:2024 (2005)

Standard SIST EN IEC 60228:2024 določa tehnične zahteve za vodnike električnih kablov. Njegov glavni namen je zagotoviti standardizacijo električne prevodnosti in mehanskih značilnosti vodnikov, ki se uporabljajo v kablilih za nizko, srednjo in visoko napetost. Do leta 2024 je bil v Sloveniji v veljavi standard SIST EN 60228:2006, ki je vsebinsko temeljil na evropski različici EN 60228:2005. Leta 2024 je bila izdana nova posodobljena različica, ki vključuje tehnične dopolnitve in uskladitve z evropskimi zakonodajnimi zahtevami.

V standardu SIST EN IEC 60228 so definirani štirje razredi vodnikov:

- razred 1: polni vodnik z enojno žico (trd),
- razred 2: večžični vodnik (trd, vendar sestavljen iz več žic),
- razred 5: fleksibilni vodnik za splošne aplikacije (gibljiv),
- razred 6: visoki fleksibilen vodnik za premikajoče dele.

Za vsak razred standard določa:

- minimalno in maksimalno število žic in njihov premer;
- električno upornost vodnika pri določeni temperaturi;
- presek vodnika (nominalno in dovoljeno odstopanje);
- preskusne metode za preverjanje skladnosti.

Namen standarda je zagotoviti, da imajo vsi vodniki zadostno električno prevodnost, ki ustreza zahtevam za prenos moči, hkrati pa omogočajo primerljivost med različnimi proizvajalci. Uporaba standarda je ključna pri izbiri kablov v projektni dokumentaciji, saj omogoča natančno specifikacijo preseka in vrste vodnika.

2.2.3 SIST EN 60332-1-2

Standard SIST EN 60332 določa metode za preizkušanje vnetljivosti električnih kablov. Najbolj razširjen je del 60332-1-2, ki oceni obnašanje posameznega kabla pri

neposrednem vplivu plamena. V kontekstu sodobne zakonodaje se rezultati teh preizkusov uporabljajo za razvrščanje kablov glede na požarno varnost. Pri projektiranju SN kablovodov, zlasti v zaprtih prostorih (kabelski jaški, industrijski prostori), je ta standard ključnega pomena za zagotavljanje skladnosti s požarnovarnostnimi zahtevami.

2.3 Enožilni SN energetske kabli

Zaradi povečanja potreb po zanesljivi in varni distribuciji električne energije v urbanih in industrijskih okoljih se sedaj vse pogosteje uporabljajo enožilni energetske kabli. Ti kabli, kjer ima vsaka faza svoj ločen vodnik, predstavljajo tehnično dovršeno in fleksibilno rešitev, saj omogočajo večjo zmogljivost pri toplotni obremenitvi, boljše možnosti hlajenja in prilagoditev polaganja v različnih formacijah (ravna, trikotna, navpična).

Ključna prednost enožilnih SN kablov je konstrukcija izolacije iz zamreženega polietilena XLPE, ki omogoča delovanje pri višjih temperaturah, večjo dielektrično trdnost ter odpor na vlago in kemikalije. Kljub vse bolj kompleksnim in zahtevnim pogojem pri načrtovanju kabelskih tras enožilni kabli omogočajo optimalno izrabo prostora in enostavnejše prilaganje prostorskim omejitvam.

V skladu s tipizacijo ELES se v slovenskem distribucijskem omrežju uporabljajo standardizirane izvedbe enožilnih kablov za napetostni nivo 12/20/(24) kV.

Tipizacija je dokument, s katerim se uredi in poenoti opredelitev bistvenih zahtev, izhodiščni pogoji za projektiranje, izbira materialov in opreme, ki se vgrajujejo z namenom, da se zagotovita enotnost tehničnih rešitev na celotnem distribucijskem omrežju Slovenije in zanesljivost objekta ves čas njegove življenjske dobe (ELES T-3, 2024).

2.3.1 Označevanje SN kablov

Oznako kabla sestavlja skupina črk in števil, ki označujejo konstrukcijo kabla od sredine kabla (vodnik) navzven (plašč). Za označevanje se uporabi sistem označevanja kabla po standardu SIST HD 620 S2 (ELES T-3, 2024).

Kebl z izolacijo omreženega polietilena (XLPE), s polprevodnima plastema okrog vodnika in izolacije, s plaščem iz polietilena (PE), vzdolžno in prečno vodno zaporo in s (kovinskim zaslonom) električno zaščito v obliki ovoja ali opleta iz bakrenih žic, prereza 25 mm², z enim vodnikom iz aluminija, prereza 150 mm², za nazivno napetost 12/20 kV se označuje: NA2XS(FL)2Y 1x150/25 RM 12/20 kV (EIMV Študija št. 2493, 2022).

N A 2X S (FL) 2Y 1 × 150 / 25 RM 12/20(24)kV
 -1- -2- -3- -4- -5- -6- -7- -8- -9-

Slika 2: Oznaka SN kabla
 (Vir: ELES T-3, 2024)

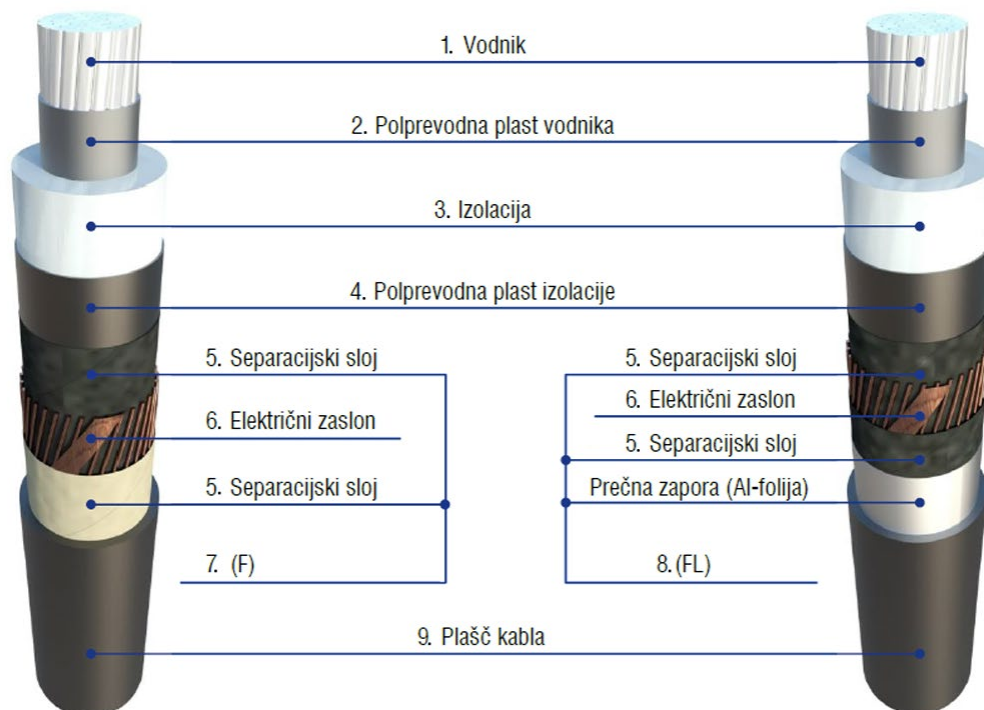
1. Indikator označevanja po standardu SIST HD 620 S2
N oznaka za kabel po standardu
2. Vodnik
A vodnik iz aluminija
- bakren vodnik (brez označbe)
3. Izolacija
2X omrežni polietilen (XLPE)
4. Zaslona
S ekran iz Cu žice
SE ekran okrog vsake žice posebej
H prevodni sloji
(F) vzdolžno vodotesen
5. Plašč
Y PVC
2Y termoplastični polietilen (PE)
(F)2Y vzdolžno vodotesen s PE plaščem
(FL)2Y vzdolžno in prečno vodotesen z Al/PE plaščem
(FB)2Y vzdolžno in prečno vodotesen c Cu/PE plaščem
6. Število žil
7. Nazivni prerez vodnika/prerez ekrana v mm²
8. Oblika vodnika
R okrogel vodnik
S sektorski vodnik
E polni vodnik
M večžični vodnik
9. Nazivna napetost (U_o/U)

2.3.2 Konstrukcija SN kablov

SN energetske kabli so sestavljeni iz več funkcionalno in konstrukcijsko ločenih plasti, katerih namen je zagotoviti varno prenosno pot za električno energijo v razponu nazivnih napetosti od 6 do 36 kV. Vsaka plast v sestavi kabla je optimizirana za specifično funkcijo – bodisi za električno izolacijo, zaščito pred elektromagnetnim sevanjem, mehansko obremenitev ali odpornost na zunanje vplive. Ključni element sodobnih SN kablov je vodnik iz aluminija ali bakra, ki je obdelan z več sloji

ekstrudirane izolacije, običajno iz zamreženega polietilena (XLPE), in dodatno zaščiten s prevodnimi sloji, zaslonom in zunanjim ekranom.

Konstruktivske zahteve so definirane v standardu SIST HD 620, medtem ko njegovo praktično uporabo in tipizirane izvedbe ureja tipizacija ELES – T3 (Enožilni energetski kabli 12/20/24 kV). Tipizacija vključuje standardne tipe kablov N(A)2XS(F)2Y, ki se polagajo na terenih ali prostorih brez stalne prisotnosti vlage/vode in N(A)2XS(FL)2Y, ki so namenjeni polaganju v okoljih s stalno prisotnostjo vlage.



Slika 3: Izgled in sestava enožilnega SN kabla tipa NAXS(F(L))2Y
(Vir: ELES T-3, 2024)

1. Vodnik

Vodnik mora imeti obliko valja brez vdolbin in izboklin, da zagotavlja enakomerno porazdelitev električnega polja. Izdelan je iz več Al ali Cu kompaktnih žic, spletenih v vrv vodnika okrogle oblike, izdelano po standardu SIST EN 60228 (ELES T-3, 2024).

2. Polprevodna plast vodnika

Polprevodna plast vodnika je namenjena doseganju homogenosti (enakomerni porazdelitvi) električnega polja v izolaciji blizu vodnika, ker električno oblikuje površino vrvi vodnika v homogeno okroglo obliko. Polprevodna plast mora biti iz omrežene polprevodne plastične mase. Ioni polprevodne snovi v plastični masi morajo biti inertni in v izolaciji ne smejo pospeševati ali povzročati pojave t. i. vodnih dreves. Polprevodna plast se mora z lahkoto ločiti od vodnika (ELES T3, 2024).

3. Izolacija

Omrežni polietilen, XLPE, tip DIX8 v skladu s standardom SIST HT 620 S2 (ELES T-3, 2024).

4. Polprevodna plast izolacije

Polprevodna plast izolacije je tako kot polprevodna plast vodnika namenjena doseganju homogenosti (enakomerni porazdelitvi) električnega polja v izolaciji v bližini električnega zaslona iz bakrenih žic. Polprevodna plast izolacije je trdno vezana na izolacijo. Polprevodna plast mora biti iz omrežene polprevodne plastične mase. Ioni polprevodne snovi v plastični masi morajo biti inertni in v izolaciji ne smejo pospeševati ali povzročati t. i. vodnih dreves (ELES T-3, 2024).

5. Separacijski sloj

Namen separacijskega sloja je zmanjševanje škodljivih mehanskih vplivov med sestavnimi elementi kabla med izdelavo, polaganjem in delovanjem sil terena na končno vgrajeni kabel. Separacijski sloji zagotavljajo mehansko blaženje in drsnost stika med sloji ter s tem zmanjšujejo možnost poškodb materiala. Separacijski sloj v območju električnega zaslona in polprevodne plasti izolacije v kablilih z vzdolžno zaporo opravlja tudi funkcijo vodne zapore. Izveden je kot poseben dvoslojni trak iz polprevodne vlaknovine z vmesno vezanim slojem higroskopičnega prahu. Trak je ovit vzdolž žile in ob stiku z vodo nabrekne oz. želira ter tako ustvari zaporo proti prodiranju vode naprej po kablju. Separacijski sloj v stiku med plaščem in električnim zaslonom je v kablilih z vzdolžno vodno zaporo lahko tudi iz drugih tehnološko ustreznih materialov (npr. folije, papirja ipd.) (ELES T-3, 2024).

6. Električni zaslon

Namen zaslona je, da je zunanost kabla na varnem potencialu oziroma na potencialu blizu potenciala zemlje. Poleg varnosti zaslon zagotavlja nadzorovan električni potencial polprevodnemu sloju izolacije in v strnjenih kabelskih omrežjih zagotavlja medsebojno galvansko povezanost ozemljitev napajanih objektov v enotno globalno ozemljitev omrežja (v kolikor je omrežje tako zastavljeno). Električni zaslon sestavlja bakreni trak in več bakrenih žic, ovitih okrog žile kabla s skupnim prerezo 16 mm² ali 25 mm². Premier žic mora biti večji od 0,5 mm in bakreni trak mora biti debelejši od 0,1 mm. Razmik med posameznimi žicami je lahko največ 4 mm – SIST HD 620 S2 (ELES T-3, 2024).

7. Vzdolžna vodna zapora zaslona (F)

Vzdolžna vodna zapora kabla na področju zaslona je izvedena predvsem z uporabo polprevodnega traku, opisanega v točki 5. – separacijski sloj, ovit vzdolž žile kabla z ene ali obeh strani kovinskega zaslona, ki ob stiku z vodo nabrekne oziroma želira in prepreči vodi nadaljnje širjenje po kablju (ELES T-3, 2024).

8. Vzdolžna in prečna vodna zapora kabla (FL)

Poleg vzdolžne vodne zapore iz točke 7. – vzdolžna vodna zapora zaslona (F), kabel vsebuje tudi sloj prečne vodne zapore v obliki kovinske folije, ki vlagi preprečuje vdor skozi plašč v notranost kabla. Pri kablilih, označenih s (FL), je prečna vodna zapora iz aluminijaste folije, ki je neprekinjena in neločljivo spojena na notranjo stran plašča kabla. Pri kablilih s prečno zaporo iz bakrene folije (FB) je pomen in analogija prečne zapore enaka (ELES T-3, 2024).

9. Plašč kabla

Plašč kabla mora biti narejen iz polietilena (PE), katerega značilnosti morajo biti v skladu z zahtevami standarda SIST HD 620 S2, za tip materiala DMP 2, črne barve. PE se odlikuje po dobri kemični obstojnosti, mehanski trdnosti in odličnih elektro-izolacijskih lastnostih (ELES T-3, 2024).

2.3.3 Transport

Kabli se transportirajo na kabelskih bobnih (kolutih) skladno s tehničnimi navodili proizvajalca ter Smernicami in navodili za izbiro, polaganje in prevzem elektroenergetskih kablov nazivne napetosti 1 kV do 110 kV (EIMV). Kabli se običajno dobavijo na lesenih kolutih ustrezne dimenzije s predpisanimi minimalnimi polmeri jedra, ki so večji od minimalnega dovoljenega polmera zvijanja kabla. Konci kablov morajo biti vodoneprepustno zaščiteni z ustreznimi zaporniki – kapami. Vsak kolut mora biti jasno označen z oznako kabla, nazivnim napetostnim nivojem, dolžino in proizvajalcem. Pri transportu mora biti kabel mehansko zaščiten pred poškodbami in ustrezno pritrjen, da se ne more nenadzorovano premikati.



Slika 4: Primer transporta kabla
(Vir: ELES T-3, 2024)

Kable je treba skladiščiti na pokritem mestu in zavarovati pred neposrednimi sončnimi žarki, atmosferskimi vplivi in možnostjo poškodb. Skladiščiti jih je treba na ustreznih bobnih pokončno oziroma ne smejo ležati na boku (ELES T-3, 2024).



Slika 5: Primer skladiščenja kabla
(Vir: ELES T-3, 2024)

2.3.4 Prevzem in preizkušanje

Pri dostavi kabla na gradbišče ali skladišče izvajalca del mora biti vedno opravljen količinski prevzem in vizualni pregled, ki vključuje pregled morebitnih poškodb kolotov, nepoškodovanosti kabla, preverjanje oznak in skladnost z naročilno dokumentacijo.

Po položitvi in opravljeni montaži je potrebno kabel električno preizkusiti. Priporoča se preizkus z enosmerno visoko napetostjo, ki se izvaja na popolnoma vgrajenem kablu s kabelskim priborom pred vstavljanjem v obratovanje. Po preizkušanju mora merilec izdati ustrezeni protokol z rezultati preizkušanja. Če kabla ni mogoče preizkusiti z enosmerno napetostjo pred vstavljanjem v obratovanje, se dopušča preizkus kabla z izmenično napetostjo 50 Hz. Kontrolo dielektrične trdnosti novo položenih kablov z enosmerno napetostjo je treba opraviti z napetostmi, ki jih prikazuje naslednja tabela.

Nazivna napetost [kV]	Izmenična napetost [kV]	Enosmerna napetost [kV]	Čas trajanja [min.]
12/20	20	50,5	5/15
6/10	10,5	24	15
0,6/1	4	12	10

Tabela 1: Vrednost vzdržnih napetosti za izvajanje električnega preizkusa kablov
(Vir: Elektro Ljubljana, 2024)

3 ELEKTRO KABELSKA KANALIZACIJA

Elektro kabelska kanalizacija (EKK) predstavlja osnovno infrastrukturno podporo za polaganje elektroenergetskih kablov, predvsem v urbanih in gosto poseljenih območjih, kjer je neposredno polaganje kablov v zemljo omejeno zaradi prostora ali obstoječe infrastrukture. Gre za sistem vnaprej vgrajenih zaščitnih cevi in kabelskih jaškov, ki omogočajo varno, pregledno in vzdrževalno učinkovito polaganje SN in NN kablov ter pripadajočih optičnih in komunikacijskih vodov.

EKK se projektira in gradi skladno s tehnično smernico GIZ TS-13 Elektro kabelska kanalizacija, ki določa tehnične, gradbene in mehanske zahteve za materiale, cevi, jaške, pokrove in način vgradnje. Ključni načrtovalski parametri vključujejo izbiro in število cevi, dimenzioniranje jarka, razporeditev kablov znotraj cevi, mehansko zaščito in prezračevanje jaškov. Sistem mora omogočati dovolj velik radij krivljenja kablov glede na njihov zunanji premer, primerno velikost jaškov za izvedbo spojk in čim manjše upore trenja, ki nastajajo pri vleki.

Zaradi velikih presekov kablov, kot sta Cu 240 mm² in Al 400 mm² je v praksi prišlo do izzivov pri polaganju, zlasti zaradi omejitev v geometriji EKK, upogibnih radijev in dopustnih vlečnih sil. Opisana primera kablov, ki sta tudi predmet obravnave v diplomskem delu, potrjujeta pomen kakovostnega in predhodno dobro načrtovanega sistema EKK, ki omogoča pravilno, varno in dolgoročno zanesljivo vgradnjo kablovoda.

EKK naj se ne polaga v cestišče po vozni pasovih, če pa se, naj bo trasa EKK vključno s protihrupnimi pokrovi umeščena na sredino voznega pasu med kolesnicami (GIZ TS-13, 2017).

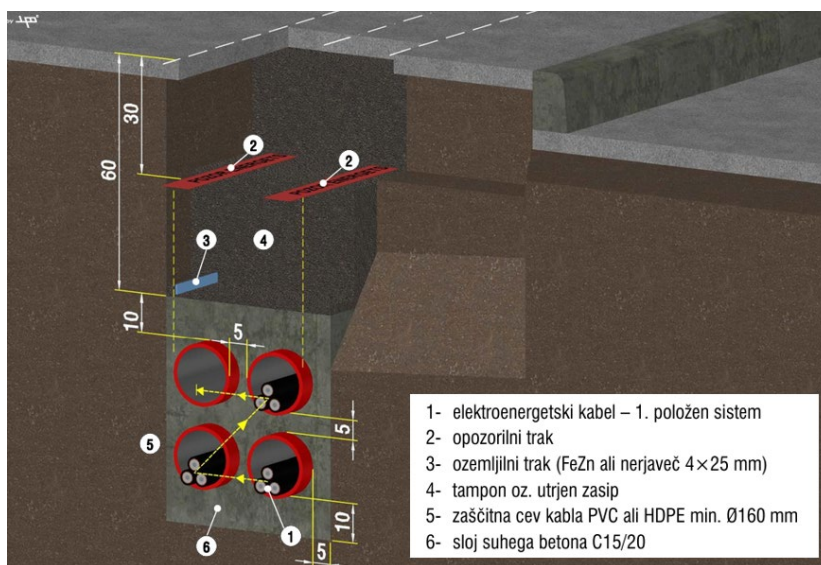
3.1 Cevni sistemi in materiali

Cevni sistem predstavlja osnovni konstrukcijski element EKK, saj zagotavlja mehansko zaščito kablov, omogoča enostavno polaganje in možnost kasnejšega izvleka in zamenjave kablov. V urbanem okolju, kjer je prostor za gradnjo omejen, je ustrezna izbira cevi ključnega pomena za zagotavljanje dolgoročne funkcionalnosti kablovoda.

Za EKK je treba uporabljati samo notranje gladke EPC (elektro PVC) cevi, premera 160 mm in 110 mm rdeče barve, izjemoma se zaradi daljših odsekov vleke in večjih presekov kablov lahko uporabijo tudi cevi, premera 200 mm (GIZ T-13, 2017).

GDC – Gibljiva dvoslojna cev (npr. »narebrena DWP«), t. i. rebrasta PEHD cev z dvojno steno (zunanja – narebrena, notranja – gladka) se uporablja predvsem pri izgradnji EKK v območjih, obremenjenih z obstoječo komunalno infrastrukturo, pri čemer se je treba izogibati prevelikim odstopanjem od simetralne trase (ukrivljenosti) (GIZ T-13, 2017).

Cevi, premera 110 mm, se večinoma uporabljajo za uvlek enožilnih SN in NN kablov, cevi, premera 160 mm, pa so namenjene za uvlek treh enožilnih kablov. Za potrebe telekomunikacijskih povezav se uporabljajo cevi, premera 50 mm.



Slika 6: Prečni prerez EKK z elektroenergetskimi kablji
(Vir: ELES T-2, 2024)

Pomemben vidik pri izbiri cevi je dovoljena natezna obremenitev in odpornost na UV žarke, še posebej če so cevi pred vgradnjo začasno izpostavljene soncu. Vsi cevni elementi morajo biti medsebojno povezani s spojkami, ki zagotavljajo vodotesnost in mehansko stabilnost celotnega sistema. Vgradnja cevi mora potekati tako, da ni ostrih krivin ali stiskanja, kar bi lahko povzročilo deformacijo cevi in s tem otežilo polaganje kablov.

Pri izgradnji EKK je obvezna uporaba opozorilnega traku, ki se položi približno 30 cm nad temenom cevi z namenom opozarjanja pri morebitnih zemeljskih delih. Prav tako je predpisana uporaba ozemljilnega valjanca (najpogosteje FeZn), ki se položi vzporedno s kablom in služi kot del zaščitnega sistema in ozemljitve.

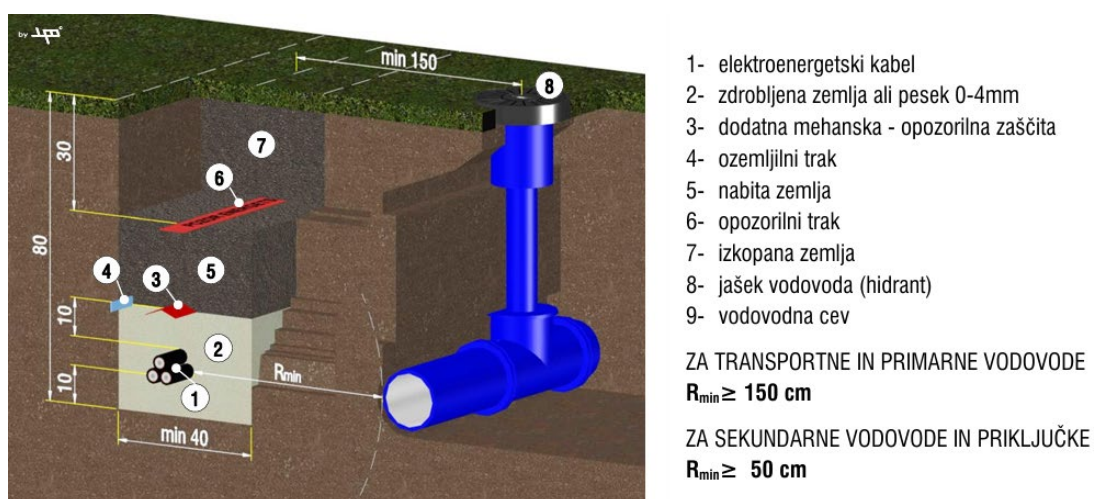
Pri EKK je treba pazljivo izbrati traso, ki naj bo čim bolj ravna brez večjih vertikalnih in horizontalnih odmikov od ravne osi trase ali delov trase. Če trasa poteka pod

urejenimi površinami, naj poteka v največji možni meri v koridorju za pešce (pločniku), pod neurejenimi površinami pa v primeru oddaljenosti od naravnih virov in drugih ovir (GIZ T-13, 2017).

Pri načrtovanju in izvedbi EKK je treba upoštevati prostorske pogoje in prisotnost drugih podzemnih komunalnih vodov, kot so vodovod, kanalizacija, plinovod, toplovod, telekomunikacijski vodi in optične povezave. Skladno s tehničnimi smernicami GIZ TS-13 in GIZ T-2 ter dobrimi inženirskimi praksami je treba med elektro cevmi in drugimi infrastrukturnimi vodi zagotoviti ustrezne vodoravne in navpične odmike, ki omogočajo varno vgradnjo, preprečujejo toplotni vpliv, olajšajo vzdrževanje in zmanjšujejo tveganje pri morebitnih poškodbah ali obnovah.

Minimalni vodoravni odmik med EKK in drugimi vodi, če so položeni vzporedno, znaša 0,5 m, razen kadar je zaradi prostorskih omejitev drugače dogovorjeno z upravljavcem prizadetega voda. Navpični odmiki pri križanju pa znašajo vsaj 0,3 m. Pri križanjih z železniško infrastrukturo ali cestno kanalizacijo so potrebni dodatni ukrepi, kot so zaščitne cevi, betonske zaščite ali obloge. Pri vseh križanjih se priporoča, da kot križanja znaša 90 stopinj, če pa to ni možno pa kot nikoli ne sme biti manjši od 45 stopinj. V primeru večplastnih križanj ali omejenega prostora je priporočljivo izdelati podroben načrt s prikazom vertikalnih in horizontalnih odmikov, vključno s podrobnostmi prebojev in zaščit.

Natančno načrtovanje križanj in odmikov ni pomembno zgolj zaradi mehanske zaščite in funkcionalnosti, temveč tudi zaradi zakonske odgovornosti izvajalca in investitorja, saj lahko nepravilna izvedba povzroči motnje v oskrbi ali celo škodi na drugih infrastrukturnih sistemih.



Slika 7: Primer vzporednega poteka elektroenergetskih kablov in vodovoda
 (Vir: ELES T-2, 2024)

3.2 Kabelski jaški

Kabelski jaški so sestavni del EKK in služijo kot dostopne točke za polaganje in izvlek kablov, izvedbo spojk ali vzdrževalna dela. Uporabljajo se povsod tam, kjer so trase daljše od dovoljenih dolžin za enkratno vleko, vsebujejo več zavojev ali kjer so predvidene vmesne spojke oziroma razcepne točke v elektroenergetskem omrežju. Jaški morajo biti ustrezno dimenzionirani glede na število in presek kablov ter prostor, potreben za varno delo in vzdrževanje.

Razdalje med jaški so poleg naštetega odvisne tudi od:

- tipa, vrste in števila uporabljenih kablov;
- materiala cevi kabelske kanalizacije;
- navodil za vlečenje kablov;
- naprave za vlečenje kablov.

Razdalje med jaški znašajo od 50 m do 100 m, izjemoma ob upoštevanju varnostno tehničnih pravil lahko tudi več in so omejene z možnostjo uvleke predvleke in silami na kabel pri vleki (GIZ T-13, 2024).

Pri izgradnji EKK se najpogosteje uporabljajo armirano betonski (AB) jaški pravokotnih oblik, ki se izdelajo na mestu vgradnje. Poznamo pa še prefabricirane AB jaške v montažni ali monolitni izvedbi ter prefabricirane jaške iz termoplastičnega materiala.

Kabelske jaške razvrščamo v tri tipe:

- tip A – prehodni jaški,
- tip B – odcepni jaški,
- tip C – priključni jaški.

Prehodni jašek uporabljamo na ravnih in lomnih trasah, kjer se kabel samo vodi naprej skozi cev in služi kot vlečna točka. Število cevi je enako na vходу in izhodu iz jaška.

Odcepni jašek omogoča izvedbo odcepov in razvodov kablov iz glavne trase. Uporablja se pri razvejanih sistemih, kjer je treba enega ali več vodov ločiti v druge smeri. V takšnih jaških je prostor tudi za kabelske spojke, dimenzije so večje kot pri prehodnih, saj je potrebna dodatna manipulacijska površina.

Priključni jašek pa se nahaja na koncu trase oziroma v točki, kjer se kabli priključijo na napravo ali objekt (transformatorska postaja, razdelilna omarica). Ti jaški so namenjeni lažjemu uvleku kablov v končni postroj.

Tip jaška določa način izvedbe, potrebne dimenzije, nosilnost pokrova in opreme v jašku, zato je pomembno, da se pravilno določijo že v fazi načrtovanja, glede na funkcionalne zahteve kabske trase in izbran tip elektroenergetskega omrežja.

GABARITI JAŠKA (notranje mere)			Število sten s cevmi	Snopi cevi na steno		POKROV ($n = A + D$) [šnd]	OBIČAJNA UPORABA PO TIPU			
A [m]	B [m]	V [m]		OBIČAJNO [$n_v \times n_s \times CE$]	IZJEMOMA [$n_v \times n_s \times CE$]		A	B	C	
1,2	1,2	1,2	2	1×3×110, 2×2×160	3×2×110, 2×2×160	1× 6n6, 1× 8n8	• ¹	• ^{1,2}		•
		1,5	2	1×3×110, 2×2×160	3×2×110, 2×2×160	1× 6n6, 1× 8n8	• ¹	• ^{1,2}		•
1,5 ÷ 1,6	1,5 ÷ 1,6	1,5÷1,6	4	2×3×110, 2×2×160	4×4×110, 3×3×160	1× 6n6, 1× 8n8, 1× 6n13,	•	•	•	•
		1,8	4	2×3×110, 2×3×160	4×4×110, 3×3×160	1× 6n6, 1× 8n8, 1× 6n13	•	•	•	•
1,2	1,5 ÷	1,5	2	1×3×110, 2×2×160	3×2×110, 2×2×160	1× 6n6, 1× 8n8, 1× 6n13	•	•	• ²	•
	1,6	1,8	2	1×3×110, 2×2×160	3×2×110, 2×2×160	1× 6n6, 1× 8n8, 1× 6n13	•	•	• ²	•
2	1,6 ÷ 2	1,8	4	3×3×110, 3×3×160	6×6×110, 4×4×160	1× 8n8, 1× 6n13, 1× 6n6+1× 6n13	•	•	•	•

¹ brez možnosti izvedbe SN kabske spojke

² ob upoštevanju minimalnih polmerov krivljenja

n_v – število vrst cevi

n_s – število cevi v vrsti (število nizov)

Slika 8: Značilnosti dimenzij jaškov po številu cevi, pokrovov in funkciji
(Vir: GIZ-13, 2024)

Za dolgoročno funkcionalnost in varnost kabskih jaškov je poleg konstrukcijskih značilnosti bistvenega pomena pravilna izbira in vgradnja pokrovov ustrezne nosilnosti, zagotovljen varen dostop (lestve, vponke), pregledna označitev kablov in izvedba funkcionalne ozemljitve. Pokrovi morajo biti mehansko odporni in vgrajeni na višini končnega nivoja terena. V urbanih območjih se poleg mehanskih zahtev upoštevajo tudi estetski in prometni pogoji, medtem ko se pri TP in RTP objektih dodatno zagotavlja zanesljiva ozemljitev preko valjancev in zaščitnih lijakov.

3.3 Polaganje kablov v EKK

Pri polaganju SN kablov predstavljata vlečna sila in radij krivljenja ključna mehanska omejitvena parametra, ki neposredno vplivata na pravilnost vgradnje in dolgoročno zanesljivost delovanja kablovoda. Prekomerna vlečna sila ali premajhen radij krivljenja lahko povzročita nepopravljive poškodbe vodnika, izolacije ali zaslona ter bistveno zmanjšata življenjsko dobo kabla.

Pred začetkom polaganja kablov v EKK je treba izvesti priprave, ki omogočajo normalne in varne delovne pogoje, kot so:

- ograditev delovnega mesta;
- postavitve prometnih znakov – če je to potrebno;
- odstranitev pokrovov z jaškov;
- kontrola vsebnosti škodljivih plinov;
- prezračevanje jaškov;
- razsvetljevanje jaškov;
- čiščenje jaškov in odstranjevanje vode;
- kontrola prehodnosti cev.



Slika 9: Priprava na polaganje SN KB
(Lastni vir)

Pred začetkom del v kabelskem jašku je treba pustiti jašek odprt vsaj 30 minut, s tem da sta odprta tudi sosednja dva jaška. Z indikatorjem je treba ugotoviti prisotnost škodljivih in vnetljivih plinov, še posebej tam, kjer v bližini poteka plinovod. Če se ugotovi prisotnost plinov, se z delom začne šele, ko so ti odstranjeni, vendar je treba izvajati neprestano kontrolo.

Pred vleko kablov je treba preko EKK potegniti predvlečno vrv in jo spojiti s kabelsko nogavico ali vlečno sponko, kamor so pritrjeni kabli. Kabli se lahko polagajo ročno ali strojno, in sicer s pomočjo vlečne naprave – vitla.

Ročno polaganje kablov se uporablja pri krajših odsekih do približno 300 m, zlasti na odsekih z ostrimi zavoji ali težje dostopnih terenih. Kabel delavci nosijo, vlečejo ali

potiskajo ročno, pri čemer mora biti masa na posameznega delavca omejena na največ 20 kg. Pri teh je treba paziti, da se kabel ne vleče po tleh in ne drsi preko ostrih robov, lahko se uporabijo tudi valji.

Strojno polaganje s pomočjo vlečne naprave – vitle, se uporablja pri daljših trasah brez večjih ovir in krivin. Kabel se vleče preko vrtljivih valjev, nameščenih v razdalji 4–6 m, pri čemer se uporablja vlečna nogavica za enostavnejše trase ali zatezna sponka za daljše in zahtevnejše poti. Pomembna je kontrola vlečne sile z dinamometrom in vgradnja varovalke, ki prekine vleko pri doseganju dopustne sile. Za preprečevanje torzijske obremenitve kabla se med vlečno vrvjo in nogavico namesti antitorzijska spojka.



*Slika 10: Vlečna naprava Bagela KW4000 za strojno polaganje kablov
(Lastni vir)*

3.3.1 Vlečna sila

Največje dopustne vlečne sile pri vleki različnih tipov in konstrukcij kablov so podane v tabelah največjih dopustnih vlečnih sil za posamezne tipe in konstrukcije kablov, ki jih predpisuje proizvajalec. Za zmanjševanje vlečnih sil je dopustna uporaba motorno gnanih valjev, ki potiskajo kabel v vlečni smeri. V dotičnih dveh tipih kablov, ki ju obravnavamo v diplomskem delu, je s tehničnega lista mogoče razbrati, da maksimalna vlečna sila znaša 12.000 N. Tehnična lista sta dodana v prilogi diplomskega dela.

Izračun maksimalne vlečne sile za kable izračunamo s pomočjo sledeče formule:

- Vleka s pomočjo sponke, vezane za vodik zemeljskega kabla:

$$F = \sigma * S$$

kjer pomeni:

- F – vlečna sila v N,
σ – dopustna natezna napetost vodnika (50 N/mm² za Cu, σ = 30 N/mm² za Al),
S – skupni presek vodnikov mm² (za 3 × N2XS(FL)2Y 1 × 240 mm² = 720 mm²).

- Vleka s pomočjo zatezne nogavice, zataknjene preko plašča kabla:

$$F = 5 * D^2_{\text{kabla}}$$

kjer pomeni:

- F – vlečna sila v N,
5 – korekcijski faktor,
D²_{kabla} – zunanji premer kabla v mm² (za N2XS(FL)2Y 1 × 240 mm² = 40 mm).

Pri strojnem polaganju kabla je bistvenega pomena nadzor na vlečno silo in hitrostjo polaganja, kar operator vlečne naprave neprestano spremlja na nadzorni enoti vitla. Z vgrajeno elektroniko lahko operator sproti spremlja, ali se približuje največji dovoljeni sili, pri čemer je sistem opremljen tudi z varnostno zavoro, ki samodejno prekine vleko, če je dopustna meja presežena. Digitalni nadzorni sistemi so danes standard pri profesionalnih vitlih, saj omogočajo hitro odzivanje operatorja, arhiviranje podatkov in zagotavljanje sledljivosti meritev. Pravilno dokumentirana vlečna sila je pogosto del izkazanih meril pri tehničnem prevzemu vgrajenega SN kablovoda.



*Slika 11: Prikaz nadzora nad vlečno silo pri strojnem polaganju SN KB
(Lastni vir)*

3.3.2 Radij krivljenja

Pri odvijanju, transportu in polaganju je treba poleg vlečne sile dosledno upoštevati tudi minimalni dopustni radij krivljenja, ki predstavlja najostrejši zavo, pri katerem kabel še lahko varno upognemo brez tveganja za mehanske poškodbe in električne okvare. Premajhen radij pri polaganju lahko povzroči trajne deformacije vodnika, pokanje izolacije, poškodovanje zaslona ali povečane napetosti v vodotesnih plasteh.

Radij krivljenja oziroma polmer upogibanja za SN kable prepisuje standard IEC 60502-2 in ga izračunamo po formuli:

- $15 \cdot \text{zunanji premer kabla (D}_{\text{kabla}})$.

Premer cevi ali odprtine, skozi katero gre kabel, izračunamo po sledeči formuli:

- $1,5 \cdot \text{D}_{\text{kabla}}$.

Polmeri krivljenja so lahko za 30 % manjši, če se ukrivljenje izvaja preko šablon ali če se kabli krivijo pred kabelskimi končniki (Elektro Ljubljana, 2024).

3.3.3 Vplivi na okolje in prostorski vidik

Vgradnja SN kablovodov in pripadajoča EKK vplivata na fizično okolje in tudi na prostorsko razporeditev komunalne infrastrukture. Čeprav gre za podzemno izvedbo, ki dolgotrajno ne obremenjuje okolja na enak način kot nadzemni vodi ali strojne

naprave, je treba pri načrtovanju upoštevati vrsto dejavnikov, ki vplivajo na naravno grajeno in funkcionalno okolje.

V fazi gradnje se okolijski vplivi kažejo predvsem kot začasno poseg v tla, vegetacijo, promet in zvočno okolje. Gre za izkope jarkov, nameščanje kabelskih jaškov, uporabe gradbene mehanizacije in transporta materiala. Tem vplivom se zmanjša učinek z uporabo ustrezne mehanizacije, kontroliranega odvzema zemljine, varovanja drevja in začasnih ograj.

Po zaključku gradnje so vplivi zamerljivi, saj se kabelske trase povsem zakrijejo, območje se sanira v prvotno stanje (asfalt, travnata površina, tlak). Tudi obratovalni vplivi, kot je elektromagnetno sevanje, so minimalni in skladni z Uredbo o elektromagnetnem sevanju v naravnem in življenjskem okolju (Uradni list RS, št. 41/04 z dne 22. 4. 2004). Kabli so dodatno zaščiteni z ozemljitvijo in kovinskimi zasloni, kar zmanjšuje komponento sevanja.

3.3.4 Varnost in zdravje pri delu

Pri izvajanju del na SN kablovodih in EKK je zagotavljanje varnosti in zdravja pri delu (VZD) ključnega pomena. Gradbišča SN in NN kablovodov predstavljajo kompleksno delovno okolje z več vrstami tveganj, kot so mehanske poškodbe, nevarnost električnega udara, ročno premeščanje bremen in izpostavljenost vremenskim vplivom. Izvajalec mora pred začetkom del izdelati oceno tveganja, ki vključuje analizo vseh možnih nevarnosti in ustrezne varovalne ukrepe v skladu z Zakonom o varnosti in zdravju pri delu (ZVZD-1).

Pri ročnem in strojem polaganju kablov je treba posebno pozornost nameniti pravilnemu rokovanju s kabli, spoštovanju dopustne vlečne sile, radijem krivljenja in uporabi osebne varovalne opreme (OVO) ter zaščiti pred električnim tokom. Delo mora potekati na ustrezno označenem in zavarovalnem gradbišču, z usposobljenimi delavci, ki so seznanjeni s postopki dela in prvo pomočjo. Uporabiti je treba določene varnostne ukrepe, kot so mehanske zaščite (ograje trakovi), varnostne prekinitve vleke kabla in preprečevanje torzijskih napetosti pri strojnem vleku kabla. Prav tako je pomembno upoštevati Pravilnik o varstvu pred nevarnostjo električnega toka, ki določa posebne pogoje za delo na elektroenergetskih objektih.

Delodajalec je odgovoren za izvajanje ukrepov VZD, redno preverjanje usposobljenosti zaposlenih in vzdrževanje delovne opreme. Delavci pa morajo pri delu uporabljati predpisano OVO, spoštovati navodila in takoj poročati o nevarnostih ali nezgodah. Vsa dela na ali v bližini delov pod napetostjo morajo biti načrtovana tako, da se tveganja minimalizirajo, kar vključuje spoštovanje petih varnostnih oziroma zlatih pravil dela v breznapetostnem stanju, ki so definirana v 28. členu

Pravilnika o varstvu pri delu pred nevarnostjo električnega toka (Uradni list RS, št. 29/92), in sicer po naslednjem vrstnem redu:

- izklopiti in vidno ločiti naprave pred napetostjo z vseh strani;
- preprečiti ponovno vklopitev;
- ugotoviti breznepetostno stanje;
- izvesti ozemljitev in kratkostično povezavo naprav;
- ograditi mesto dela od delov, ki so pod napetostjo.

Z upoštevanjem systemskega pristopa k VZD se ne zagotavlja le pravna skladnost, temveč predvsem varno delovno okolje, ki preprečuje poškodbe in dolgoročne zdravstvene posledice.

4 TEHNIČNE LASTNOSTI PRIMERJANIH KABLOV

Analizirana kabla v diplomskem delu sta tipa N2XS(FL)2Y 1x240/25 RM z bakrenim vodnikom in NA2XS(FL)2Y 1x400/35 RM z aluminijastim vodnikom, oba sta namenjena za nazivno napetost 12/20 (24) kV. Kabloma je skupna konstrukcija: glavniki vodnikov, izolacija iz XLPE, notranji in zunanji polprevodni sloj, zaslon iz bakrenih žic z navitim trakom, vzdolžna in prečna zapora, vodotesna zapora in plašč iz UV odpornega PE materiala.

Razlike med njima so posledica uporabe različnih materialov vodnika in njegov presek. Aluminijasti vodnik ima višjo specifično upornost, zato zahteva večji presek za enako tokovno obremenitev. Posledično se razlikujejo tudi premer kabla, masa, kapacitivnost ter upogibne in mehanske lastnosti.

Tehnične specifikacije obeh kablov so povzete iz uradnih tehničnih listov proizvajalca Prysmian, ki vključujejo ključne električne, termične in mehanske parametre. Na osnovi teh vrednosti je izvedena primerjava, ki je podlaga za tehnično in ekonomsko oceno možnosti nadomeščanja bakrenih vodnikov z aluminijastimi v SN omrežju.

4.1 Električne lastnosti

Električne lastnosti kablov bistveno vplivajo na njihovo obratovalno učinkovitost, obremenjenost ter napetostne in toplotne izgube v SN omrežju. Ključni parametri, ki določajo obnašanje kabla pod obremenitvijo, so upornost vodnika, kapacitivnost, tokovna zmogljivost in faktor dielektričnih izgub glavne izolacije. Primerjava kablov z različnim materialom vodika (Cu in Al) in različno površino preseka odraža neposredne razlike v teh vrednostih.

Oba analizirana kabla sta zasnovana za nazivno napetost 12/20 (24) kV, kar pomeni, da lahko obratujeta pri 12 kV fazne napetosti (U_0), to je napetost med faznim vodnikom in ozemljenim zaslonom kabla in 20 kV medfazne napetosti (U) med faznimi vodniki, z maksimalno sistemsko napetostjo do 24 kV (U_m). Maksimalna sistemska napetost je napetost, ki se lahko v omrežju pojavi kratkotrajno zaradi normalnih obratovalnih pogojev ali preklapov. Izolacija mora to napetost prenesti brez poškodb.

4.1.1 Električna upornost vodnika

Električna upornost vodnika je fizikalna lastnost, ki izraža upor materiala pri prevajanju električnega toka. Meri se v Ω/km in je definirana z enačbo:

$$R = \frac{\rho * l}{A}$$

kjer je:

- R – električna upornost [Ω],
- ρ – specifična upornost materiala [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$],
- l – dolžina vodnika [m],
- A – površina preseka vodnika [mm^2].

Specifična upornost bakra znaša 0,01724 ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$), aluminija pa 0,02826 ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$), kar pomeni, da ima baker približno 35 % nižjo upornost kot aluminij, zato za enako količino prenesene energije zahteva manjši presek. To pomeni manjšo debelino kabla in boljši izkoristek prostora, vendar je materialno in cenovno zahtevnejši.

Lastnost	N2XS(FL)2Y 1X240/25 RM	NA2XS(FL)2X 1X400/35 RM
DC upornost vodnika pri 20 °C [Ω/km]	0,0754	0,0778

Tabela 2: Upornost vodnika pri 20 °C
(Vir: Prysmian Group, 2025)

4.1.2 Tokovna zmogljivost

Tokovna zmogljivost kabla pomeni največji električni tok, ki ga lahko vodnik prenese pri stalni obremenitvi, ne da bi pri tem temperatura vodnika presegla najvišjo dovoljeno delovno temperaturo, ki pri XLPE izolaciji znaša 90 °C.

Na tokovno zmogljivost vpliva več ključnih dejavnikov. Eden najpomembnejših je presek in material vodnika. Večji, kot je presek, višja je tokovna nosilnost, pri čemer baker zaradi nižje upornosti v primerjavi z aluminijem prenaša več toka že pri majhnem preseku. Pomembna je tudi vrsta izolacije – XLPE omogoča visoko termično obremenitev, saj dopušča neprestano obratovanje pri temperaturi vodnika do 90 °C ter kratkotrajno obremenitev v primeru tokovnih udarcev, kot so kratki stiki do 250 °C za čas 5 sekund. Način polaganja močno vpliva na hlajenje kabla. V zemlji je pomembna toplotna prevodnost tal, globina vgradnje in število kablov, v zraku pa hlajenje poteka s konvekcijo, pri čemer ima velik pomen tudi razmik med posameznimi kable. Na temperaturno zmogljivost vplivajo tudi okolijski pogoji, zlasti temperatura tal in zraka – običajne referenčne vrednosti so 20 °C za tla in 30 °C za zrak ter toplotna upornost tal, katere standardna vrednost znaša 1,0 K $\cdot$ m/W.

Ker so SN kable običajno položeni v skupini – trojčku (vsaka faza, svoj vodnik), se njihova tokovna zmogljivost zmanjša zaradi njihovega medsebojnega segrevanja, zato je treba upoštevati ustrezne korekcijske faktorje.

Tip kabla	Tokovna obremenitev na zraku – vzporedno [A]	Tokovna obremenitev na zraku – trikot [A]	Tokovna obremenitev v zemlji – vzporedno [A]	Tokovna obremenitev v zemlji – trikot [A]
N2XS(FL)2Y 1X240/25 RM	731	634	568	532
NA2XS(FL)2Y 1X400/35 RM	753	660	564	535

Tabela 3: Tokovne obremenitve primerjanih SN kablov
(Vir: Prysmian Group, 2025)

4.1.3 Kapacitivnost in faktor dielektričnih izgub tan δ

Kapacitivnost kabla je pomembna lastnost, ki vpliva na obnašanje izolacijskega sistema, zlasti pri obratovanju s spremenljivimi napetostmi, preklopih in visokofrekvenčnih preizkusih. Odvisna je od geometrije kabla (premera vodnika in debeline izolacije), dielektrične konstante izolacijskega materiala in dolžine vodnika. Višja kapacitivnost pomeni večji tok praznjenja ob napetostnih prehodih in lahko vpliva na delovanje zaščitnih naprav ter povečane dielektrične izgube. Tipične vrednosti za SN kable z XLPE izolacijo znašajo od 0,2 do 0,4 $\mu\text{F}/\text{km}$, pri čemer kapacitivnost narašča z večjim presekom vodnika in večjo debelino izolacije.

Poleg kapacitivnosti je pomemben tudi faktor dielektričnih izgub tan δ , ki izraža razmerje med jalovo in aktivno komponento toka skozi izolacijo. Nižji, kot je tan δ , manj izgub nastaja v izolacijskem sistemu. Za XLPE izolacijo sodobnih SN kablov je ta faktor zelo nizek, običajno pod 0,002 %, kar pomeni zelo dobre dielektrične lastnosti in nizko disipacijo energije v izolaciji tudi pri daljših vodnikih. Tan δ po navadi ni podan v tehničnih listih kablov in ga je treba izmeriti v laboratorijskih preizkusih, kar je prikazano v naslednjem poglavju, kjer je obravnavan praktični preizkus SN KB na EIMV.

Tip kabla	Kapacitivnost [$\mu\text{F}/\text{km}$]	Tan δ [%]
N2XS(FL)2Y 1X240/25 RM	0,300	/
NA2XS(FL)2Y 1X400/35 RM	0,358	/

Tabela 4: Kapacitivnost primerjanih SN kablov
(Vir: Prysmian Group, 2025)

4.2 Mehanske in geometrijske lastnosti

Mehanske in geometrijske lastnosti kabla pomembno vplivajo na njegovo vgradnjo, rokovanje in dolgoročno stabilnost. Med najpomembnejše parametre sodijo zunanji premer, masa kabla, minimalni radij krivljenja in največja dovoljena vlečna sila. Ti podatki so ključni pri načrtovanju trase, izbiri ustreznih cevi za gradnjo EKK, določanju dimenzij jaškov in pri izbiri načina vgradnje. Kljub enaki funkciji in izolacijskemu sistemu se aluminijasti in bakreni kabel razlikujeta po teh lastnostih zaradi gostote in mehanskega obnašanja materiala vodnika. Primerjava teh parametrov daje jasnejši vpogled v praktične omejitve pri polaganju ter vpliv na montažno tehnologijo in prostorske zahteve.

Lastnosti	N2XS(FL)2Y 1X240/25 RM	NA2XS(FL)2Y 1X400/35 RM
Zunanji premer [mm]	40,6	45,3
Teža [kg/km]	3175	2345
Min. radij krivljenja [mm]	735 *	675
Dovoljena vlečna sila [N]	12.000	12.000
Tip vodnika	večžični Cu	večžični Al
Tip izolacije	XLPE	XLPE

Tabela 5: Pregled mehanskih in geometrijskih lastnosti primerjanih SN kablov
(Vir: Prysmian Group, 2025)

**Po priporočilu proizvajalca; po IEC 60502-2 minimalni radij krivljenja znaša 609 mm.*

Primerjava kaže, da ima aluminijasti kabel večji zunanji premer, kar posledično zavzema več prostora v cevi in je pomembno pri polaganju v EKK, kjer so premeri cevi pogosto omejeni na 160 mm. Masa aluminijastega kabla je bistveno manjša kot pri bakrenem, kar olajša transport in rokovanje, a hkrati zaradi večjega preseka povzroča večjo togost in uteži uvlek kabla v trase z večjim številom kotov. Oba kabla imata enako dovoljeno vlečno silo, kar omogoča uporabo istih metod za strojno polaganje, vendar je pri aluminijasti izvedbi zaradi večje dimenzije potrebna večja pozornost pri upoštevanju minimalnega radija krivljenja. Vrednost, ki jih navaja proizvajalec, presegajo standardno formulo $15 \cdot D$, kar odraža dodatne varnostne rezerve in konstrukcijsko občutljivost kablov z večplastno vodotesno zaščito. Te razlike so v praksi še posebej izrazite pri daljših trasah, ostrih lomih ali polaganju v neidealnih pogojih, kjer mehanske obremenitve hitro presegajo dovoljena območja.

4.2.1 Radij krivljenja

Radij krivljenja je ključni mehanski parameter, ki neposredno vpliva na vgradnjo SN kabla, zlasti v pogojih omejenega prostora, kot so cevi znotraj EKK in kabelskih jaškov. Pri obeh analiziranih kablilih je skladno s tehničnimi listi proizvajalca Prysmian Group naveden predpisan radij krivljenja, ki je večji od standardne zahteve $15 \cdot D$ in zagotavlja dodatno varnostno rezervo za preprečevanje mehanskih poškodb med vgradnjo.

Tip kabla [mm ²]	Zunanji premer Ø kabla [mm]	Potreben minimalni Ø odprtine [mm]	Dovoljen radij krivljenja [mm]
N2XS(FL)2Y 1×240/25 RM	40,6	60,9	609
NA2XS(FL)2Y 1×400/35 RM	45,3	67,9	679

*Tabela 6: Izračun radija krivljenja po EIC 60502-2
(Vir: Elektro Ljubljana, 2024)*

Pri bakrenem kablilu N2XS(FL)2Y 1x240/25 RM znaša radij krivljenja po tehničnem listu 735 mm, kar pomeni, da je priporočeni faktor $18,1 \cdot D$. Višji faktor je smiselno upoštevati pri vseh ovinkih na trasi, saj masa kabla (3175 kg/km) in večja togost v premeru 40,6 mm predstavljata dodatne mehanske obremenitve med vleko in uvajanjem skozi cevi EKK in kabelskih jaškov.

Aluminijasti kabel NA2XS(FL)2Y 1X400/35 RM ima sicer večji premer (45,3 mm), vendar nižji naveden radij krivljenja (675 mm), kar ustreza formuli $15 \cdot D$. Kljub večjemu preseku je kabel konstrukcijsko zasnovan tako, da dopušča strogo standardni radij. V praksi se je pri polaganju tega kabla izkazalo, da je zaradi večjega zunanjega premera prostorska zahtevnost še večja kot pri Cu kablilu, saj se težje vodi skozi ostrejša zavoja in obstoječe narebne cevi tipa GDC 160.

Pri obeh kablilih je treba pri načrtovanju trase EKK in dimenzioniranju kabelskih jaškov upoštevati dovolj prostora za ohranitev radija krivljenja. Ne smemo pozabiti, da so v jaških nameščene tudi kabelske spojke. Za varno in tehnično ustrezno izvedbo spojke mora biti jašek dovolj velik, da omogoča spoštovanje predpisanega radija krivljenja na vseh in nudi dovolj prostora za vstop monterjev za varno izvajanje del. V praksi to pomeni, da mora biti med vstopnim delom cevi in točko spoja zagotovljena dolžina, ki omogoča neovirano razvodje posameznih plasti kabla (vodnik, zaslon, izolacija), pri čemer je ključna delovna višina in širina za tehnično pravilno in varno izvajanje del. Če je v jašek uvedenih več kablov, morajo biti kabli razporejeni tako, da upoštevajo

radije vseh kablov in hkrati omogočajo manevriranje, bodisi za izvedbo spojk v primeru poškodbe bodisi za izvedbo novih spojk zaradi spremembe konfiguracije omrežja. Kabelska spojka predstavlja šibek člen v celotnem kablovodu, zato je kakovostna izvedba in pravilna lega te v jašku ključna za dolgoročno mehansko in električno zanesljivost sistema.

4.2.2 Vlečna sila

Vlečna sila je pri strojnem polaganju kablov ključna, saj določa, s kakšno silo lahko kabel vlečemo brez tveganja za mehanske poškodbe. Prekomerna obremenitev lahko povzroči pretrganje vodnika, poškodbe zaslona ali deformacijo izolacije, zato je treba pri projektiranju trase, izbiri vgrajenih materialov in opreme upoštevati dovoljene sile ter način vleke.

Pri obeh analiziranih kablil proizvodjalec navaja največjo dovoljeno vlečno silo 12.000 N. Sila se nanaša na vodnik in velja pri vleki s pomočjo vlečne nogavice in pri neposredni vleki s pomočjo zatezne sponke na vodnike, pri čemer mora biti v obeh primerih zagotovljena enakomerna porazdelitev sile.

Tip kabla [mm ²]	Natezna sila [N]	Natezna sila [N]	Teža [kg/km]
	<i>s pomočjo sponke</i> $F_{max} = 50 * 240 \text{ mm}^2$	<i>s pomočjo vlečne nogavice</i> $F_{max} = 5 * (40 \text{ mm})^2$	
N2XS(FL)2Y 1x240/25 RM	en kabel = 12.000 sistem treh kablov = 36.000	en kabel = 8.000 sistem treh kablov = 24.000	3175 (1 x 240 mm ²) 9525 (3 x 240 mm ²)

*Tabela 7: Izračun vlečne sile za SN KB N2XS(FL)2Y 1X240/25 RM
(Vir: Elektro Ljubljana, 2024)*

Tip kabla [mm ²]	Natezna sila [N]	Natezna sila [N]	Teža [kg/km]
	<i>s pomočjo sponke</i> $F_{max} = 30 * 400 \text{ mm}^2$	<i>s pomočjo vlečne nogavice</i> $F_{max} = 5 * (45 \text{ mm})^2$	
NA2XS(FL)2Y 1x400/35 RM	en kabel = 12.000 sistem treh kablov = 36.000	en kabel = 10.125 sistem treh kablov = 30.375	2345 (1 x 400 mm ²) 7035 (3 x 400 mm ²)

Tabela 8: Izračun vlečne sile za SN KB NA2XS(FL)2Y 1X400/35 RM
(Vir: Elektro Ljubljana, 2024)

Učinkovitost vleke in dejanska vlečna sila sta močno odvisni od izvedbe EKK. Najbolj optimalne rezultate zagotavlja uporaba EPC cevi (gladke, trde), saj omogoča nižje trenje in bolj stabilno ležišče kabla. V nasprotju z njimi so rebraste cevi tipa GDC bolj mehke, kar povzroča večje trenje, še posebej če podlaga pod cevmi ni popolnoma ravna. Na neravnem terenu se GDC cevi obremenjujejo neenakomerno, kar povzroči, da kabel med vleko skače po dnu cevi, kar dodatno poveča silo in s tem je tveganje za preseganje dopustne sile večje.

Poleg izbire ustrezne cevi je pri vleki nujna uporaba maziva na osnovi silikonskega ali parafinskega gela, ki zmanjša trenje med ovojem kabla in notranjo steno cevi. To še posebej velja v našem primeru, in sicer pri aluminijastem kablu z večjim premerom in togostjo, kjer se trenje akumulira na začetku in koncu trase.

Oba kabla omogočata enakovredno vlečno silo, vendar pa se zaradi razlike v masi, premeru in mehanski togosti v praksi različno obnašata. Cu kabel je težji, vendar bolj kompakten in vodljiv. Al kabel je lažji, a zaradi večjega premera občutljivejši na krivine in trenje v cevi EKK. Pri obeh je za zagotovitev uspešne vgradnje ključno natančno dimenzioniranje trase, izbor cevi, pravilna postavitve vlečnih valjev in uvodnic na lomih ter nadzor vlečne sile. Praktične izkušnje s terena kažejo, da so razlike med teoretično in dejansko silo lahko velike, kar smo analizirali v zaključku poglavja.



*Slika 12: Vleka SN kabla preko uvodnice v kabelskem jašku
(Lastni vir)*

4.3 Termične lastnosti

Termične lastnosti kabla niso določene le z izolacijskim materialom, temveč predvsem z njegovo konstrukcijo in z okoliščinami vgradnje. Pri obeh primerjanih kablích iz navzkrižno zamreženega polietilena XLPE je poleg toplotne odpornosti ključno tudi to, kako kabel, ko je vgrajen, sistemsko odvaja toploto v okolico in kako stabilna ostaja njegova mehanska struktura v različnih okolijskih pogojih.

Na učinkovitost termične disipacije močno vplivata premer kabla in vrsta zaščitnih slojev. Kabel večjega premera, kot je aluminijasti NA2XS(FL)2Y 1X400/35 RM, ima večjo površino za oddajanje toplote, vendar zavzema več prostora, kar lahko v ceveh ali utesnjenih kabelskih jaških ovira naravno hlajenje. V EKK, kjer so kabli pogosto položeni v snopih ali brez zadostne zračnosti, lahko pride do akumulacije toplote, zato mora biti konstrukcija kabla mehansko stabilna tudi pri neenakomernem temperaturnem obremenjevanju.

Poleg geometrije ima pomembno vlogo tudi odpornost proti vlagi. Oba analizirana kabla sta vzdolžno in prečno vodotesna, kar pomeni, da konstrukcija preprečuje prodor vlage, ki bi lahko dolgoročno poslabšala toplotne lastnosti izolacije in povzročila degradacijo materialov. To je še posebej pomembno pri polaganju v cevi brez prezračevanja, kjer se lahko pojavlja kondenz in počasno zadrževanje vlage.

Pri dolgotrajni obremenitvi se lahko kabel segreva neenakomerno – to se še posebej izrazi pri krajših razdaljah ali pri toplotno nehomogenih tleh, zato je pomembno, da je

zasnova kabla toplotno in mehansko stabilna po celotni dolžini in da se med vgradnjo zagotovi primerna globina, razmik med kabli in ustrezna toplotna odpornost nasutja.

Za zanesljivo dolgoročno delovanje kablovoda je torej poleg izbire izolacijskega materiala ključna tudi kakovostna vgradnja z upoštevanjem toplotnih prehodnih pogojev, načinom hlajenja, prezračevanja jaškov in prostorskih pogojev v ceveh. Kjer ti pogoji niso optimalni, lahko že manjša temperaturna akumulacija vpliva na pospešeno staranje izolacije ali mehansko utrujanje zaščitnih slojev kabla.

4.4 Konstrukcijske razlike in vpliv na delovanje

Oba primerjana SN kabla imata enako nazivno napetost, enako izolacijo (XLPE) in podobno zaščitno osnovo, a se konstrukcijsko razlikujeta v nekaj ključnih točkah, ki vplivajo na električno in mehansko delovanje kablovoda. Najpomembnejša razlika je v materialu in preseku vodnika. Kabel N2XS(FL)2Y 1X240/25 RM ima bakren vodnik, medtem ko ima NA2XS(FL)2Y 1x400/35 RM aluminijasti vodnik. Razlog za večji presek aluminijaste izvedbe je v njegovih fizikalnih lastnostih, kajti aluminij ima približno 1,6-krat večjo specifično električno upornost kot baker, zato je za enakovredno prevodnost potreben večji presek.

Ta razlika v vodniku povzroči tudi večji zunanji premer aluminijastega kabla, kar vpliva na vgradnjo EKK, saj zavzame več prostora, poveča togost in otežuje upogibanje. Pri trasi z večjim številom lomov ali pri vgradnji v cevi z omejenim notranjim premerom (npr. cev GDC 160) to pomeni dodatno obremenitev za ekipo sodelavcev na terenu pri montaži in višje mehanske sile med vleko.

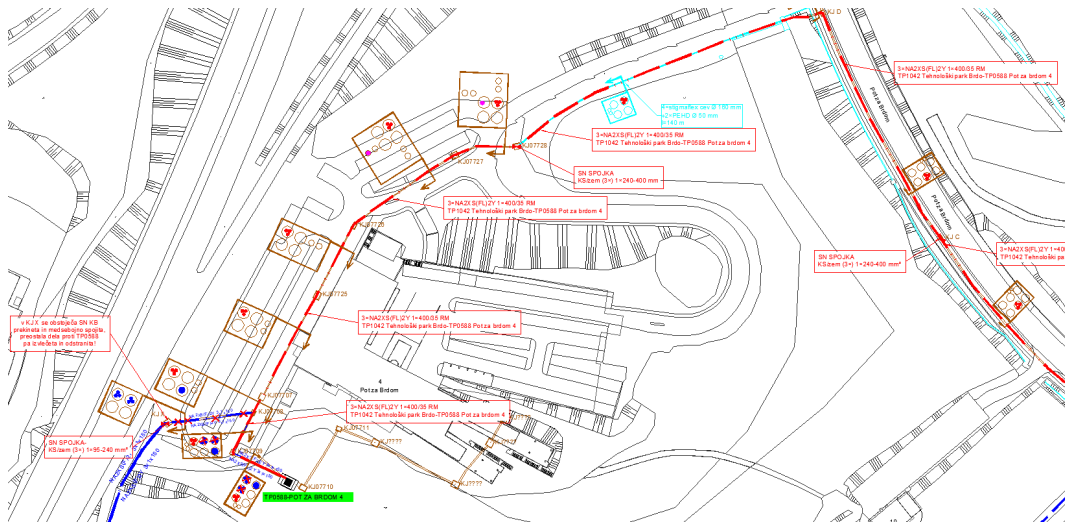
Pomembno konstrukcijsko razliko predstavlja tudi masa kabla, saj je bakreni kabel 830 kg/km težji, kar pomeni večjo obremenitev pri transportu in manipulacijo na gradbišču, vendar pa je zaradi manjšega premera mehansko bolj vodljiv in lažje uvodljiv v cevi EKK in kabelske jaške. Na drugi strani je aluminijasti kabel kljub manjši masi tog in občutljiv za polaganje, kar zahteva bolj natančno načrtovanje trase.

Na delovanje sistema vplivajo tudi razlike v tokovni gostoti, saj je pri aluminijastem vodniku za isto obremenitev večja površina za prenos toka. To pomeni nekoliko drugačno segrevanje v dinamičnih obremenitvah, ki je povezano s toplotnim tokom skozi izolacijo in zaslon. V praksi to vpliva tudi na merjenje napetostnega padca in končno energetska učinkovitost celotnega kablovoda.

4.5 Praktična ocena uporabe kabla NA2XS(FL)2Y 1x400/35 RM

V okviru iskanja cenovno učinkovite alternative bakrenemu SN kablju preseka 240 mm² smo se v podjetju Elektro Ljubljana odločili za poskusno vgradnjo aluminijastega kabla preseka 400 mm², ki po električnih in tokovnih značilnostih

približno predstavlja ekvivalent. Kot primerno lokacijo za izvedbo smo izbrali traso med transformatorskima postajama TP0588, Pot za Brdom 4, in TP1042, Tehnološki park Brdo, kjer se je zaradi razširitve avtomobilske polnilne infrastrukture podjetja Tesla pojavila potreba po večji priključni moči.



Slika 13: Načrt predvidenega stanja prvega dela trase novega kablovoda
(Vir: Elektro Ljubljana, 2024)

Trasa med obema transformatorskima postajama v dolžini 997 metrov s petnajstimi vmesnimi kabelskimi jaški je bila izvedena z uporabo tridelne delitve in dvema kompletoma vmesnih spojk, približno na tretjinah, kar je omogočilo lažjo logistiko vleke. Kabel je bil položen v EKK s premerom cevi 160 mm, z uporabo vlečne nogavice in vitla Bagela KW 4000, pri čemer so bili kabli položeni v trikot postavitvi – trije kabli v eno cev. Zaradi skupnega vleka treh kablov naenkrat se je skupni premer močno povečal, prav tako pa so se bistveno povečale mehanske sile, zlasti na mestih, kjer je kabel potekal skozi 90-stopinjske zavoje v kabelskih jaških. Ti so predstavljali najtežje točke vgradnje, saj so se sile povečale kljub uporabi maziva in so se močno približale mejnim vrednostim vlečnih sil. Praktična izkušnja jasno kaže, da bi bilo v takšnih jaških smiselno načrtovati vgradnjo spojk, kar bi razbremenilo vlečno silo in omogočilo boljši nadzor nad radijem krivljenja.



*Slika 14: Namestitev vlečne nogavice na SN kabel NA2XS(FL)2Y 1x400/35 RM
(Lastni vir)*

Med izvedbo je bilo opaženo, da so se trde cevi tipa EPC bistveno bolje obnesle kot rebraste cevi GDC. EPC cevi so bolj toge, omogočajo bolj raven potek in manjši vertikalni zamik med jaški, kar vodi v manj trenja med vleko. Poleg tega se EPC cevi zaradi večje togosti manj deformirajo ob zasutju, kar zmanjšuje mehanske napetosti na kabel. V obravnavani trasi so bile uporabljene le cevi premera 160 mm, kar je sicer še ustrezno, vendar bi v praksi za kabel 400 mm² predvsem v primeru neidealno izvedene EKK, priporočili uporabo cevi premera 200 mm, ki bi omogočale lažje uvajanje kabla in več rezervnega prostora za manevriranje. Pri podatkih o premerih cevi ne smemo pozabiti, da so to zunanji premeri cevi. Tako ima cev EPC 160 notranji premer 152 mm, rebrasta cev GDC 160 z dvema stenama pa ima notranji premer samo 138 mm, kar močno oteži vleko kabla.

V zaključnem delu gradnje so se pojavile tudi težave pri izvedbi vmesnih kabelskih spojk, saj je bil prvotno predviden jašek premajhen za ustrezno izvedbo, kar je zahtevalo dodatna gradbena dela in je podaljšalo rok izvedbe. Opaženo je bilo tudi, da je v priključnih vodnih celicah SN postroja kabel težko uvodljiv zaradi večjega

premera in togosti, saj so kabli po uvajanju utesnjeni in je izdelava kabelskih končnikov za priklop v celico tehnično zahtevna.



*Slika 15: Priklop NA2XS(FL)2Y 1x400/35 RM v SN postroj in izvedba meritev
(Lastni vir)*

4.6 Sklepna ugotovitev

Na podlagi izvedene poizkusne gradnje in zbranih praktičnih izkušenj lahko ocenimo, da je aluminijasti kabel NA2XS(FL)2Y 1x400/35 RM primeren za uporabo v distribucijskem SN omrežju, vendar pogojno, Ključni pogoji za uspešno in tehnično smiselno uporabo kabla so:

- ustrezna trasa, brez ostrih lomov in prostorsko prilagojenimi jaški;
- čvrsta, togo izvedena EKK, pomožno z uporabo EPC cevi;
- razdelitev trase na optimalne dolžine in primerno izbrana mesta za spojke;
- zadostna kadrovska in tehnična podpora pri izvedbi del;
- upoštevanje dodatnih logističnih zahtev.

Pri tem je treba poudariti, da je zaradi večjega preseka aluminijastega kabla tudi transportni boben večji, kar zahteva bolj zahtevno manipulacijo na gradbišču, uporabo zmogljivejše dvižne opreme in več prostora za odvijanje. V praksi to pomeni dodatno usklajevanje z drugimi izvajalci in vnaprej prilagojene dostopne poti.

Ker podjetje Elektro Ljubljana ne opravlja le gradnje omrežja, temveč tudi dolgotrajno vzdrževanje distribucijskega omrežja, je treba v primeru uvajanja novega tipa kabla zagotoviti ustrezne zaloge spojk in kablskih končnikov za morebitno hitro odpravo napak – defektov. V primeru poizkusne gradnje to pomeni, da je bilo treba zagotoviti dodatne količine materiala za intervencije, kar vpliva na nabavno in skladiščno politiko. To je pri posebnih presekih, kot je 400 mm², še posebej pomembno, saj material zanje ni tako standardiziran kot za bakrene kable preseka 240 mm², ki jih uporabljamo redno.

Skupna ugotovitev kaže, da je aluminijasti kabel preseka 400 mm² uporaben v pogojih, kje je trasa ravna, tehnično predvidljiva in ekonomsko upravičena, vendar pa uvajanje takšnih rešitev zahteva celostno logistično in vzdrževalno podporo, če želimo zagotoviti dolgoročno varno in zanesljivo obratovanje omrežja. V nasprotnem primeru pa bakreni kabel še vedno ostaja bolj zanesljiva izbira zaradi večje mehanske prilagodljivosti, lažje izvedbe priključkov in standardizirane opreme. Krajši ekonomski pogled na zamenjavo kabla je predstavljen v zadnjem delu diplomskega dela.

Z izvedbo poskusne uporabe aluminijastega SN kabla, preseka 400 mm², smo v podjetju Elektro Ljubljana pridobili pomembne praktične izkušnje obnašanja kabla v realnih razmerah, vendar smo za celovito tehnično presojo novega kabla poleg izkušenj potrebovali tudi laboratorijsko potrditev njegove kakovosti, saj mora kabel izpolnjevati vse zahteve za dolgoročno zanesljivo in varno obratovanje v distribucijskem omrežju.

V podjetju imamo že opravljen uraden preizkus za bakreni kabel N2XS(FL)2Y 1x240/25 RM, izveden na Inštitutu Milan Vidmar (EIMV) leta 2022. Da bi primerjavo dopolnili s podatki o nadomestni aluminijasti izvedbi, smo letos naročili še laboratorijsko testiranje kabla NAXS(FL)2Y 1x400/35 RM, pri katerem smo bili tudi prisotni. V naslednjem poglavju je prikazano, kako se takšen preizkus izvede, kateri parametri se preverjajo in kaj rezultati pomenijo za tehnično ustreznost kabla pred vključitvijo v obratovanje.

5 LABORATORIJSKI PREIZKUS KABLA NA2XS(FL)2Y 1X400/35 RM

Zanesljivo in varno obratovanje SN distribucijskega omrežja je tesno povezano s kakovostjo vgrajenih kablov, zato je poleg načrtovanja in pravilne vgradnje ključnega pomena neodvisna laboratorijska potrditev njihovih električnih in mehanskih lastnosti. V okviru poskusne vgradnje aluminijastega SN kabla, preseka 400 mm² in diplomskega dela je bil na Elektroinštitutu Milan Vidmar (EIMV) izveden laboratorijski preizkus električnih in mehanskih lastnosti tega kabla. Preizkus bakrenega kabla, preseka 240 mm², pa je podjetje Elektro Ljubljana opravilo leta 2022, in sicer prav tako na EIMV.

EIMV kot osrednja nacionalna raziskovalna in preizkusna ustanova na področju elektroenergetike s svojo akreditirano infrastrukturo zagotavlja tehnično strokovnost, sledljivost in skladnost preizkusov z mednarodnimi standardi. Njihov laboratorij za visoke napetosti izvaja številne meritve v skladu s standardi IEC 60228, IEC 60060, IEC 60502-2 in drugimi, kar predstavlja temelj za objektivno presojo kakovosti kablov in njihove ustreznosti za uporabo v slovenskem distribucijskem sistemu.

V nadaljevanju so predstavljeni posamezni preizkusi, uporabljena merilna oprema, preskusne metode in rezultati, ki so bili zabeleženi pri obeh tipih kablov. Takšna primerjalna analiza služi kot osnova za oceno zamenjave bakrenih vodnikov z aluminijastimi v realnih obratovalnih pogojih.

5.1 Meritev specifične upornosti vodnika in ekrana

Namen teh meritev je preveriti specifično električno upornost kovinskih komponent kabla, in sicer vodnika in kovinskega zaslona (ekrana). Ti dve vrednosti bistveno vplivata na prevodnost, toplotne izgube in zaščitno funkcijo kabla, še posebej pri kratkih stikih in prenapetostih. Meritev je še posebej pomembna pri primerjavi bakrenega in aluminijastega vodnika, saj se materiala med seboj močno razlikujeta.

Za meritev je bila uporabljena štiritočkovna metoda, pri kateri se skozi testni vzorec kabla sproži enosmerni tok. Za preizkus upornosti vodnika znaša ta tok 25 A, za zaslon pa 10 A. Vrednosti so bile nato preračunane na temperaturo 20 °C in standardno dolžino 1 km, v skladu z zahtevami IEC 60228.

Tip kabla [mm ²]	Material	Specifična upornost vodnika		Specifična upornost ekrana	
		Izmerjena vrednost [Ω/km]	Meja po standardu [Ω/km]	Izmerjena vrednost [Ω/km]	Meja po standardu [Ω/km]
N2XS(FL)2Y 1x240/25 RM	Al	0,0749	0,0754	0,674	/
NA2XS(FL)2Y 1x400/35 RM	Cu	0,0761	0,0778	0,524	0,524

Tabela 9: Specifična upornost vodnika in ekrana
(Vir: EIMV, 2022, 2025)

Oba vodnika ustrezata zahtevam standarda. Aluminijasti kabel ima nekoliko višjo specifično upornost vodnika, vendar je to pričakovano in je z večjim presekom kompenzirano. Enako velja za specifično upornost ekrana, kar je posledica nekoliko večjega skupnega preseka zaslonkih vodnikov. Bakreni kabel ima presek ekrana 25 mm², aluminijasti pa ima po meritvah v laboratoriju presek ekrana 37,36 mm² in je sestavljen iz petdesetih žic, debeline 0,94 mm. Rezultati meritev potrjujejo, da sta oba vodnika izdelana kakovostno in v skladu s tehničnimi specifikacijami.

5.2 Meritev izolacijskih lastnosti: izolacijska upornost, kapacitivnost in dielektrične izgube

Ocena izolacijskih lastnosti SN kabla vključuje več ključnih parametrov, med katerimi sta izolacijska upornost in faktor dielektričnih izgub glavne izolacije tan δ , ki je najpomembnejša za dolgoročno zanesljivost izolacije. Meritev kapacitivnosti dodatno omogoča ovrednotenje geometrije kabla in homogenosti izolacije. Kombinacija vseh treh parametrov daje celostno sliko o kakovosti in stabilnosti XLPE izolacije ter njeni primernosti za obratovanje pri nazivni napetosti.

Meritev izolacijskih upornosti se opravi na vzorcu kabla pri enosmerni napetosti 5 kV v trajanju 10 minut med vodnikom in kovinskim zaslonom. V času meritev se izolacija upornost odčita v prvi, tretji, peti, sedmi in deseti minuti.



*Slika 16: Izvedba izolacijskih meritev na EIMV
(Lastni vir)*

Tip kabla [mm ²]	R _{1 min} [GΩ]	R _{3 min} [GΩ]	R _{5 min} [GΩ]	R _{7 min} [GΩ]	R _{10 min} [GΩ]
N2XS(FL)2Y 1x240/25 RM	340	470	850	990	1.140
NA2XS(FL)2Y 1x400/35 RM	5.500	6.800	8.900	9.300	9.500

*Tabela 10: Meritve upornosti glavne izolacije
(Vir: EIMV, 2022, 2025)*

Rezultati pri aluminijastem kablu presegajo upornost 9 TΩ, kar kaže na zelo kakovostno in suho izolacijo. Bakreni kabel ima nižjo upornost, a še vedno zadostuje tehničnim kriterijem.

Meritve kapacitivnosti in faktorja dielektričnih izgub glavne izolacije se merijo med vodnikom in kovinskim zaslonom s tipičnim razponom $0,8 / 1,0 / 1,2 \cdot U_n$ ($f = 50$ Hz).

Pri analizi merilnih poročil iz leta 2022 in 2025 je zaznati določene razlike v postopkih meritev kapacitivnosti in faktorja dielektričnih izgub $\tan\delta$, ki so posledica različnih tehničnih okoliščin in pristopov preizkušanja. Leta 2022 so bile meritve na bakrenem kablu N2XS(FL)2Y 1x240/35 RM izvedene pri napetostih 9,6 kV, 12 kV in 14,4 kV, kar pa ustreza približno $0,8 / 1,0 / 1,2$ -kratniku njegove nazivne napetosti ($U_n = 12/20$ kV). Leta 2025 pa so bile meritve za aluminijasti kabel NA2XS(FL)2Y 1x400/35 RM opravljene pri višjih napetostih – 16 kV, 20 kV in 24 kV, vendar so bile izbrane po enakem razmerju glede na nazivno napetost kabla. Namen obeh pristopov je bil enak, in sicer opazovanje obnašanja izolacije pod obremenitvijo v tipičnem obratovalnem okolju, vendar je bilo to leta 2025 usmerjeno v bolj poglobljeno tehnično validacijo novega aluminijastega kabla, kar se odraža v višjih napetostnih nivojih in nekoliko širšem naboru spremljanih parametrov. Pomembno je poudariti, da so v obeh primerih upoštevani ustrezni standardi (IEC 60228, IEC 60502-2 in SIST HD 620) in da so meritve kljub razlikam v absolutnih vrednostih metodološko primerljive.

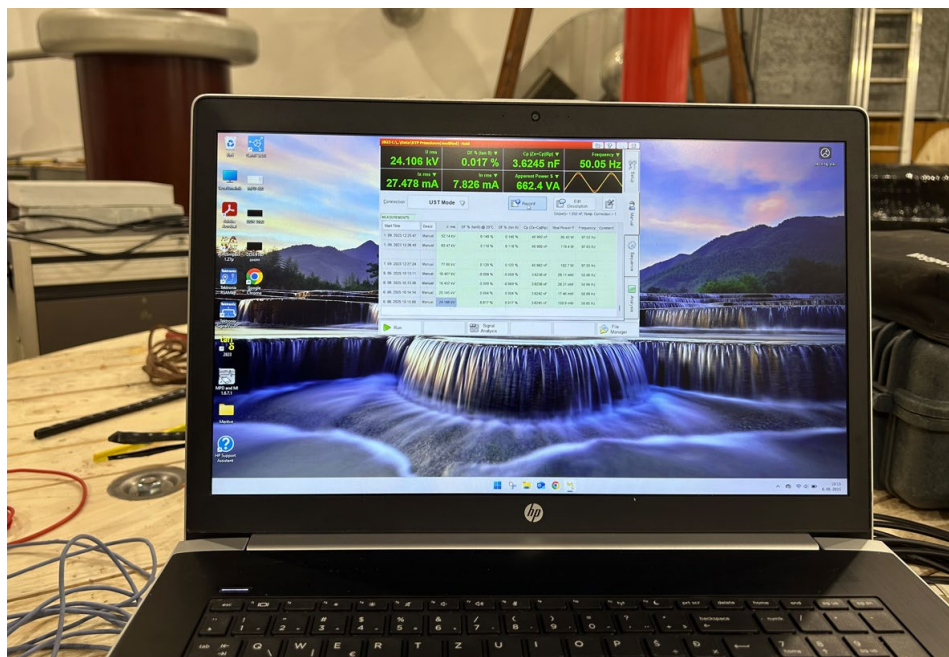
Preizkusna napetost [kV]	9,6	12	14,4
Faktor dielektričnih izgub $\tan\delta$ [%]	0,007	0,010	0,012
Kapacitivnost C_x [nF]	3,516	3,518	3,519

Tabela 11: Rezultati meritev faktorja dielektričnih izgub $\tan\delta$ in kapacitivnost na bakrenem kablu N2XS(FL)2Y 1x240/25 RM
(Vir: EIMV, 2022)

16 kV		20 kV		24 kV	
C_x [nF]	$\tan\delta$ [%]	C_x [nF]	$\tan\delta$ [%]	C_x [nF]	$\tan\delta$ [%]
3,6238	0,009	3,6242	0,004	3,6245	0,017

Tabela 12: Rezultati meritev faktorja dielektričnih izgub $\tan\delta$ in kapacitivnost na aluminijastem kablu NA2XS(FL)2Y 1x400/35 RM
(Vir: EIMV, 2025)

Kapacitivnost obeh kablov je zelo podobna, kar kaže na ustrezno razmerje med vodnikom in zaslonom ter homogeno debelino izolacije. Aluminijasti kabel dosega boljše vrednosti $\tan\delta$ (0,004 %), kar pomeni nižje dielektrične izgube in manjšo verjetnost staranja materiala zaradi toplotnega segrevanja.



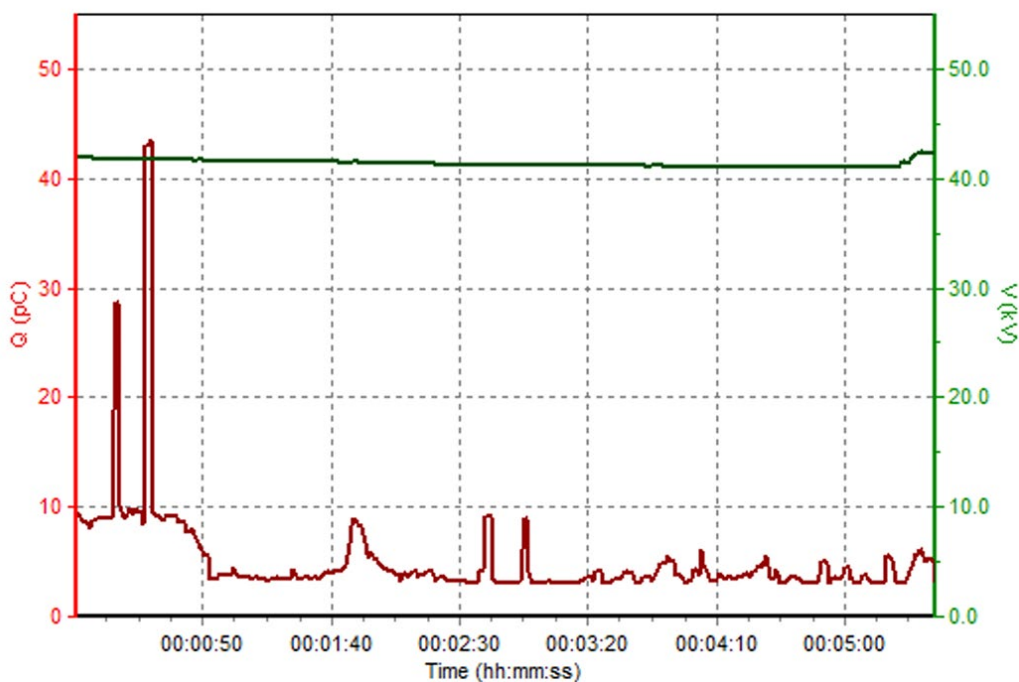
*Slika 17: Merjenje tanδ na EIMV
(Lastni vir)*

Meritve potrjujejo, da imata oba kabla ustrezne izolacijske lastnosti, vendar aluminijasti kabel izkazuje boljše rezultate pri kapacitivnosti in tudi pri tanδ, kar kaže na izredno kakovost izolacije. To daje dodatno tehnično potrditev, da je aluminijasti kabel z vidika izolacijske zmogljivosti primeren nadomestek bakrenega kabla.

5.3 Napetostni preizkus glavne izolacije

Napetostni preizkus glavne izolacije je osnovni preizkus za potrditev dielektrične trdnosti kabla. Z njim se preveri, ali izolacijski sistem prenese napetosti, ki so bistveno višje od obratovalnih. Ta preizkus je obvezen del tipskih in rutinskih preizkusov, ki jih določa standard IEC 60502-2, in je pogosto del internega zagotavljanja kakovosti proizvajalca kabla.

Preizkus se izvede z izmenično napetostjo pri frekvenci 50 Hz med vodnikom in ozemljenim kovinskim zaslonom. Na oba konca kabla se namestijo protikoronske elektrode, vzorec pa se potopi v izolacijsko olje, da se prepreči površinsko prebijanje. Napetost se postopoma dvigne na preizkusno vrednost 42 kV, kar predstavlja približno $2,1 \cdot U_n$, nato pa se ohranja 5 minut.



Slika 18: Časovni potek napetostnega preizkusa glavne izolacije na kablu
NA2XS(FL)2Y 1x400/35 RM
(Vir: EIMV, 2025)

V obeh primerih je kabel uspešno prestal preizkus brez pojave preboja ali delnih razelektritev nad dopustno mejo. Rezultati potrjujejo, da je glavna izolacija izvedena kakovostno in ustreza zahtevam za obratovanje v SN omrežju z nazivno napetostjo 20 kV.

5.4 Meritve delnih razelektrenj glavne izolacije

Meritev delnih razelektrenj (PD – angl. *Partial Discharge*) je ena ključnih metod za ugotavljanje prisotnosti notranjih napak v izolaciji, kot so mikroskopske zračne votline, tujki, vlaga ali nehomogenost materiala. Čeprav take napake morda še ne povzročijo takojšnjega preboja, dolgoročno vodijo v staranje izolacije in zmanjšanje zanesljivosti kabla. Meritev delnih razelektrenj je zato bistvenega pomena pri tehnični presoji kakovosti kabla pred vgradnjo v obratovano omrežje.

Meritev se izvaja z izmenično napetostjo frekvence 50 Hz med vodnikom in zaslonom. Kabelski vzorec je opremljen s protikoronskimi elektrodami in potopljen v izolacijsko olje, kar je standardna metoda za preprečevanje vpliva korone na priključnih mestih. Pod pojmom korona si predstavljamo pojav delnih razelektritev v zraku in se pojavi kot neki svetleč rob s šumenjem in oddajanjem UV sevanja.

Po 10-sekundni pripravi pri višji napetosti (24 kV) se napetost zniža na preizkusno raven 20,7 kV, pri kateri se izvede glavna nekajminutna meritev.

Pri obeh kablh so bile izmerjene vrednosti delnih razelektretev pod pragom šuma merilnega sistema (> 5 pC), kar pomeni, da ni zaznati nobenih lokalnih napak v izolaciji. To kaže na kakovostno proizvodnjo, dobro zamreženost izolacijskega materiala in ustrezno sušenje materiala po ekstruziji.

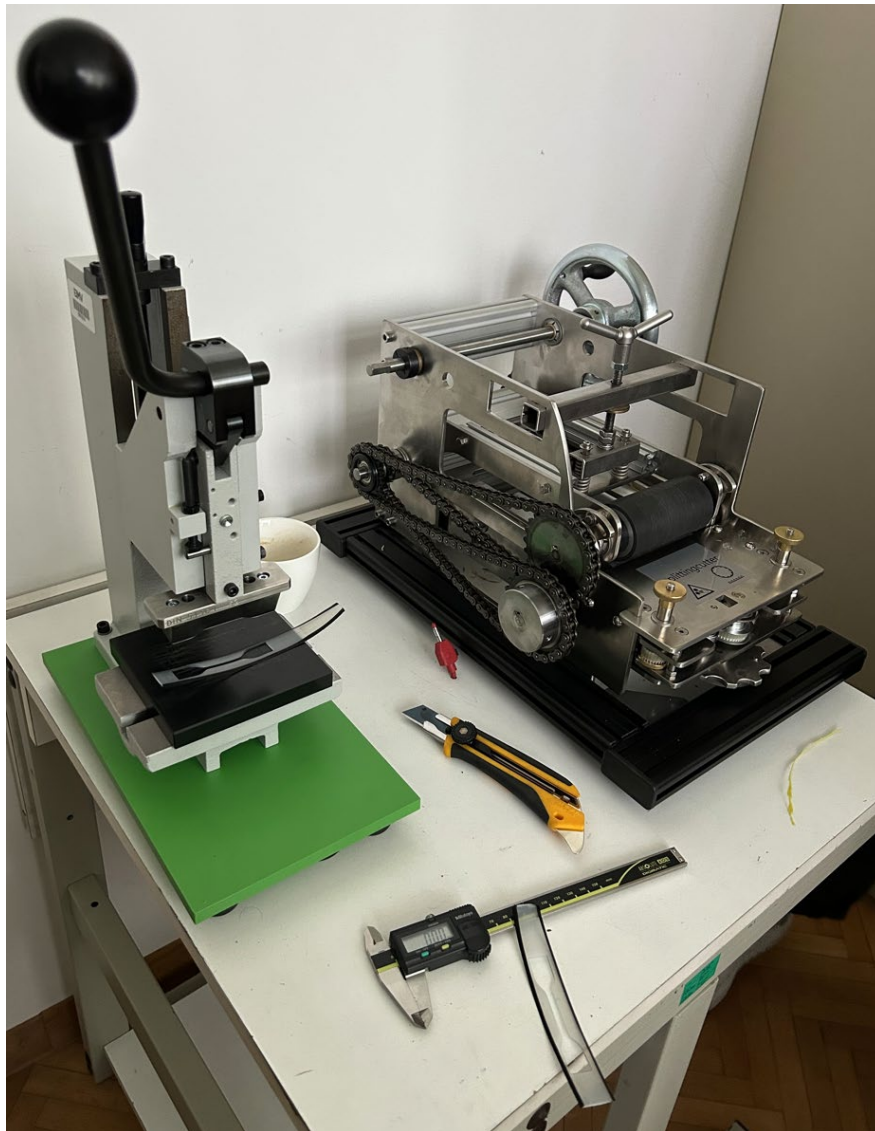


Slika 19: Izvedba meritev delnih razelektrenj glavne izolacije na EIMV
(Vir: EIMV, 2025)

5.5 Termični preizkusi XLPE izolacije in zunanje HDPE plašča

Kakovost toplotne stabilnosti kabelskih materialov, kot sta XLPE izolacija in zunanji HDPE plašč (angl. *High – Density Polyethelene*), je bistvenega pomena za dolgoročno zanesljivo obratovanje SN kabla. Pri obremenitvah v omrežju, še posebej med preobremenitvami in kratkimi stiki, se temperatura kabla lahko močno poveča, zato je treba s termičnimi preizkusi preveriti, ali material pri visokih temperaturah ohranja svoje mehanske in izolacijske lastnosti.

Pri termičnem preizkusu, ki se imenuje »Hot set test«, opravimo natezni preizkus XLPE izolacije pri temperaturi 200 °C. Iz XLPE izolacije izrežemo dva trakova v obliki vesla z debelino 2 mm, širino 4 mm in z 20 mm dolgim merilnim delom. Preizkušane vzorce nato vpneemo v ustrezne nosilce, postavimo v sušilnik z nastavljenjo temperaturo 200 °C za 10 minut in jih natežno obremenimo s silo 0,2 MPa (200.000 N/m²). Tako simuliramo, kako se izolacija obnaša pri visokih temperaturah, ko nanjo pritiska mehanska napetost (npr. lastna teža vodnika). Po obremenitvi se izmeri raztezek (elongacija), nato pa se vzorec izolacije razbremeni in ohladi na sobno temperaturo. Ko je vzorec ohlajen, se ga ponovno izmeri in določi deformacijo preizkušanca. Mejne vrednosti so določene s standardom IEC 60811-507.



*Slika 20: Naprava za pripravo vzorcev za izvedbo nateznih preizkusov
(Lastni vir)*

Oba kabla sta izkazala visoko termično stabilnost izolacije, kar kaže na kakovostno zamreženje XLPE materiala. Raztezek XLPE izolacija bakrenega kabla N2XS(FL)2Y 1x240/25 RM pri 200 °C je znašal 64 %, aluminijastega kabla NA2XS(FL)2Y 1x400/35 RM pa je znašal 19 %. Pri izvedbi ponovnih meritev po ohladitvi na sobno temperaturo pa je meritev deformacije vzorca pokazala, da je raztezek vzorca bakrenega kabla znašal 1 %, aluminijastega pa 3,7 %. Deformacije so znotraj strogih meja standarda, kar je pomembno za ohranitev mehanske trdnosti izolacije tudi pri izrednih termičnih obremenitvah.



*Slika 21: Izvedba nateznega preizkusa XLPE izolacije
(Lastni vir)*



*Slika 22: Odčitavanje raztezka XLPE izolacije
(Lastni vir)*

Drugi termični preizkus pa je preizkus krčenja zunanjšega plašča HDPE, ki se opravi v skladu s standardom HD 605-S2. Pri tem preizkusu se najprej odreže vzorec primerne dolžine, približno 400 mm in se točno izmeri. Nato se vzorec postavi v grelno komoro, segreto na 80 °C v trajanju 5 ur, potem sledi ohlajevanje na sobno temperaturo. Cikel segrevanja in ohlajevanje se ponovi štirikrat. Po zadnji ohladitvi na sobno temperaturo se vzorec ponovno izmeri in odčita se skrček materiala.

Aluminijasti kabel izkazuje zelo nizko vrednost skrčka HDPE plašča (1 mm), kar nakazuje visoko dimenzijsko stabilnost materiala in odpornost na toplotno staranje. Bakreni kabel ima nekoliko večjo vrednost (3 mm), vendar še vedno znotraj dopustnih meja. Mejna vrednost po standardu znaša 5 mm na 500 mm dolžine vzorca. Stabilen plašč je pomemben za mehansko zaščito kabla in ohranjanje strukture v času obratovanja.

5.6 Sklepna ocena rezultatov meritev

Rezultati laboratorijskih preizkusov, izvedenih na EIMV, predstavljajo ključno strokovno podlago za oceno kakovosti SN kablov obeh analiziranih tipov – bakrenega N2XS(FL)2Y 1x240/25 RM in aluminijastega NA2XS(FL)2Y 1x400/35 RM. Vsi opravljeni testi, vključno z merjenjem specifične upornosti, izolacijskih lastnosti, delnih razelektritev, dielektričnih izgub, mehanskih dimenzij in toplotne stabilnosti so pokazali, da oba kabla v celoti izpolnjujeta tehnične zahteve po standardih.

Posebej pomembno je, da je aluminijasti kabel dosegel, enakovredne ali celo boljše rezultate na področju izolacijske upornosti, dielektričnih izgub in toplotne stabilnosti HDPE plašča. S tem se potrjuje, da je lahko kabel z aluminijastim vodnikom ob ustrezno povečanem preseku tehnično popolnoma ustrezen nadomestek za bakreni kabel v SN distribucijskem omrežju. Laboratorijski podatki tako podpirajo praktične izkušnje iz poskusne gradnje in so ključni del tehnične presoje uvedbe aluminijastega kabla večjega preseka kot alternativa bakrenemu.

6 EKONOMSKA ANALIZA

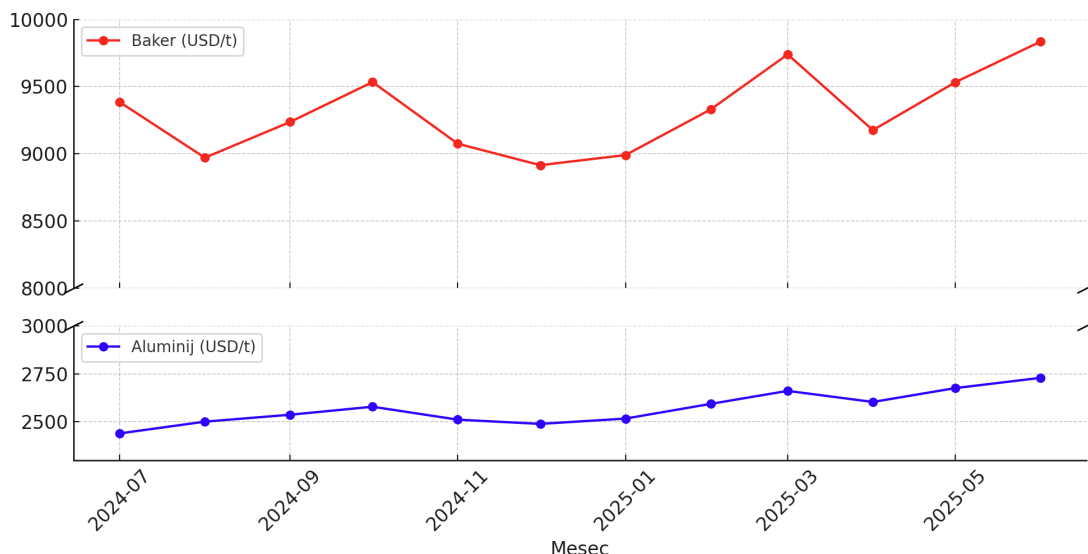
6.1 Gibanje in struktura cen bakra in aluminija na svetovnem trgu

Pri analizi ekonomskih razlogov za uporabo aluminijastih kablov namesto bakrenih je treba najprej razumeti ozadje gibanja cen osnovnih kovin. Cena materiala za vodnik predstavlja najpomembnejši del nabavne vrednosti kabla, zato je njen vpliv neposreden. Eden glavnih globalnih virov za določanje cen teh surovin je angleška borza London Metal Exchange (LME), ki velja za največjo svetovno borzo industrijskih kovin. Na njej se vsakodnevno določajo referenčne cene bakra, aluminija, cinka, niklja in drugih pomembnih industrijskih kovin, pri čemer LME ne služi le kot trg, ampak tudi kot mehanizem za stabilne tržne pogoje (angl. *hedging*), ki prispeva k bolj predvidljivemu načrtovanju investicij in s tem ščiti kupce pred nenadnim skokom tržnih cen kabla.

V elektroindustriji je borza LME še posebej pomembna, saj elektroenergetski kabli predstavljajo enega največjih porabnikov bakra in aluminija v industriji nasploh, še posebej baker. Cene, ki se oblikujejo na LME, neposredno vplivajo na ponudbene pogoje proizvajalcev kablov in s tem na ceno kabelskega materiala za distribucijska podjetja. V Sloveniji in EU se skoraj vse cene SN kablov oblikujejo na osnovi mesečnega povprečja LME cen, kar pomeni, da tudi mala nihanja na borzi pomembno vplivajo na končno vrednost prodajnih cen kablov.

V času pisanja diplomskega dela (julij 2025) se borzna cena bakra giba okoli 9500 USD/t, cena aluminija pa okoli 2200 USD/t. Vse cene na borzah se izražajo v dolarjih (USD) na tono (t), saj se dolar obravnava kot rezervna svetovna valuta, ki ga centralne banke in države hranijo kot glavno valuto za mednarodne transakcije. Razlika v ceni med bakrom in aluminijem je torej več kot štirikratna.

Čeprav aluminij za enako električno prevodnost zahteva večji presek, se končna cena aluminijastega vodnika v kablu še vedno izkaže za znatno nižjo. Posledično je tudi končna cena aluminijastega SN kabla z večjim presekom še vedno nižja kot cena primerljivega bakrenega kabla z manjšim presekom. Okvirna cena bakrenega XLPE SN kabla preseka 240 mm² se giblje okoli 32 €/m, medtem ko je cena aluminijastega XLPE SN kabla okoli 13 €/m. Točna cena je odvisna od količine, dobavitelja, pogojev pogodbe in trenutnih borznih trendov, zato te verjetnosti služijo le kot ocenjen tržni okvir, ki ponazarja razliko in ekonomski potencial zamenjave.



Slika 23: Povprečna cena bakra in aluminija v zadnjem letu
(Lastni vir)

6.2 Stroški polaganja in vpliv na izvedbo projekta

Čeprav aluminijasti kabli prinašajo pomembno cenovno prednost pri nabavi, njihova vgradnja v realnih projektih pogojno predstavlja večje tehnične in organizacijske zahteve kot pri bakrenih kablilih. Te razlike se odražajo v stroških gradnje, dodatni potrebni opremi in močno vplivajo na čas in kompleksnost izvedbe, kar se je pokazalo tudi v našem primeru.

Aluminijasti kabel preseka 400 mm² ima večji zunanji premer in večjo togost, kar je krivo za povečanje zahtev glede EKK. Cevi morajo biti premera najmanj 160 mm, v primeru, da gre za gladke cevi tipa EPC. Če se pri polaganju uporabijo narebrene dvostenske cevi tipa GDC, pa je več kot dobrodošlo, da se uporabijo cevi premera 200 mm, saj ima GDC cev manjši notranji premer kot gladka EPC cev. EPC cev ima premer stene 4,7 mm, gladka cev GDC pa ima premer stene kar 12 mm, kar pomeni, da so gladke cevi veliko bolj primerne od narebrenih, saj nudijo večji notranji premer, manjši upor in so mehansko stabilnejše. Neustrezen teren ali stisnjene cevi lahko povzročijo zvišanje vlečne sile, kar povečuje tveganje za poškodbe kabla in oteži izvedbo.

Pri izvedbi poizkusne gradnje, kjer smo uporabili kabel NA2XS(FL)2Y 1x400/35 RM, je bilo ugotovljeno, da je polaganje tehnično zahtevno predvsem tam, kjer je bila uporabljena narebrena cev in v jaških, kjer se spreminja smer vleke kabla, saj je vlečna sila močno narasla. V takem primeru je treba z vleko ravnati preudarno, imeti na voljo več delavcev za usmerjanje kabla in predvideti spojke v jaških, kjer se sila

najbolj poveča. Pri poskusni gradnji se je v enem od jaškov izkazalo, da ni bilo dovolj prostora za poravnavo kabla z ustreznim radijem in izdelavo spojke, zato je bilo treba jašek gradbeno povečati, kar je povzročilo zamik del in dodatne stroške.

Ne smemo pa mimo potrebne opreme za vleko kablov in logističnih zahtev. Za polaganje kabla je poleg primerne vlečne naprave treba imeti tudi ustrezne kabelske valje in uvodnice, po katerih poteka kabel v fazi polaganja. V našem primeru se je pokazalo, da so standardni vlečni valji, ki jih redno uporabljamo pri vleki kabla, nekoliko preozki za kabel preseka 400 mm². Pri vleki namreč obstaja večja verjetnost, da kabel zdrsne z valja, kar pomeni povečano tveganje za poškodbe plašča. To pomeni, da bi bilo za sistematično uporabo kablov večjega preseka v omrežju treba posodobiti del vlečne opreme, kar vključuje širše valjčke, dodatne zaščitne elemente, ki morajo biti skonstruirani za predvidene vlečne sile.

Poleg stroškov vgradnje je treba pri ekonomskem vrednotenju upoštevati tudi zahteve za zagotavljanje zaloge kabelske opreme za primer napak, poškodb ali intervencijskih posegov v omrežje. V distribucijskih podjetjih moramo imeti na stalni zalogi ustrezno število kabelskih spojk in končnikov, ki so specifični za posamezen tip in presek kabla. V primeru mehanske poškodbe kabla s strani tretje osebe (npr. pri gradbenih delih), defekti na kablovodu ali v primeru rekonstrukcije, mora biti možno takoj dostopati do nadomestnih komponent, saj je za zanesljivo oskrbo ključna časovna odzivnost.

Aluminijasti kabel preseka 400 mm² zahteva uporabo posebnih tipov spojk in končnikov, ki so konstrukcijsko in materialno različni od tistih, ki se uporabljajo pri bakrenih vodnikih. To pomeni, da mora podjetje za potrebe vzdrževanja vzpostaviti ločeno zalogo kabelske opreme, kar povečuje stroške skladiščenja, nabave in interne logistike.

Skupno gledano aluminijasti kabli kljub nižji ceni materiala predstavljajo večji tehnični izziv pri izvedbi, kar neposredno vpliva na višjo ceno montaže na meter kabla. Če trasa ni ravna, EKK ni ustrezno pripravljena ali če izvajalec del nima prilagojene delovne opreme in ekipe, se lahko prihranki pri nabavi hitro izničijo, zato mora biti ekonomika vedno obravnavana v kontekstu trase in zmožnosti izvajalca, ne zgolj na podlagi cene kabla na meter.

6.3 Obratovalni stroški in dolgoročna učinkovitost

Pri izbiri med bakrenim in aluminijastim kablom ni pomembna zgolj razlika v začetni investiciji, temveč tudi stroški, ki nastanejo med dolgotrajnim obratovanjem in vzdrževanjem omrežja. Med te stroške sodijo energetske izgube, zanesljivost kabelskih spojk, zahtevnost vzdrževanja in življenjska doba kabla.

Aluminij ima sicer višjo specifično električno upornost kot baker, kar pomeni, da bi bile električne izgube pri enakem preseku vodnika večje, vendar pa se pri načrtovanju srednjenapetostnega omrežja aluminijasti vodniki običajno dimenzionirajo z večjim presekom, s čimer se ta razlika ustrezno kompenzira. V konkretnem primeru nadomeščanja bakrenega kabla preseka 240 mm² z aluminijastim kablom preseka 400 mm² so izračunane izgube primerljive, saj večji presek aluminija omogoča enakovreden pretok z le malenkost višjo specifično upornostjo.

Za izračun izgub moramo najprej izračunati upornost kabla glede na njegovo dolžino po formuli, ki je navedena v poglavju 4.1.1 – Električna upornost vodnika, kar v našem primeru (997 m kabla) znaša 0,0751 Ω za bakreni vodnik preseka 240 mm² in 0,0775 Ω za aluminijasti vodnik preseka 400 mm². Sledi izračun izgub po formuli:

$$P_{vod} = I^2 * R$$

kjer je:

- P_{vod} – moč izgube v vodniku [Ω],
- I – tok po posamezni fazi [A],
- R – upornost vodnika na dolžino [Ω].

Ker imamo trifazni sistem, moramo moč pomnožiti s 3, da dobimo izgube v celotnem kablovodu. Za informativen prikaz razmerja izgub, si izberemo tok 300 A in tako na koncu dobimo, da izgube v bakrenem vodniku znašajo 20,277 kW, v aluminijastem pa 20,925 kW. Ob upoštevanju 8000 ur delovanja letno to pomeni za približno 5184 kWh več izgub v aluminijastem kablju.

Kljub temu se pri zelo dolgih trasah in ob večjih obremenitvah lahko pojavijo nekoliko višje sistemske izgube, ki v realnih razmerah večinoma ne presegajo dopustnih vrednosti. Pomembno vlogo pri omejevanju izgub ima tudi kakovost izvedbe spojk in pravilna izbira konstrukcijskih elementov, kot so vmesne spojke s prepletanjem ekranov.

Kar zadeva zanesljivosti in kakovosti obratovanja sta oba kabla primerna za dolgoročno obratovanje v distribucijskem omrežju, če so spojke izvedene skladno s tehničnimi navodili proizvajalca. Pri tem ni pomemben le material, temveč predvsem kakovost izvedbe spojke in kabelskih končnikov. Potrebna je natančna montaža po predpisanih korakih, še posebej pa je pomembno, da se spojke izdelajo pri ustreznih pogojih in z zagotovljeno čistočo vseh kontaktnih površin. Napake pri spojki – tako pri bakru kot aluminiju, so najpogostejše posledica slabe priprave, neustreznega orodja, hitenja pri delu in pomanjkljivega nadzora, zato mora biti izvajalec pri obeh tipih kablov enako dosleden.

Dolgoročni obratovalni stroški so torej v veliki meri odvisni od kakovosti izvedbe in organizacije vzdrževanja. Če je projekt ustrezno zasnovan, trasa pravilno pripravljena, spojke strokovno izvedene in je vzdrževalni sistem dobro organiziran, je lahko aluminijasti kabel premera 400 mm² primerljiva rešitev z vidika zanesljivosti in učinkovitosti, z dodatno prednostjo nižje mase in cene. Ključno pa je, da se vse faze – od načrtovanja do izvedbe in nadzora, vodijo dosledno in strokovno.

7 ZAKLJUČEK

Namen diplomskega dela je bil tehnično in ekonomsko oceniti zmožnost zamenjave bakrenega SN kabla preseka 240 mm² z aluminijasto izvedbo preseka 400 mm² v distribucijskem omrežju Elektro Ljubljana. Analiza temelji na primerjavi uradnih tehničnih podatkov, praktičnih izkušenj z vgradnjo in rezultati laboratorijskih preizkusov na EIMV.

S tehničnega vidika je primerjalna analiza pokazala, da aluminijasti kabel NA2XS(FL)2Y 1x400/35 RM dosega električne karakteristike, ki so povsem primerljive z bakrenim kablom N2XS(FL)2Y 1x240/25 RM. Laboratorijski preizkusi, izvedeni na EIMV, so potrdili, da tako bakreni kot aluminijasti kabel izpolnjujeta vse zahteve glede električne, mehanske in izolacijske zanesljivosti, a ima aluminijasti kabel celo malo boljše rezultate. Ključno pri tem je, da so vsi postopki od projektiranja, načrtovanja trase, izbire ustrezne EEK in izvedbe samega polaganja, vključno z izdelavo kablskih spojk in končnikov tehnično dobro pripravljeni in izvedeni. Praksa je pokazala, da kakovostna priprava bistveno vpliva na uspešno izvedbo in dolgoročno zanesljivost obratovanja.

Skupna ekonomska presoja kaže, da je aluminijasti kabel vsekakor finančno ugodnejša izbira v določenih pogojih – predvsem tam, kjer je trasa ravna, tehnično dobro načrtovana in omogoča izgradnjo ustrezne EKK. Pri daljših trasah se razlika v ceni kabla še posebej izrazito pokaže, saj pri več sto metrih ali kilometru dolžine nižja nabavna cena materiala predstavlja znaten delež skupnih stroškov. Tak prihranek lahko za distribucijsko podjetje pomeni povečanje razpoložljivih sredstev, ki jih lahko usmeri v večjo obnovo, širitev ali posodobitev omrežja, s čimer se izboljšuje dolgoročna zanesljivost in kakovost oskrbe z električno energijo. V urbanih okoljih z omejenim prostorom, večjim številom zavojev in zasedenimi jaški pa se zaradi večje zahtevnosti izvedbe skupna cena lahko hitro približa tisti pri bakrenem kablju ali pa jo celo preseže. Odločitev za uporabo aluminija zato zahteva celostno tehnično-ekonomsko presojo že v fazi projektiranja.

Na podlagi celostne tehnične analize, izkušenj iz poskusne vgradnje in pregledane ekonomike ocenjujemo, da je aluminijasti kabel NA2XS(FL)2Y 1x400/35 RM tehnično ustrezna in v določenih primerih tudi ekonomsko upravičena rešitev za nadomeščanje bakrenih kablov N2XS(FL)2Y 1x240/25 RM v SN omrežju. Njegova uporaba je smiselna povsod, kjer projektne razmere omogočajo optimalno izvedbo in kjer lahko s premišljenim načrtovanjem dosežemo prihranek, ki se ne odraža le v investicijskih stroških, temveč tudi v večji širini izvedbenih možnosti. Pomembno pa je, da odločitev za uporabo aluminija temelji na strokovni presoji posamezne trase in ne zgolj na osnovi razlike v ceni.

8 LITERATURA IN VIRI

EIMV. (2022). Interno poročilo: *Poročilo št.: 1058/22 - Poročilo o preizkušanju SN 12/20 kV energetskega kabla XLPE proizvajalca PRYSMIAN, Ltd.* Ljubljana: EIMV

EIMV. (2022). *Smernice in navodila za izbiro, polaganje in prevzem elektroenergetskih kablov nazivne napetosti 1 kV do 110 kV (Novelirana izdaja). Študija št. 2493.*

EIMV. (2025). Interno poročilo: *Poročilo št.: 1061/25.* Ljubljana: EIMV

EIMV. (2025). *Visokonapetostne naprav, elektrarne in ostali energetski objekti.* Pridobljeno 10.7.2025 z naslova <https://www.eimv.si/oddelek-ovnel.html>

Elektro Ljubljana d.d. (2024). Interno gradivo podjetja: *Projekt za izvedbo ELR2 2154-24.* Ljubljana: Elektro Ljubljana d.d.

Elektro Ljubljana d.d. (2025). Interno gradivo podjetja: *Projekt za izvedbo ELR2 2194-25.* Ljubljana: Elektro Ljubljana d.d.

Elektro Ljubljana d.d. (2025). *Letno poročilo družbe Elektro Ljubljana d.d. za leto 2024.* Ljubljana: Elektro Ljubljana d.d.

ELES T-2. (2024). *Načrtovanje in gradnja 20kV kablovodov.* Pridobljeno 3.7.2025 z naslova <https://www.sodo.si/storage/app/uploads/public/665/d6a/6e0/665d6a6e0b9c6149067999.pdf>

ELES T-3. (2024). *Enožilni energetski kabli 12/20/24 kV.* Pridobljeno 2.7.2025 z naslova <https://www.sodo.si/storage/app/uploads/public/661/4d9/e83/6614d9e8360f3797147901.pdf>

Energetski zakon (EZ-2). (2024). Uradni list RS št. 38/24.

GIZ TS-13. (2017). *Elektro kabelska kanalizacija.* Pridobljeno 15.7.2025 z naslova <https://www.giz-dee.si/Portals/0/Tipizacija/GIZ-TS-13-Elektro-kabelska-kanalizacija.pdf>

Gradbeni zakon (GZ-1). (2021). Uradni list RS št. 199/21.

Holding kablovi a.d. (2025). *Cables with impregnated paper insulation*. Pridobljeno 1.7.2025 z naslova <https://www.fks.co.rs/fkse/maticna/energet/papir/ipo13.htm>

LME. (2025). *London Metal Exchange*. Pridobljeno 13.7.2025 z naslova <https://www.lme.com/>

Lovrenčič, V. (2023). *Varovanje okolja in varstvo pri delu*. Študijsko gradivo pri predmetu VOVD. Ljubljana: Višja strokovna šola B&B.

Pravilnik o varstvu pri delu pred nevarnostjo električnega toka (PVDNET). (1992). Uradni list RS št. 29/92.

PRYSMIAN GROUP. (2019). *Product catalogue*. Pridobljeno 7.7.2025 z naslova https://hu.prysmian.com/sites/default/files/PGHU_Productcatalogue_A4_108pg_EN_web_1.pdf

Scientific Research Publishing. (2021). *A Review of Medium Voltage Single-Core Cable Armouring, Induced Currents and Losses*. Pridobljeno 27.04.2025 z naslova https://www.scirp.org/pdf/epe_2021072115303419.pdf

SIST EN 60228:2005. (2005). *Vodniki izoliranih kablov*. (2005). Ljubljana: Slovenski inštitut za standardizacijo.

SIST EN 60332-1-2:2005. (2005). *Preizkus na električnih kablilih in kablilih iz optičnih vlaken v požarnih razmerah – 1 – 2.del: Preskus navpičnega širjenja ognja po posamezni izolirani žici ali kablu – Postopek za predmešani plamen 1kW*. Pridobljeno 2.7.2027 z naslova <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/70527/6c1c67325ea2424abd13aaa17742db04/SIST-EN-60332-1-2-2005-oprAB-2020.pdf>

SIST HD 620 S3:2023. (2023). *Distribucijski kabli z ekstrudirano izolacijo za naznačene napetosti od 3,6/6 (7,2) kV do vključno 20,8/36 (42) kV*. Pridobljeno 2.7.2025 z naslova <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/70520/5d4fc4a7a13f495299d2c74d3e6a7d91/SIST-HD-620-S3-2023.pdf>

PRILOGE

Priloga 1: Uporaba cevi pri gradnji EKK (ELES-T3)

CEV	material	d _{zunani} [mm]	S _{stene} [mm]	barve cevi	Obodna togost, Temenska trdnost	UPORABA po presekih		MESTO IN NAČIN VGRADNJE
						NN kabli do [mm ²]	SN kabli do [mm ²]	
EPC 160/3,2 (gladke)	PVC	160	3,2		SN2	2× 4×240 ¹ 3× 1×240	1× 3×240 3× 1×240	- za temenske globine od 0,8 do 1,6 m z obsipom cevi - za temenske globine med 0,3 do 0,8 m z obbetoniranjem cevi
EPC 110/3,2 (gladke)	PVC	110	3,2		SN8	2× 4×70 ¹ 1× 4×240	1× 3× 150 1× 1×240 ²	- za temenske globine od 0,8 do 1,6 m z obsipom cevi - za temenske globine med 0,3 do 0,8 m z obbetoniranjem cevi
EPC 160/4,7 (gladke)	PVC	160	4,7		SN8	2× 4×240 ¹	1× 3×240 3× 1×240	- za temenske globine med 0,8 m in 8 m z obsipom cevi
PE 110/6,6 (tlačne)	PE80	110	6,6		PN8	2× 4×70 ¹ 1× 4×240	1× 3×150 1× 1×240 ²	- pri prekopih manjših vodotokov, močvirja in jarkov za odvodnjavanje - pri montaži na betonske vence podpornih zidov vodotokov ali mostov
PE 160/9,5 (tlačne)	PE80	160	9,5		PN8	2× 4×240 ¹	1× 3×240 3× 1×240	- pri zahtevani popolni vodotesnosti
GDC 110/95 (narebrena)	PEHD	110	7,5		450 N / 200 mm	2× 4×70 ¹ 1× 4×240	1× 1×240 ²	- gradnja v okolju obremenjenem z ostalimi komunalnimi vodi - z obbetoniranjem cevi
GDC 160/136 (narebrena)	PEHD	160	12		450 N / 200 mm	2× 4×150 ¹	1× 3×240 3× 1×240	
PEHD 2×50/3,7 (dvojček)	PEHD	50	3,7		PN8	-	-	- za polaganje ob in nad cevmi EKK - za uvlačenje ali vpihovanje optičnih kablov in vlaken
PEHD 2×32/2,4 +2×40/3 (četverček)	PEHD	32 40	2,4 3		PN8	-	-	- za uvlačenje v proste EPC cevi pri razmiku jaškov do 50 m - za uvlačenje ali vpihovanje optičnih kablov in vlaken

¹ ob upoštevanju faktorja polaganja

² izjemoma v primeru polaganja kablov v ravnini vsake faze v svoji cevi

Pri vleki več NN kablov v isti cevi ti lahko pripadajo različnim tokokrogom, vendar pa morajo biti v jaških označeni kateremu tokokrogu kateri kabel pripada.

Priloga 2: Križanja, približevanje in vzporedni poteki 20 kV kablovodov (ELES T-2)

Ostala GJI	Križanje - višina	Približevanje - oddaljenost
Transportni in primarni vodovod	$\geq 0,5$ m	$\geq 1,5$ m
Sekundarni vodovod in priključki	$\geq 0,3$ m	$\geq 0,5$ m
Primarna in sekundarna kanalizacija	$\geq 0,5$ m, kot križanja $\geq 30^\circ$, zaščitna cev na vsako stran najmanj v dolžini globine kanalizacije	$\geq$ globina kanalizacije [m] x 0,4, minimalno 0,5 m, v kabelski kanalizaciji minimalno 0,4 m
Plinovod do 5 bar	$\geq 0,3$ m, kot križanja $\geq 30^\circ$, zaščitna cev na vsako stran ≥ 1 m	$\geq 0,5$ m
Plinovod nad 5 bar do 16 bar	$\geq 0,3$ m, kot križanja $\geq 45^\circ$, zaščitna cev na vsako stran ≥ 3 m	$\geq 0,5$ m
Plinovod nad 16 bar	$\geq 0,5$ m, kot križanja $\geq 45^\circ$, zaščitna cev na vsako stran ≥ 3 m	$\geq 0,5$ m
Toplovod	$\geq 0,6$ m, kot križanja $\geq 45^\circ$, kabel pod toplovodom, zaščitna cev na vsako stran ≥ 3 m	$\geq 2,0$ m
Telekomunikacijski žični vodi	$\geq 0,5$ m, kot križanja $\geq 30^\circ$, zaščitna cev na vsako stran ≥ 1 m za oba kabla	$\geq 0,5$ m, 1 m od TK droga zaščitni s cevjo
Železnica	1 m pod zgornjim ustrojem, kot križanja 90° , zaščitna cev na vsako stran 5 m od roba praga	≥ 3 m od nasipov in usekov, ≥ 2 m od drenažnih kanalov, ≥ 5 m od sredine tirov, če je trasa v isti ravnini
20 kV kabel pod obdelovalno površino	0,8 m + globina obdelave	/
Avtoceste, hitre ceste	$\geq 1,5$ m, kot križanja 90° , zaščitna cev ≥ 1 m od roba cestišča	≥ 1 m od roba cestišča
Predori	/	V zaščitni cevi, praviloma ob vozni površini
Državne ceste	≥ 1 m, kot križanja $\geq 45^\circ$, zaščitna cev ≥ 1 m od roba cestišča	V vozišču v zaščitnih ceveh ob robu vozišča 1 m
Lokalna cesta	≥ 1 m, kot križanja $\geq 30^\circ$	V vozišču v zaščitnih ceveh ob robu vozišča 0,5 m
Mostovi	Zaščitne cevi v mostu, dolvodno ob konstrukciji mostu v zaščitnih ceveh	/
Ozemljilni vodi Strelovoda	$\geq 0,5$ m, kot križanja $\geq 30^\circ$, v izolacijski cevi ≥ 3 m na vsako stran	Do 3 m strelovod v izolacijski cevi
Vodotoki	$\geq 1,2$ m, kot križanja $\geq 45^\circ$, pod dnom struge v zaščitni cevi ≥ 5 m od roba brežine	≥ 5 m od brežine
Temelji stavbe	V zaščitni cevi $\geq 0,5$ m na vsako stran	$\geq 0,5$ m v zaščitni cevi
Optični TK kabel	$\geq 0,5$ m, kot križanja $\geq 30^\circ$, v zaščitni cevi ≥ 1 m na vsako stran	$\geq 0,5$ m
Elektroenergetski nizkonapetostni (NN) kabel, javna razsvetljava (JR)	$\geq 0,5$ m, kot križanja $\geq 30^\circ$, NN in JR v zaščitni cevi ≥ 1 m na vsako stran	$\geq 0,2$ m
Elektroenergetski kabel do 45 kV	$\geq 0,5$ m, kot križanja $\geq 30^\circ$	$\geq 0,2$ m
Ozemljitev	$\geq 0,5$ m, v izoliranih ceveh na vsako stran ≥ 3 m	$\geq 0,2$ m
Elektroenergetski kabel nad 45 kV	$\geq 0,5$ m, oba kabla v zaščitni cevi ≥ 1 m na vsako stran	$\geq 0,6$ m, oba kabla položena v trikot

* Upoštevati je treba tudi zahteve upravljavcev ostale GJI

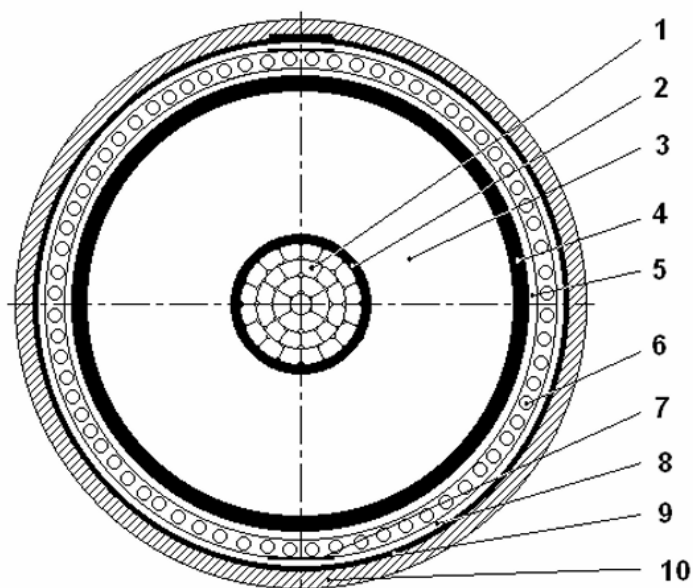
Priloga 3: Tehnični list N2XS(FL)2Y 1x240/25 RM 12/20 (24) kV

MKM
HUNGARIAN CABLE WORKS CO. LTD.

Prysmian
Group

PRYSMIAN
Draka

N2XS(FL)2Y 1x240 RM/25 mm² 12/20 kV
DIN VDE 0276-620



	Construction	Material	Size	Diameter*
1	Conductor	Cu	50 x Ø 2.6	18.2
2	Inner semiconductive layer	XLPE	Nom. Th.: 0.5 Min. Th.: 0.3	19.2
3	Insulation (XLPE)	XLPE DIX 8	Nom. Th.: 5.5 Min. Th.: 4.85	30.4
4	Outer semiconductive layer	XLPE	Nom. Th.: 0.4 Min. Th.: 0.30	31.2
5	Swellable tape	PET	1 x 110 x 0.46	32.1
6	Cu wire screen	Cu	42 x Ø 0.86	33.8
7	Counter helix	Cu	1 x 5 x 0.2	33.8
8	Swellable tape	Semiconductive	1 x 60 x 0.46	34.6
	Binding tape	PET	1 x 30 x 0.13	34.9
9	One side laminated Al tape	AL/PE tape	1 x 120 x 0.25	35.7
10	Outer sheath HDPE	HDPE	Nom. Th.: 2.50 Min. Th.: 2.03	40.6

*: Informative only!

MKM
HUNGARIAN CABLE WORKS CO. LTD.

Prysmian
Group



Technical data

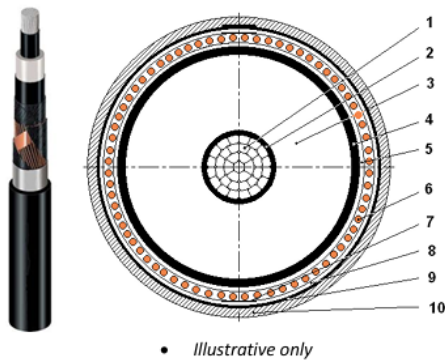
Manufacturer		PRYSMIAN MKM
Place of manufacture and test		Balassagyarmat
Type designation		N2XS(FL)2Y
Applied standard		DIN VDE 0276-620
Rated voltages U_0/U	kV	12/20
Highest system voltage (U_m)	kV	24
Frequency	Hz	50
Insulation material	-	XLPE
Conductor temperature with admiss. short time current	°C	250
Screen temperature with admiss. short time current 1s	°C	250
Nominal conductor cross-section	mm ²	240
Conductor material	-	Cu
DC resistance of conductor	Ω/km	0,0754
Nominal screen cross-section, Copper	mm ²	25
Continuous max. conductor temperature	°C	90
Minimum bending radius	mm	735
Pulling force	N	12000
Cable weight *	kg/km	3175

*: Informative only!

Priloga 4: Tehnični list NA2XS(FL)2Y 1x400/35 RM 12/20 (24) kV



NA2XS(FL)2Y 1x400RM/35 mm²
12/20 (24) kV
DIN VDE 0276-620 & IEC 60502:2



• Illustrative only

	Construction	Material	Size	Approx. Dia* (mm)
1	Conductor	Al, class 2, RMC	Min. 53 wires	23.2
2	Inner semiconductive layer	Ethylene copolymer	Min. Th.: 0.3	24.9
3	Insulation (XLPE), DIX8	Cross-linking polyethylene	Nom. Th.: 5.5 Min. Av. Th.: 5.5 Min. Th.: 4.85	35.9
4	Outer semiconductive layer	Ethylene Copolymer	Min. Th.: 0.3 Max. Th.: 0.6	36.8
5	Water blocking layer	Semic. TopSwell Tape	1x60x0.40	37.2
6	Cu wire screen	Cu	35 mm ²	39.0
7	Counter helix tape	Cu	1 x 10 x 0.1	39.1
8	Water blocking layer	Semic. TopSwell Tape	1x60x0.40	39.8
9	Moisture barrier	Polylam	150/50	40.3
10	Outer sheath (PE), DMP2 & ST7	HDPE, black colour	Nom. Th.: 2.50 Min. Th.: 2.025	45.3

* Informative only

**Current-Carrying Capacity:**

Cross Section	Laid in air			Laid in ground, direct		Approx. Weight	Min. bending radius	Standard Length/drum
	Trefoil	Flat touching	Flat spaced	Trefoil	Flat spaced			
<i>mm²</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>Kg/km</i>	<i>mm</i>	<i>m</i>
400/35	660	-	753	535	564	2345	675	1000

Laying conditions :

Maximum conductor temperature :	90 °C
Ambient temperature, air:	30 °C
Soil temperature:	20 °C
Depth of laying:	0.7 m
Thermal resistivity of soil, dried-out	2.5 K.m/W
Thermal resistivity of soil, moist	1.0 K.m/W
Cable Load Factor in earth:	0.7
Cable Load Factor in air:	1.0

Screen bonded at both ends.

For different laying conditions the conversion factors will be applied.

Electrical characteristics:

Max. electrical DC resistance of conductor, @ 20 °C:	0.0778 Ω/km
Max. electrical AC resistance of conductor, @ 90 °C:	0.109 Ω/km
Max. electrical DC resistance of screen, @ 20 °C:	0.524 Ω/km
Inductance, trefoil in ground:	0.336 mH/km
Operating capacitance:	0.358 μF/km
Rated short-time current of conductor (1s):	37.6 kA
Rated short-time current of screen (1s):	7.1 kA

Installation and operation conditions:

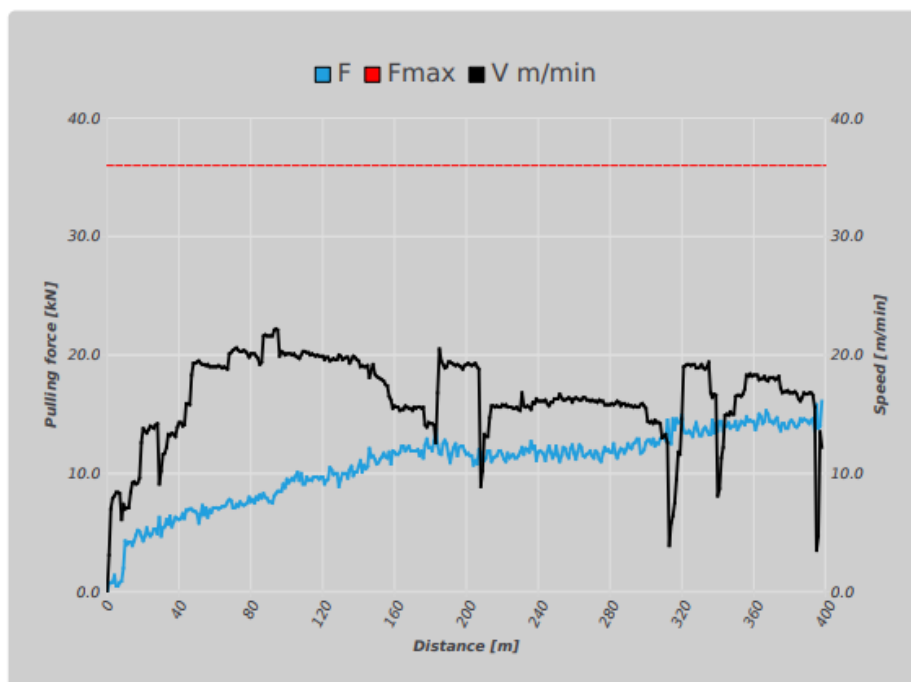
Max. operating temperature of conductor at short-circuit, (≤ 5s):	250 °C
Max. pulling force:	12 kN
Min. installation temperature:	- 20 °C
<i>(below 0°C special precaution shall be taken)</i>	
Min. operation temperature:	- 30 °C

Priloga 5: Izpisek vlečnih sil pri polaganja kabla N2XS(FL)2Y 3x1x240/25 RM

Bagela Baumaschinen
GmbH & Co.Vehicle ID
WB81W0400PKBW0109

Customer		Date	04.06.2025
Project name	RTP Center NOVI	Time	09:26:13
Project number	01	Location	/
Operator	EI2272		
Cable type	N2XS(FL)2Y 3x1x240	Feed length	398.1 m
Reel ID		Max. speed	22.2 m/min
Limit value	36.0 kN	Max. pulling force	16.1 kN
Remarks	240mm ² Cu SN KB (Pediatrična klinika)		

Force progression

Bagela Baumaschinen
GmbH & Co.
Gottlieb-Daimler-Str. 5

Page 1 / 11

