

MEHANIČKI PRORAČUN SN VODOVA SA POLUIZOLIRANIM VODIČIMA

Krapić, Dominik

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:388552>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-02**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**MEHANIČKI PRORAČUN SN VODOVA SA POLUIZOLIRANIM
VODIČIMA**

Rijeka, srpanj 2023.

Dominik Krapić
0069081432

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**MEHANIČKI PRORAČUN SN VODOVA SA POLUIZOLIRANIM
VODIČIMA**

Mentor: Prof. dr. sc. Vitomir Komen

Rijeka, srpanj 2023.

Dominik Krapić
0069081432

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

IZJAVA

U skladu s člankom 9. Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, od 2017., izjavljujem da sam ovaj diplomski rad izradio samostalno, uz pomoć mentora i navedene literature prema zadatku, Klasa: 602-04/18-07/45, Ur. br.: 2170-15-14-18-1, Rijeka 27.06.2023.

Rijeka, lipanj 2023.



Dominik Krapić

Sadržaj:

1.	UVOD.....	1
2.	POLUIZOLIRANI VODIČI.....	2
2.1.	XLPE-Ay (ELKA ZAGREB).....	2
2.2.	GREENPAS CCSTWK (TFKable).....	3
2.3.	22-PAS, 22-PAS-W 12/20 kV (NKTCables).....	4
2.4.	CCSX AL3 WK 20 kV (Eltrim).....	4
3.	NADZEMNI SN VODOVI SA POLUIZOLIRANIM VODIČIMA.....	6
3.1.	Povijest i zanimljivosti poluizoliranih vodiča.....	6
3.2.	Razlozi primjene poluizoliranih vodiča.....	7
3.3.	Prednosti i nedostaci poluizoliranih vodiča.....	8
4.	ELEMENTI SN VODOVA SA POLUIZOLIRANIM VODIČIMA.....	9
4.1.	Izolatori za vodove sa poluizoliranim vodičima.....	9
4.2.	Izolirane vodonepropusne strujne stezaljke.....	10
4.3.	Nastavne spojnice.....	11
4.4.	Zatezne stezaljke za zatezne stupove.....	12
4.5.	Zaštitni pribor za poluizolirane vodiče.....	14
4.6.	Predformirani vezovi.....	15
4.7.	Antivibracijski elementi.....	16
4.8.	Zaštitna oprema (zaštitna iskrišta).....	16
4.9.	Zaštitne navlake za ptice.....	18
4.10.	Stupovi.....	19
5.	MEHANIČKI PRORAČUN SN NADZEMNIH VODOVA SA POLUIZOLIRANIM VODIČIMA – OPĆENITO.....	22
6.	ANALITIČKI MEHANIČKI PRORAČUN SN VODA SA POLUIZOLIRANIM VODIČIMA.....	28
6.1.	Korigiranje vrijednosti raspona zbog denivelacije ovjesišta.....	29
6.2.	Definiranje početnog stanja temperature za horizontalne komponente naprezanja.....	30
6.3.	Horizontalne komponente naprezanja pri odabranim temperaturama.....	32
6.4.	Horizontalne sile za odabrane temperature.....	36
6.5.	Idealan provjes za idealni raspon i odabrane temperature.....	37
6.6.	Provjesi za odabrane raspone i odabrane temperature.....	38
6.7.	Kritična temperatura.....	43

7. MEHANIČKI PRORAČUN SN VODA SA PI VODIČIMA U PROGRAMU AUTOCAD ELECTRA.....	45
7.1. Unos podataka zateznog polja u program AutoCad Electra.....	45
7.2. Postavljanje stupova i vodova	47
7.3. Rezultati mehaničkog proračuna	49
8. USPOREDBA ANALITIČKOG PRORAČUNA I PRORAČUNA U PROGRAMU ELECTRA.....	54
9. ZAKLJUČAK.....	56
LITERATURA	57
POPIS OZNAKA I KRATICA	58
SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI.....	59
SUMMARY AND KEY WORDS.....	60

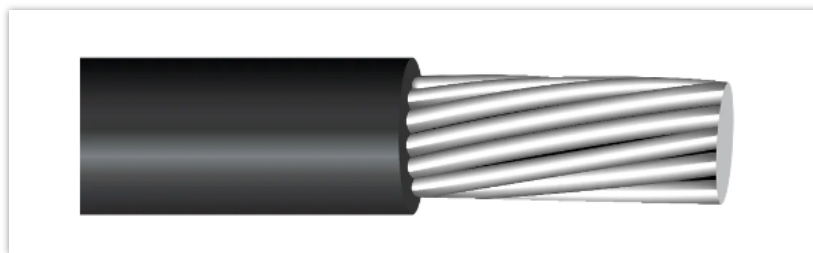
1. UVOD

U elektroenergetskim sustavima se poluizolirani vodiči ne koriste često jer se u većini slučajeva koriste drugi tipovi vodiča poput kabela s izolacijom ili ne izolirani nadzemni vodiči. Ipak, postoje neki specifični slučajevi u kojima se poluizolirani vodiči mogu koristiti u elektroenergetskim sustavima, primjerice u nekim dijelovima sustava gdje postoji potreba za dodatnom izolacijom i zaštitom od elektromagnetskih smetnji.

Također, poluizolirani vodiči se mogu koristiti u nekim posebnim situacijama u kojima se želi izbjeći korištenje punih kabela s izolacijom zbog njihove velike veličine ili težine. U tim situacijama poluizolirani vodiči se mogu koristiti kao alternativa jer su fleksibilniji i lakši za rukovanje.

Postoji nekoliko specifičnih slučajeva u kojima se koriste kao najbolja moguća opcija za prijenos energije SN voda kao što su šumovita, naseljena područja ili u dijelovima zemlje s ekstremnim vremenskim uvjetima kao što su bura, snijeg, led, itd.

Poluizolirani vodiči u distribuciji za vodič koriste aluminijske legure, a obično se izoliraju polietilenom. Debljina izolacije je dostatna kako bi se spriječio eventualni kratki spoj u slučaju dodira dva poluizolirana vodiča različitih napona. Kod dodira dva vodiča stvara se dupli sloj poluizolatora koji povećava polu-izolaciju na potpunu izolaciju. Važno je osigurati da debljina izolacije nije prevelika kako bi se izbjeglo otežavanje voda i povećanje provjesa.



Slika 1.1. Prikaz poluizoliranog vodiča od izolacije XLPE[1]

Neki od poznatih proizvođača poluizoliranih vodiča i opreme su: „ELKA ZAGREB“, „SICAME“ („Dervasil“), „ENSTO“, „TFKable“, „Eltrim“, „Draka“ itd.



Slika 1.2. Logotipi od nekoliko proizvođača PI vodiča i opreme za PI vodič.[1,2,5,10]

2. POLUIZOLIRANI VODIČI

2.1. XLPE-Ay (ELKA ZAGREB)



Slika 2.1.1. XLPE-Ay Type 23, XLPE-Ay Type 27 [1]

Konstrukcija:

1. Uže od aluminijeve legure AlMgSi
2. XLPE izolacija otporna na atmosferske utjecaje

Izrađuje se prema normi **SFS 5791**, Koristi se za izvedbu nadzemnih poluizoliranih distribucijskih mreža nazivnih napona 6/10 kV i 12/20 kV najvišeg napona mreže od 24 kV kroz šumovita područja radi umanjene širine prosjeka šume i nižih troškova izgradnje te održavanja nadzemne mreže u odnosu na mrežu s golim vodičima. [1]

Nazivni presjek / Nominal Cross-section	Modul elastičnosti / Elasticity Module	Najmanja prekidna sila / Minimal Tensile Strength	Otpor vodiča na 20 °C / Conductor Resistance at 20 °C		Nazivno stujno opterećenje ¹ / Nominal Current ratings ¹		Struja kratkog spoja ² / Short Circuit Current ²	
mm ²	N/mm ²	kN	Ohm/km		A		kA	
35	60 000	9,6	0,986		195		3,20	
50	60 000	13,5	0,720		245		4,35	
70	60 000	18,4	0,493		300		6,85	
95	60 000	26,0	0,363		370		8,90	
120	57 000	32,7	0,288		425		11,70	
150	57 000	41,1	0,236		495		14,50	
185	57 000	50,7	0,187		570		18,00	

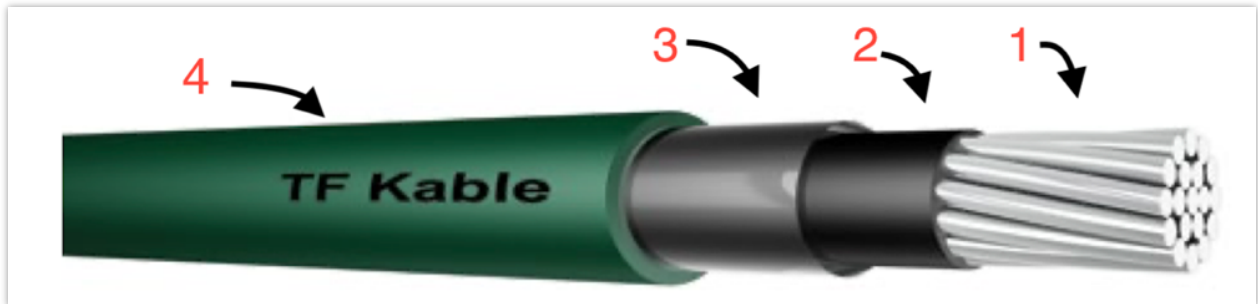
Nazivni presjek / Nominal Cross-section	Najmanji broj žica / Minimal Number of Wires	Promjer vodiča / Conductor Diameter	Debljina izolacije / Insulation Thickness		Promjer preko izolacije / Diameter over Insulation		Težina izoliranog vodiča / Insulated Conductor Weight	
			Tip 23 / Type 23	Tip 27 / Type 27	Tip 23 / Type 23	Tip 27 / Type 27	Tip 23 / Type 23	Tip 27 / Type 27
mm ²	n	mm	mm	mm	mm	mm	kg/km	kg/km
35	7	6,9	2,3	2,7	11,9	12,7	190	200
50	7	8,0	2,3	2,7	13,0	13,8	230	245
70	7	9,6	2,3	2,7	14,7	15,4	300	325
95	7	11,3	2,3	2,7	16,3	17,1	385	410
120	19	12,7	2,3	2,7	17,7	18,5	465	490
150	34	14,1	2,3	2,7	19,1	19,9	560	580
185	34	15,7	2,3	2,7	20,7	21,5	670	700

Slika 2.1.2 Tehnički podatci XLPE-Ay Tip 23, XLPE-Ay Tip 27 [1]

2.2. GREENPAS CCSTWK (TFKable)

Primjena:

Ovi kabeli se najčešće koriste u urbanoj infrastrukturi, industriji i drugim aplikacijama gdje je potrebno pouzdano i sigurno distribuiranje električne energije na srednjem naponu.



Slika 2.2.1: CCSTWK kabel 20kV [2]

Konstrukcija:

1. Vodič izrađen od legure AL3, presvučen prahom za sprječavanje uzdužnog prodiranja vlage
2. Poluvodljivi sloj zadužen za ravnomjernu raspodjelu električnog polja unutar vodiča
3. Sloj izolacije od LDPE-a (polietilen niske gustoće)
4. Sloj izolacije izrađen od HDPE (polietilen visoke gustoće) ili od silikonske gume koja osigurava izolaciju i zaštitu od vanjskih utjecaja, otporan na UV zračenja i atmosferske utjecaje

Izrađuje se prema normi **PN-EN 50397-1, EN 50183** [2]

Presjek vodiča mm ²	Debljina poluvodljivog sloja mm	Debljina izolacije (LDPE) mm	Debljina izolacije (HDPE) mm	Približan ukupni promjer mm	Približna neto težina kabeta kg/km	Maksimalni otpor vodiča na temperaturi 20°C Ω/km	Dopuštena struja kratkog spoja 1s kA	Maksimalno strujno opterećenje A	
50	0.2	1.2	1.2	13.90	229	0.720	3.2	165	191
70	0.2	1.2	1.2	15.30	297	0.493	4.6	248	283
95	0.2	1.2	1.2	16.70	376	0.363	6.1	326	372
120	0.2	1.2	1.2	18.20	456	0.288	7.8	404	461

Slika 2.2.2 Tehnički podatci CCSTWK [2]

Ima nešto manju strujnu opteretivost u odnosu na PI vodiče s izolacijom od XLPE-a (vodiči s izolacijom od umreženog polietilena, tj. XLPE izolacijom mogu se termički opteretiti do 90°C, a vodiči s izolacijom od termoplastičnog polietilena do 70°C)

2.3. 22-PAS, 22-PAS-W 12/20 kV (NKTCables)



Slika 2.3.1. NKTCables 22-PAS kabela [3]

Konstrukcija:

1. Uže od aluminijeve legure AlMgSi
2. XLPE izolacija otporna na atmosferske utjecaje

Izrađuje se prema normi PN 03/02, SFS 5790 [3], slične je izvedbe kao XLPE-Ay proizvođača ELKA.

2.4. CCSX AL3 WK 20 kV (Eltrim)



Slika 2.4.1. CCSX AL3 WK 20 kV kabel [4]

CCSX se odnosi na naziv specifičnog tipa poluizoliranog vodiča, pri čemu "CC" označava poluizolirane aluminijske vodiče, a "SX" ukazuje na izolaciju od umreženog polietilena (XLPE) koja prekriva vodič. Ova kombinacija materijala pruža visoku izolacijsku snagu i mehaničku čvrstoću.

AL3 predstavlja klasifikaciju aluminijske jezgre vodiča. Aluminijaska jezgra pruža laganu težinu vodiča i dobru električnu provodljivost. Klasifikacija AL3 ukazuje na određeni stupanj čvrstoće i mehaničke otpornosti aluminijske jezgre.

„WK“ označava tip namotavanja žica u vodiču. Ta namotavanja osiguravaju optimalnu raspodjelu struje kroz vodič i smanjuju gubitke energije.

Tablice koje slijede (slika 2.4.2, slika 2.4.3) prikazuju tehničke podatke relevantne za mehanički proračun vodiča CCSX AL3 WK 20 kV. Važno je napomenuti da se svaki proizvođač vodiča mora pridržavati europskih normi kako bi osigurao usklađenost s sigurnosnim standardima i kvalitetom.

Product Name	Diameter over conductor [mm]	Diameter over covered conductor [mm]	Cable weight [kg/km]	Min. permissible bending radius during laying [m]	Min. permissible bending radius at final installation [m]	Min. tensile strength of the conductor[kN]
CCSX 35 AL3 WK	6.9	12	170	0.18	0.13	11.2
CCSX 50 AL3 WK	8	13.2	220	0.20	0.14	15.5
CCSX 70 AL3 WK	9.7	14.8	290	0.22	0.16	22.5
CCSX 95 AL3 WK	11.3	16.5	370	0.25	0.17	30.4
CCSX 120 AL3 WK	12.8	18	455	0.27	0.19	38
CCSX 150 AL3 WK	14.2	19.4	545	0.29	0.20	47.3

Slika 2.4.2. Tablica sa izmjerenim tehničkim podacima [4]

Postoji više izvedbi CCSX AL3 WK kabela zavisno o udaljenosti prijenosa energije i o iznosu snage koja se njime prenosi tako da proizvođač izdaje tablicu za različite dimenzije kabela od 35 do 150 mm² (slika 2.4.2).

Prikazani su sljedeći podatci: promjer vodiča sa i bez izolacije, težina kabela, najmanji dopušteni kut savijanja vodiča prilikom postavljanja, minimalni kut savijenosti vodiča u stanju nakon postavljanja, vlačna čvrstoća vodiča.

Product Name	Initial modulus of elasticity of conductor [N/mm ²]	Final modulus of elasticity of conductor[N/mm ²]	Coefficient of linear expansion of conductor[1/k]	Max DC Resistance of conductor*[Ω/km]	Current rating in air** [A]	Max. permissible short circuit current for 1 sec.** [kA]
CCSX 35 AL3 WK	61 000	62 500	23x10 ⁻⁶	0.986	200	3.2
CCSX 50 AL3 WK	61 000	62 500	23x10 ⁻⁶	0.72	245	4.3
CCSX 70 AL3 WK	61 000	62 500	23x10 ⁻⁶	0.493	310	6.4
CCSX 95 AL3 WK	61 000	62 500	23x10 ⁻⁶	0.363	370	8.6
CCSX 120 AL3 WK	61 000	62 500	23x10 ⁻⁶	0.288	430	11
CCSX 150 AL3 WK	61 000	62 500	23x10 ⁻⁶	0.236	485	13.5

Slika 2.4.3. Tablica sa podacima koji su dobiveni ispitivanjima [4]

Na slici 2.4.3 prikazani su početni modul elastičnosti i konačni modul elastičnosti vodiča, koeficijent linearnog toplinskog istezanja, maksimalni istosmjerni otpor vodiča, strujna vrijednost u zraku, najveća dopuštena struja kratkog spoja za 1 sekundu.

3. NADZEMNI SN VODOVI SA POLUIZOLIRANIM VODIČIMA

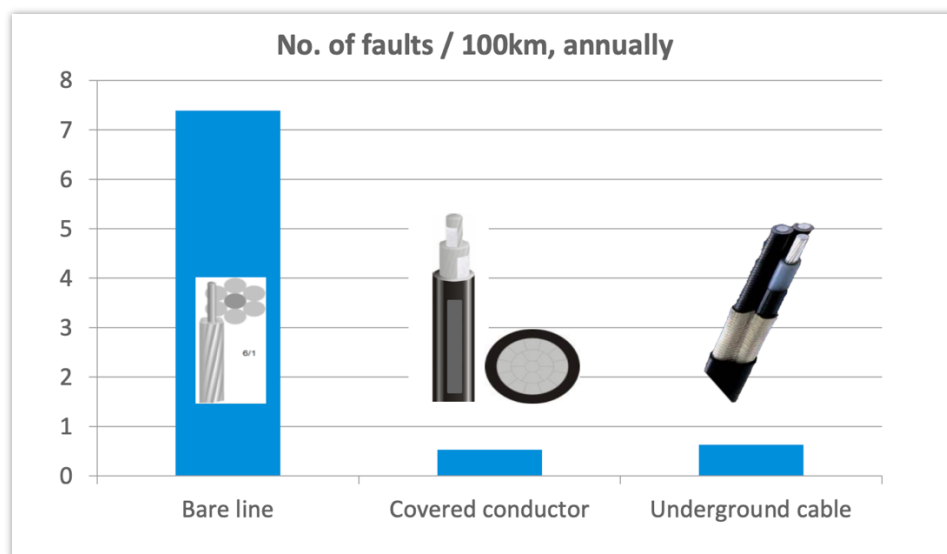
Nadzemni SN vodovi s poluizoliranim vodičima dijele mnoge zajedničke karakteristike s klasičnim nadzemnim vodovima, no postoje određene razlike u tipu vodiča, spojnoj i zaštitnoj opremi te izolatorima. Poluizolirani vodiči se sastoje od Al/Fe vodiča ili aluminijskih legura koji su dodatno presvučeni slojem izolacije od umreženog polietilena (XLPE).

Primjena poluizoliranih vodova u nadzemnim vodovima omogućuje smanjenje razmaka između vodiča, visine stupova te sigurnosne udaljenosti od objekata u blizini. Istovremeno, povećava se pouzdanost takvih vodova u usporedbi s klasičnim nadzemnim vodovima s neizoliranim vodičima. U područjima s izloženošću vjetru, snijegu i okolnim stablima, ova vrsta vodiča značajno poboljšava sigurnost opskrbe električnom energijom potrošača.

3.1. Povijest i zanimljivosti poluizoliranih vodiča

Prva verzija poluizoliranih vodova, poznata kao "Spacercable", razvijena je u SAD-u 1950-ih. U Europi su poluizolirani vodovi prvi put postavljeni u Finskoj (1976.), a zatim u Švedskoj (1985.) i Norveškoj (1986.).

Prema statistikama elektroenergetskog sustava Finske za 2014. godinu, postojalo je 104.558 km klasičnih vodova s neizoliranim vodičima, 22.091 km podzemnih kabela, 661 km zračnih kabela i 9.388 km vodova s poluizoliranim vodičima. Statistika također pokazuje da nadzemni vodovi s poluizoliranim vodičima imaju manji broj pogrešaka na 100 km duljine u usporedbi s podzemnim kabelima (Slika 3.1.) [5].



Slika 3.1.1. Statistika broja grešaka na 100 km dužine u 2014. godini u EES Finske za gole, PI vodiče i podzemne kabele [5]

3.2. Razlozi primjene poluizoliranih vodiča

Poluizolirani SN vodovi se često koriste na šumovitim područjima zbog svoje veće otpornosti na vanjske utjecaje, kao što su grane stabala ili druge vegetacije. Budući da su šumovita područja podložna padu grana i drugih vegetacijskih materijala na vodove, poluizolirani vodovi mogu pružiti veću sigurnost i pouzdanost u takvim okruženjima.

Izolacijski sloj XLPE (umreženi polietilen) koji prekriva vodiče u poluizoliranim vodovima pruža dodatnu zaštitu od mehaničkih oštećenja uzrokovanih padom grana. Ovaj sloj izolacije smanjuje rizik od kratkih spojeva i drugih problema koji mogu nastati kada vanjski materijal dođe u kontakt s vodičima.

Također, zbog smanjenja razmaka između vodiča, poluizolirani vodovi mogu proći kroz šumovito područje s manje smetnji, jer su manje izloženi mogućnosti zakačenja ili zapetljavanja u granama i vegetaciji.

Stoga, kada se vodovi postavljaju na područja s gustim drvećem i vegetacijom, poluizolirani vodovi mogu biti preferirani zbog svoje veće otpornosti na vanjske utjecaje i smanjenja rizika od oštećenja uslijed pada grana.



Slika 3.2.1. Vod s poluizoliranim vodičima s srušenom granom na vodiče dok je pod naponom [6]



Slika 3.2.2. Vod s poluizoliranim vodičem i dalje u pogonu iako je stablo srušeno na njega, [6]

3.3. Prednosti i nedostaci poluizoliranih vodiča

Konstrukcija poluizoliranih vodiča uključuje jezgru od aluminija ili aluminijskih legura, bubreće niti između žica koje sprječavaju prodor vlage, poluvodljivi ekran preko jezgre te izolaciju od umreženog polietilena (XLPE) koja prekriva ekran i jezgru.

Prednosti poluizoliranih vodiča u odnosu na neizolirane vodiče su sljedeće:

- Smanjena opasnost od slučajnog dodira za ljude i životinje: Dielektrični sloj poluizoliranih vodiča smanjuje rizik od ozljeda zbog dodira s električnom strujom.
- Sprječavanje međufaznog kratkog spoja: Za slučaj kratkotrajnog dodira faznih vodiča, poluizolirani vodiči sprječavaju međufazni kratki spoj.
- Otpornost na oštećenja od grana: Poluizolirani vodiči su manje osjetljivi na oštećenja uzrokovana dodirima s granama drveća, čime se smanjuje rizik od kvarova.
- Manja širina trase voda: Poluizolirani vodovi mogu zahtijevati manju širinu trase u usporedbi s neizoliranim vodovima.
- Smanjen međufazni razmak vodiča: Poluizolirani vodiči imaju manji međufazni razmak, otprilike trećinu širine klasičnih vodova s neizoliranim vodičima.
- Smanjenje troškova održavanja: Troškovi održavanja poluizoliranih vodova su oko 40% manji u usporedbi s neizoliranim vodovima.

Također, postoje i neki nedostaci poluizoliranih vodiča u odnosu na neizolirane vodiče a to su: veća osjetljivost na eolske vibracije, skuplje otklanjanje kvara, skuplju izgradnju voda, kompliciranije otklanjanje kvarova, manju strujnu opteretivost voda (uz iste nazivne presjeke) i veću težinu i mehaničko opterećenje na uporišta.

4. ELEMENTI SN VODOVA SA POLUIZOLIRANIM VODIČIMA

4.1. Izolatori za vodove sa poluizoliranim vodičima

Preporučljivo je koristiti izolatore prema preporukama proizvođača, poput kompozitnih ovjesnih izolatora s dosjedom vodiča i kompozitnih potpornih izolatora koje preporučuju ENSTO i SICAME. Ti izolatori su izrađeni od dvokomponentnih silikonskih masa koje imaju odličnu dielektričnu čvrstoću i otpornost na UV zračenje.

Na slici 4.1.1. je prikazan kompozitni potporni izolator silikonskog tijela, plastična glava izrađena od PA6-GF30 materijala (PolyAmid materijal poznatiji kao najlon s dodatkom od 30% staklenih vlakana što ga čini izuzetno čvrstim i otporan je na vremenske uvjete). Ima M20 navoj a promjer glave mu je 73 mm. [7]



Slika 4.1.1. Kompozitni potporni izolator SDI 82.1 za poluizolirani vodič [7]

Druga vrsta izolatora je zatezni izolator koji se izrađuje od kompozitnih materijala. On se koristi na krajevima zateznog polja i na krajnjim stupovima.

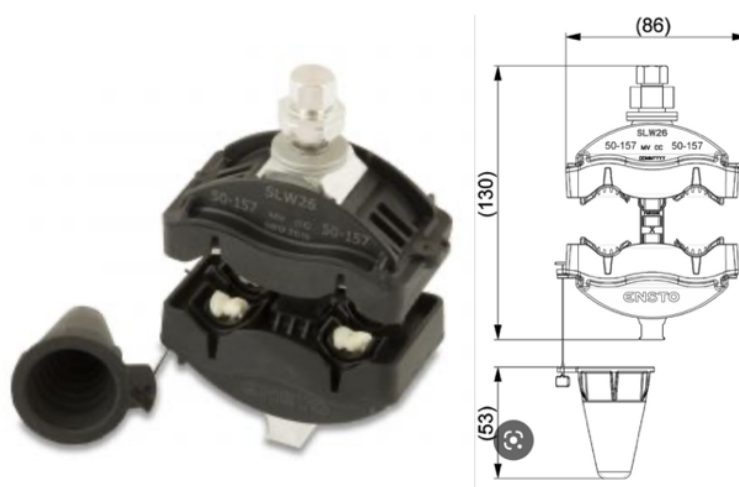


Slika 4.1.2. Kompozitni zatezni izolator (očka-očka) [7]

4.2. Izolirane vodonepropusne strujne stezaljke

Uloga strujne stezaljke kao opreme je isključivo za spajanje vodiča, nema nikakvu mehaničku ulogu. Njena glavna svrha je osigurati strujno spajanje vodiča bez skidanja izolacije vodiča. Važno je da strujna spojnica osigurava kvalitetan spoj vodiča s minimalnim prijelaznim otporom, istovremeno osiguravajući vodonepropusnost spoja. Primjer je SLW 26, to je vodonepropusna strujna stezaljka za PI vodiče. Debljina izolacije strujne stezaljke je od 2,3mm do 4,0mm za presjek PI vodiča od 50 mm² do 150 mm² (ne odgovara za 35 mm²). [7]

Spojnica je prikazana na slici 4.2.1:



Slika 4.2.1. Strujna spojnica poluizoliranog vodiča [7]

One su dizajnirane da izdrže ekstremne klimatske uvjete uključujući izloženost kiši, snijegu, vjetru, visokim i niskim temperaturama, kao i velikim električnim opterećenjima. Ove strujne stezaljke su vodonepropusne kako bi se osigurala sigurnost i pouzdanost elektroenergetske mreže u svim uvjetima.

Stezaljke su obično izrađene od materijala koji su otporni na koroziju i UV zrake, kao što su legure aluminijske i čelika. One se sastoje od nekoliko dijelova uključujući tijelo stezaljke, vijke, matice, brtve i druge elemente za pričvršćivanje.

Kada se koriste ove strujne stezaljke ne treba skidati izolaciju vodiča kako bi se spajanje obavilo jer stezaljka uhvati i drži dio vodiča koji nije izoliran dok izolacija na drugom dijelu vodiča ostaje netaknuta i neizložena. To osigurava sigurno i pouzdano spajanje bez rizika od oštećenja izolacije vodiča.

4.3. Nastavne spojnice

Kada se koristi nastavna spojnica za poluizolirane nadzemne vodove, potrebno je ukloniti izolaciju s krajeva vodiča kako bi se omogućilo spajanje. Nakon što se krajevi vodiča spajaju nastavna spojnica se pričvršćuje oko spoja kako bi se osigurala čvrstoća i sigurnost.

Tablica 4.3.1. Kataloški modeli nastavnih spojnica proizvođača Sicame i Ensto te njihove karakteristike.[7]

	 <p>CIL 106</p> <ul style="list-style-type: none">- Hladnoskupljajuća automatska spojnica- Za presjek PI vodiča 35-50 mm²- Za promjer vodiča (bez izolacije) 5,81-8,6 mm
<p>MJPT 34 G28 EKO</p> <ul style="list-style-type: none">- Spojnica se izvodi prešanjem- Za presjek PI vodiča 35-50mm²- Za promjer vodiča (sa izolacijom) 10,1-19 mm	 <p>CIL 66</p> <ul style="list-style-type: none">- Toploskupljajuća automatska nastavna spojnica- Za presjek PI vodiča 35-50 mm²- Za promjer vodiča (bez izolacije) 5,81-8,6 mm

Spoj poluizoliranih vodiča, kako strujni tako i mehanički, vrši se pomoću kompresijskih spojnica s izolacijom. Postoje dvije vrste takvih spojnica: kompresijska spojnica za vodiče od alučelika i kompresijska spojnica za vodiče od legure aluminija. Da bi se održala neprekidnost izolacije koju poluizolirani vodič posjeduje, na metalne krajeve spojnice se postavlja toploskupljajući bužir.

Preporučuje se postavljanje kompresijskih spojnica u prvoj trećini dužine raspona od uporišta, i to najviše jedne u rasponu, kako ne bi postale slabom točkom u sustavu. Spojnice za vodiče od aluminija i željeza moraju biti u skladu s važećom normom DIN 48085, dio 3.

Kod aluminijske spojnice za presjek vodiča $S = 70\text{mm}^2$: $L_1 = 270\text{mm}$, $d_u = 11,7\text{mm}$, $d_\varepsilon = 4,32\text{mm}$

a čelična spojnica ima iste vrijednosti promjera d_u i d_ε samo je nešto kraća $L_2 = 95\text{mm}$ (slika 4.3.2)

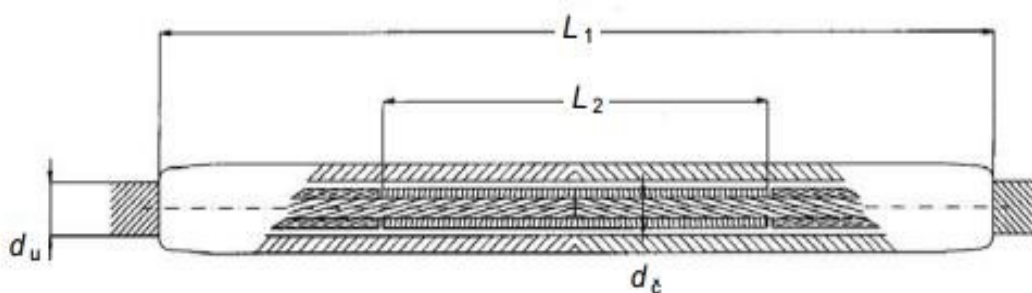
S – presjek Al/Fe vodiča

d_u – vanjski promjer Al/Fe vodiča

d_ε – vanjski promjer jezgre Al/Fe vodiča

L_1 – dužina aluminijske cjevčice kompresijske nastavne spojnice

L_2 – dužina čelične cjevčice kompresijske nastavne spojnice [6]



Slika 4.3.1. Dimenzije nastavne kompresijske spojnice [6]

4.4. Zatezne stezaljke za zatezne stupove

Zatezne stezaljke su mehanički elementi koji se koriste za pričvršćivanje i zatezanje poluizoliranih nadzemnih vodova na zatezne stupove. Ove stezaljke su često izrađene od nehrđajućeg čelika i dizajnirane su da se prilagode različitim veličinama i oblicima vodova.

Zatezne stezaljke se koriste u situacijama kada je potrebno primijeniti veliku silu kako bi se osigurala sigurna i čvrsta veza između voda i stupova. One se obično koriste na mjestima gdje su vodovi izloženi velikim vjetrovima ili drugim okolnostima koje bi mogli dovesti do njihovog pucanja ili oštećenja.

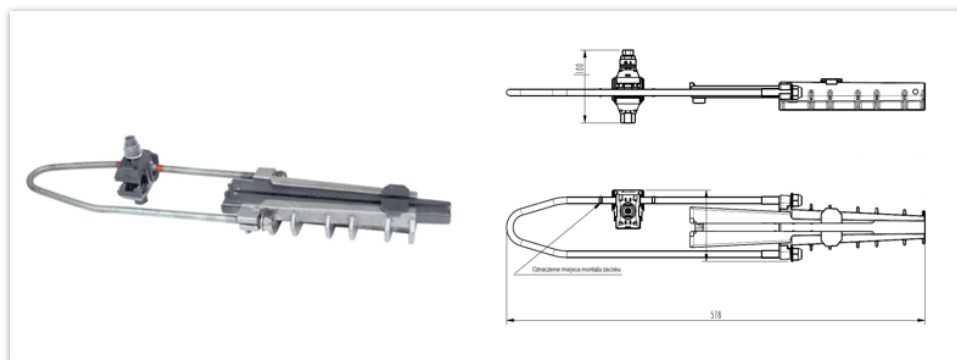
Postoje dva tipa stezaljki PA 2850 P i SO255 koji se jednostavno priključuju na zatezne stupove tako da se umjesto skidanja izolacije ona samo probije i tako ostane spojeni vodič.



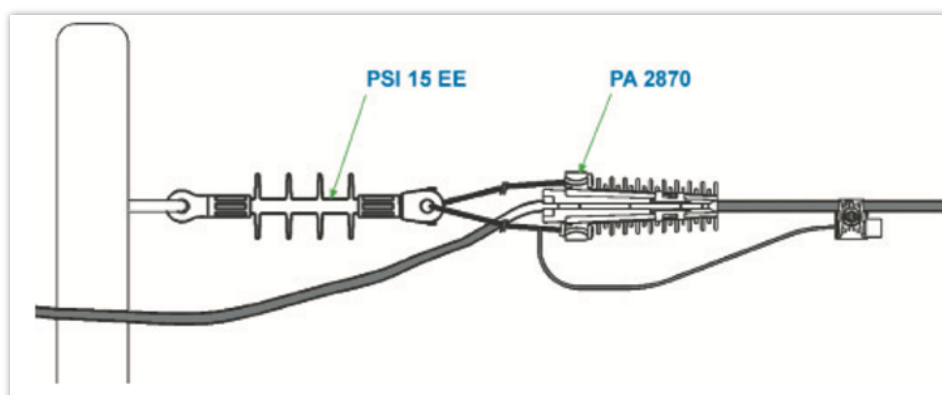
Slika 4.4.1. Klinasta zatezna stezaljka (lijevo) i zatezna spona (desno) [6]

PA 2850 P, PA 2835 P, PA 2870 P. (Slika 4.4.2.)

Zatezna stezaljka za zatezna stupna mjesta opremljena je strujnom stezaljkom za probijanje izolacije (izjednačavanje potencijala). Koristi se za presjeke vodiča od 35 mm² do 95 mm² i za vanjski promjer vodiča od 11,0 mm do 17,5 mm. Nije potrebno skidati izolaciju s vodiča. [7]



Slika 4.4.2. Žičana zatezna stezaljka PA2850 P proizvođača SICAME [7]



Slika 4.4.3. Prikaz spoja zatezne stezaljke na zatezni izolator. [7]

4.5. Zaštitni pribor za poluizolirane vodiče

Korištenje zaštitnog pribora značajno smanjuje broj kvarova i troškove popravaka uzrokovanih prenaponima na poluizoliranim vodovima. Probleme kod takvih vodova predstavlja bliski udar groma, koji rezultira induciranim prenaponima u vodičima. Visina inducirano groma ovisi o parametrima udara i udaljenosti udara. Prenaponski val putuje kroz vodove u sve tri faze i u oba smjera. Kako bi se zaštitili od direktnih udara groma, ne koristi se zaštitni vodič na poluizoliranim vodovima, već se primjenjuju drugačiji zaštitni uređaji.

Ukoliko vod nema odgovarajuću prenaponsku zaštitu mogu se dogoditi sljedeći scenariji:

1. Amplituda naponskog vala je manja od probojne čvrstoće izolatora i vodiča, pa nema posljedica na stupu. Naponski val putuje dalje dok se ne priguši ili uzrokuje problem na drugom mjestu.
2. Amplituda naponskog vala je veća od probojne čvrstoće izolatora i vodiča, što dovodi do proboja izolacije i preskoka električnog luka pri pogonskoj frekvenciji od 50 Hz, uzrokujući kratki spoj. Zbog električnog luka dolazi do izgaranja izolacije vodiča, što traje sve dok relejna zaštita ne djeluje.

Radi navedenih razloga, prenaponska zaštita se postavlja na krajevima vodova što bliže energetskom transformatoru ili na određenim mjestima duž trase gdje postoji opravdan razlog za ugradnju odvodnika prenapona (koji se postavljaju na zatezna uporišta). Zaštita se može izvesti iskrištima, ali preporučuje se korištenje odvodnika prenapona s nelinearnim otporima poput metal-oksidnih odvodnika prenapona (ZnO odvodnici prenapona).



Slika 4.5.1. Zaštitno iskrište (lijevo) i odvodnik prenapona s spojnom opremom (desno) [5]

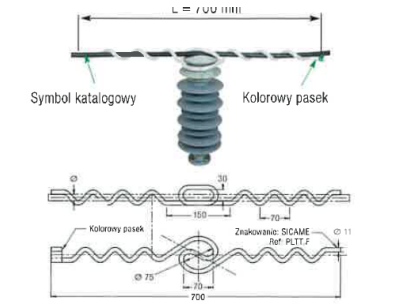
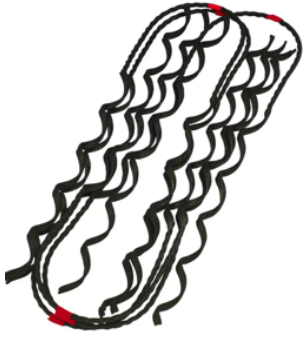
4.6. Predformirani vezovi

Predformirani vezovi se koriste kod poluizoliranih nadzemnih vodova elektroenergetskog sustava kako bi se spojile dvije konstrukcije vodova (npr. stupova) koje se nalaze na određenoj udaljenosti jedna od druge. Ovi vezovi se sastoje od izoliranih žica koje su prethodno oblikovane u specifične oblike kako bi se mogle jednostavno i sigurno spojiti na konstrukcije vodova bez potrebe za izvođenjem zavojnica i drugih složenih postupaka spajanja.

Predformirani vezovi se obično koriste na mjestima gdje je potrebno premostiti prepreke poput cesta, rijeka, pruga ili drugih prepreka koje se nalaze na putu vodova. Također, oni se koriste i na mjestima gdje je potrebno promijeniti smjer voda ili kada je potrebno omogućiti rastezanje i skupljanje vodova uslijed promjena temperature ili drugih čimbenika.

Korištenje predformiranih vezova pomaže u poboljšanju učinkovitosti i pouzdanosti elektroenergetskog sustava jer se na taj način smanjuje potreba za ručnim spajanjem žica što smanjuje mogućnost grešaka i ljudskog utjecaja na kvalitetu spojeva.

Tablica 4.6.1. Kataloški primjerci zaštitnih navlaka za ptice od proizvođača Sicame i Ensto te njihove karakteristike. [7]

SICAME	ENSTO
 <ul style="list-style-type: none"> - PLTT 2F - Za vezanje PI vodiča na glavu potpornog izolatora - izrađen u potpunosti od plastičnog materijala - za izolator SIW 24 G2 (sicame) - za vanjski promjer vodiča 9,9 – 15,2 mm 	 <ul style="list-style-type: none"> - SO115 - Za vezanje PI vodiča na glavu potpornog izolatora - Za glavu izolatora promjera 73 mm i 85 mm - Mogu se koristiti za vezanje i na vrh i sa strane - Za vodiče presjeka 35-62mm²

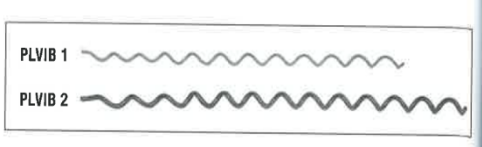

Svi predformirani vezovi se izrađuju od izoliranih (ne vodljivih) materijala koji ne provode struju.

4.7. Antivibracijski elementi

Koriste se kako bi se smanjila vibracija uzrokovana vjetrom ili drugim vanjskim čimbenicima na nadzemnim vodovima.

Ovi elementi su vrlo važni jer vibracije koje se javljaju na nadzemnim vodovima mogu uzrokovati oštećenja na vodovima, nosačima i drugim dijelovima sustava što može dovesti do kvarova ili prekida u opskrbi energijom. Stoga je važno redovito provjeravati stanje antivibracijskih elemenata i zamijeniti ih ako su oštećeni ili istrošeni.

Tablica 4.7.1. Prikaz antivibracijskih elemenata iz kataloga te njihove karakteristike. [7]

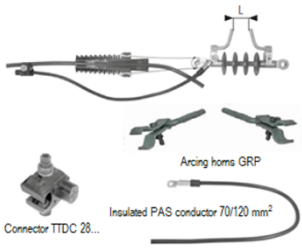


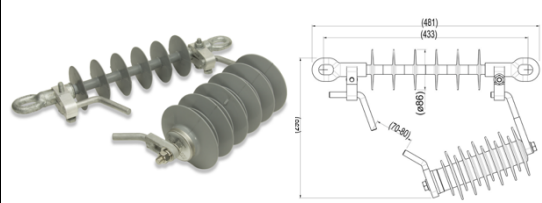
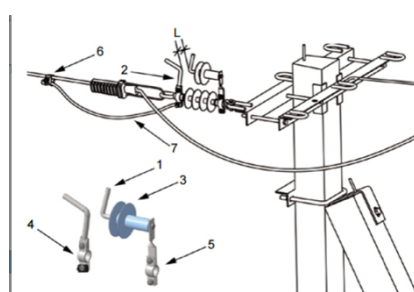

SICAME	ENSTO
 <p>- PLVIB 1</p> <ul style="list-style-type: none">- za smanjivanje utjecaja eolskih vibracija (na 35 mm² posebno problem predstavljaju eolske vibracije)- za presjek vodiča 35-70 mm²	 <p>- CO 27</p> <ul style="list-style-type: none">- za smanjivanje utjecaja eolskih vibracija (na 35 mm² posebno problem predstavljaju eolske vibracije)- za presjek vodiča 35-70 mm² (vanjski presjek PI vodiča 11,5-14,5mm)

4.8. Zaštitna oprema (zaštitna iskrišta)

Koriste se za zaštitu vodova od udara groma i drugih prenapona. Ta iskrišta su pričvršćena na vrhovima polova nosača vodova i povezana su s uzemljenjem.

Kada se pojavi prenapon na vodovima, zaštitna iskrišta će se aktivirati i usmjeriti struju na uzemljenje kako bi se spriječilo oštećenje vodova i drugih dijelova sustava, jer se prilikom udara groma stvara vrlo visoki napon koji može oštetiti vodič i električnu opremu. Zaštitna iskrišta, poznata i kao iskrišta za udar munje, koriste se kao provodnici visokog napona. Oni preusmjeravaju udar munje s vodiča na sigurnu putanju prema zemlji, zaobilazeći tako osjetljivu opremu i održavajući kontinuitet napajanja.

Tablica 4.8.1. Prikaz zaštitne opreme dvaju proizvođača i njihove karakteristike. [7]

SICAME	ENSTO
 <p style="text-align: center;">- ECL-PSI 2870 P</p> <ul style="list-style-type: none"> - Zaštitno iskrište (rogovi) za zatezne izolatore <li style="padding-left: 40px;">- za 35-157 mm² - U kompletu dolazi: rogovi, strujna stezaljka i PAS vodič za povezivanje 	 <p style="text-align: center;">- SDI 10.2</p> <ul style="list-style-type: none"> - Zaštitno iskrište (rogovi) za zatezne izolatore - U kompletu dolazi: rogovi i PAS vodič za povezivanje <li style="padding-left: 40px;">- povezuje se direktno na zateznu stezaljku
 <p style="text-align: center;">- GOPk 2</p> <ul style="list-style-type: none"> - Zaštitno iskrište za potporne izolatore <li style="padding-left: 40px;">- za 50-157 mm² - U kompletu dolazi: rogovi strujna stezaljka (TNDC 28401 FA) 	 <p style="text-align: center;">- SDI46.824</p> <ul style="list-style-type: none"> - Zaštitno iskrište s odvodnikom prenapona (zaštitni uređaj s ograničavanjem struje) - Za zatezne izolatore
 <p style="text-align: center;">- AZIC 15 PSI 2870</p> <p>Zaštitno iskrište s odvodnikom prenapona (zaštitni uređaj s ograničavanjem struje)</p>	 <p style="text-align: center;">- SDI 20.2</p> <ul style="list-style-type: none"> - Zaštitno iskrište za potporne izolatore <li style="padding-left: 40px;">- za 50-157 mm² - Debljina izolacije PI vodiča max. 3mm

4.9. Zaštitne navlake za ptice

Zaštitne navlake za ptice kod nadzemnih vodova su posebne navlake koje se postavljaju na vodove kako bi se spriječilo da ptice slete na njih i time izbjegle mogući kontakt s električnom energijom. Koriste se u područjima gdje ptice žive ili migriraju kao što su polja, šume i obalna područja.

Postavljanje zaštitnih navlaka na nadzemne vodove ima dvostruku korist. Štiti ptice od mogućeg kontakta s električnom energijom i smanjuje mogućnost da ptice izazovu prekide u napajanju uzrokovane doticanjem vodova. Učestalost takvih prekida može biti veliki problem za elektroprivredu jer ometa napajanje električnom energijom u široj regiji.

Zaštitne navlake za ptice obično se izrađuju od materijala koji su otporni na vremenske uvjete i UV zrake te su jednostavne za postavljanje i održavanje. Postoje različite vrste zaštitnih navlaka ovisno o veličini i obliku vodova kao i vrsti ptica koje su prisutne u području.

Tablica 4.9.1. Kataloški primjerci zaštitnih navlaka za ptice od proizvođača Sicame i Ensto te njihove karakteristike. [7]

SICAME	ENSTO
<p>► SCC1 – osłony uchwytyw odciągowych</p>  <p>- SCC1</p> <p>- Zaštitna navlaka za zaštitu ptica i drugih malih životinja</p>	 <p>- SP 63.3</p> <p>- Zaštitna navlaka za zateznu stezaljku SO255 na zateznim stupovima</p>
<p>Važno je napomenuti da se zaštitne navlake za ptice ne smiju smatrati jedinim rješenjem za sprječavanje kontakta ptica s električnom energijom. Električne kompanije također koriste druge metode zaštite, kao što su izolacijske platforme za vodove, zaštitne kape za izolatore i posebno dizajnirane konstrukcije stupova koji otežavaju pticama pristup vodovima.</p>	 <p>- SP 45.3</p> <p>- Zaštitna navlaka za zateznu stezaljku SO255 na zateznim stupovima</p> <p>- Pokriva zaštitno iskrište s gornje stran</p>

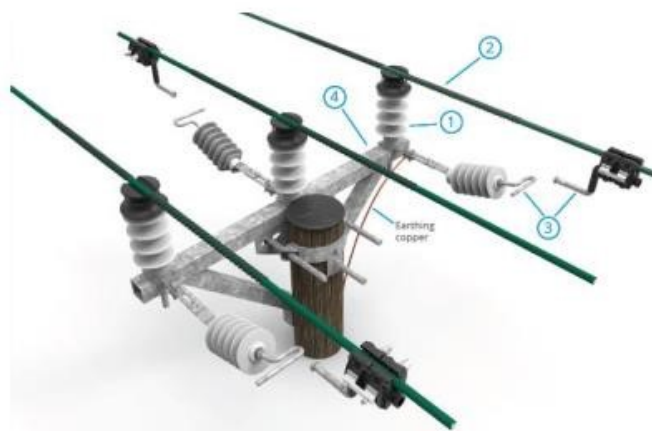
4.10. Stupovi

Stupovi, temelji i uzemljenja za poluizolirane vodove srednjeg napona izvode se na sličan način kao i za klasične vodove s neizoliranim vodičima. Međutim, postoji razlika u obliku glave stupa, koja je užeg profila kako bi odgovarala specifičnostima poluizoliranih vodiča. To rezultira i užom trasom voda koja se koristi za poluizolirane vodiče.

Razmak između faznih vodiča u poluizoliranim vodovima je otprilike jedna trećina razmaka između faznih vodiča u klasičnim vodovima s neizoliranim vodičima. Ova prilagodba u razmaku omogućuje postizanje optimalne konfiguracije voda s poluizoliranim vodičima.

Jedno od mogućih rješenja za izvedbu glave stupa za poluizolirane vodove prikazano je na slici, uključujući i zaštitu od prenapona. Ova izvedba osigurava potrebnu sigurnost i funkcionalnost voda s poluizoliranim vodičima.

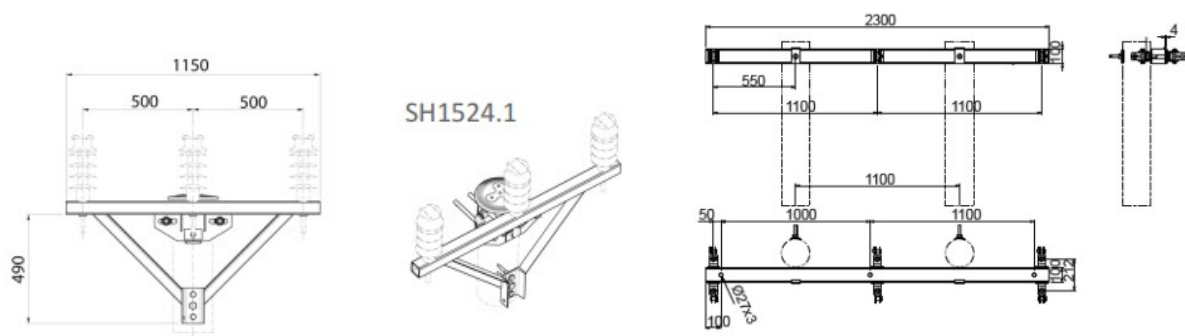
Važno je pridržavati se standardnih postupaka za izgradnju stupova, temelja i uzemljenja u skladu s propisanim smjernicama i normama kako bi se osigurala pouzdanost i sigurnost elektroenergetskog sustava koji koristi poluizolirane vodove srednjeg napona.



Slika 4.10.1. Glava stupa gama oblika s poluizoliranim vodičima i zaštitom od prenapona [5]

Na slici 4.10.1 brojevi označavaju:

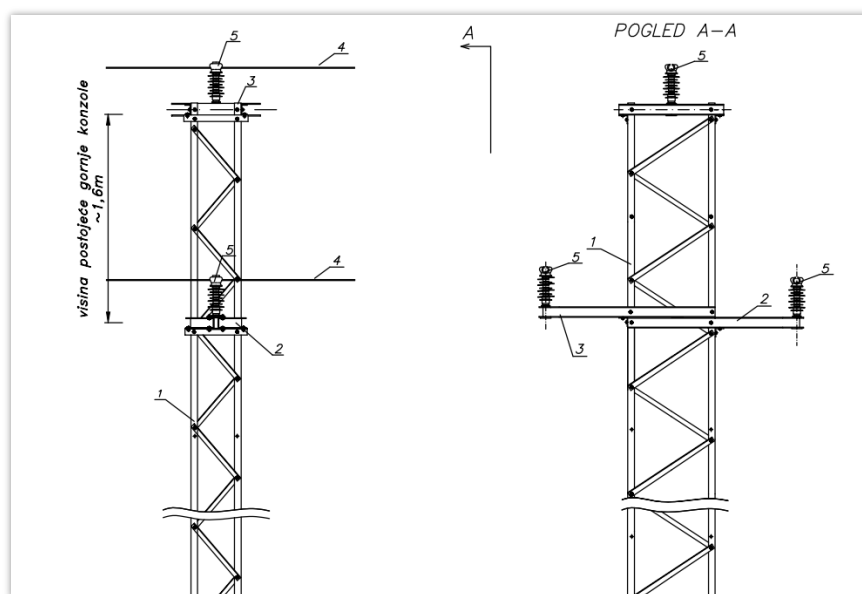
1. Izolator
2. Zatezna vezica
3. Zaštitni uređaj s funkcijom ograničavanja struje
4. Glava stupa (konzola)



Slika 4.10.2. Različiti su oblici konzole dostupni u dvije varijante - jedna s jednim stupom (lijeva slika) i druga s dva stupa (desna slika). [5]

Konzole koje podupiru konstrukcije izrađuju se od pocinčanog čelika (FeZn) kako bi se spriječila korozija. Širina konzole glave stupa varira ovisno o vrsti konzole i broju stupova na koje se oslanja, a nalazi se unutar raspona od 1150 do 2300 mm. kao što je prikazano na slici 4.10.2.

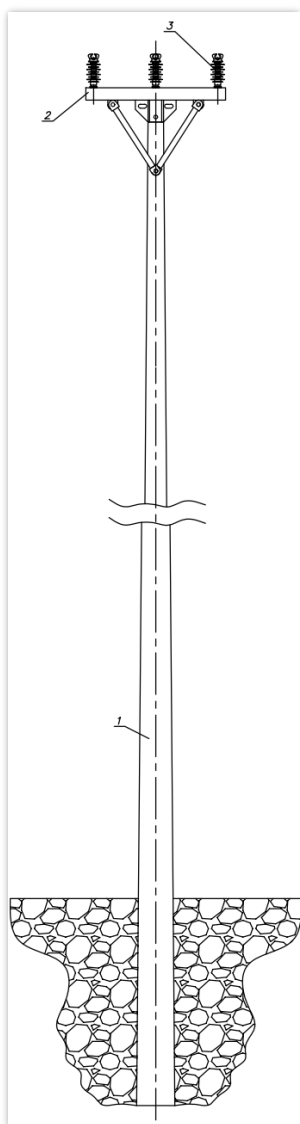
Postoji nekoliko različitih vrsta stupova i glava stupa koji se koriste za projektiranje SN nadzemnih vodova, a odabir odgovarajuće vrste stupova ovisi o različitim faktorima kao što su raspon, naponski nivo, teren, okolišni uvjeti i financijski aspekti. Za SN vodove Najčešće se koriste čelični stupovi jer imaju duži životni vijek od drvenih stupova, a drveni stupovi se danas uglavnom koriste ako su u dobrom stanju prilikom rekonstrukcije postojećeg SN voda.



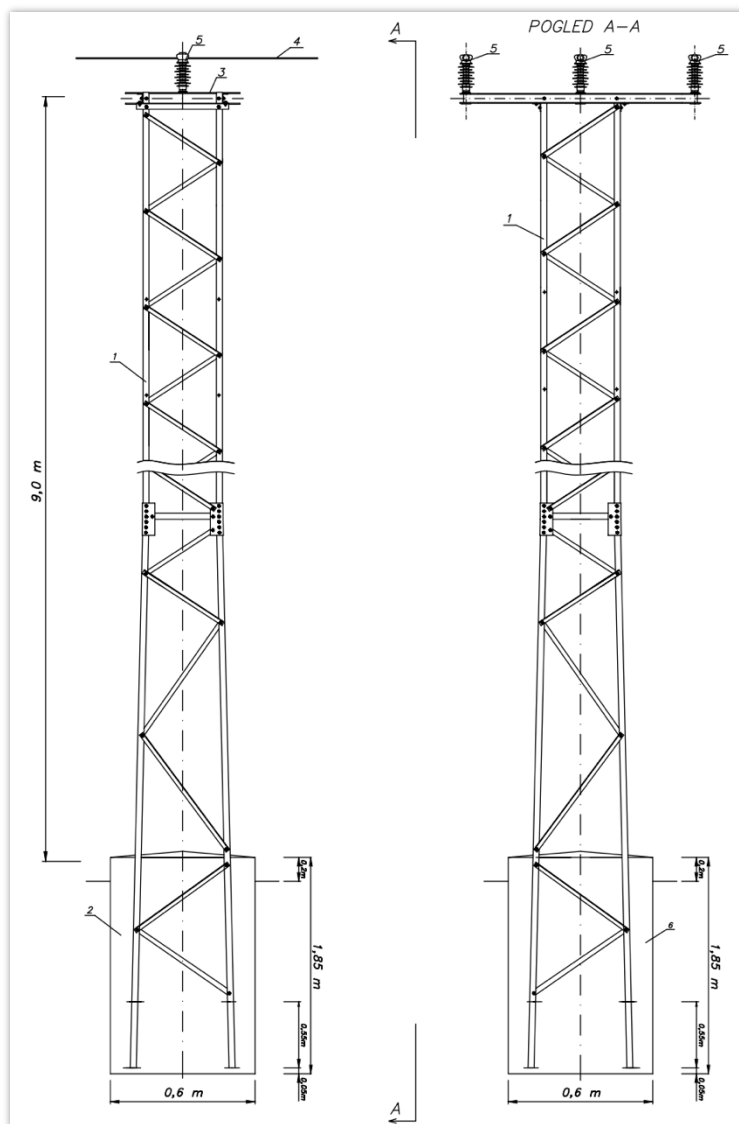
Slika 4.10.3. Čelično rešetkasti stup tipa L9, „delta“ glava stupa [8]

Drveni stupovi (slika 4.10.4) su tradicionalni i često korišteni stupovi za nadzemne vodove. Izrađeni su od drva visoke kvalitete, poput hrasta ili ariša. Ovi stupovi imaju dobru izolacijsku sposobnost, relativno niske troškove i lako se mogu zamijeniti. Međutim, podložni su truljenju, oštećenju od insekata i zahtijevaju redovito održavanje.

Čelično rešetkasti stupovi (slika 4.10.5) su izuzetno jaki i otporni na mehanička opterećenja. Oni se često koriste u područjima s visokim vjetrom ili teškim snježnim uvjetima. Čelični stupovi su također izdržljivi i zahtijevaju minimalno održavanje. Mogu biti izrađeni od različitih čeličnih legura kako bi se postigla potrebna čvrstoća i otpornost na koroziju.



Slika 4.10.4. Drveni stup [8]



Slika 4.10.5. Čelično rešetkasti stup tip NAH visine 9m, „gama“ glava stupa [8]

5. MEHANIČKI PRORAČUN SN NADZEMNIH VODOVA SA POLUIZOLIRANIM VODIČIMA – OPĆENITO

Kod projektiranja nadzemnih vodova, potrebno je izvršiti analizu električnih parametara i mehanički proračun vodiča. Mehanički proračun ima ključnu ulogu jer se provjeravaju naprezanja na stupovima i na vodičima uzimajući u obzir različite faktore kao što su temperatura, dodatno opterećenje, utjecaj vjetra itd.

Mehanički proračun vodiča obuhvaća izračun dužine užeta u rasponima i provjesa vodiča u različitim uvjetima. Standardno se proračun izvodi za temperaturne uvjete od +40°C, -5°C s dodatnim opterećenjem (led, snijeg, inje) i -20°C bez dodatnog opterećenja.

U slučaju nadzemnih vodova s poluizoliranim vodičima, postoji još jedan uvjet koji se mora zadovoljiti, a to je da vrijednost radnog naprezanja poluizoliranog vodiča na temperaturi od 0°C treba biti $3,5 \pm 0,5$ daN/mm². Ovaj uvjet je važan kako bi se spriječilo pojavljivanje eolskih vibracija koje su karakteristične za poluizolirane vodiče zbog njihove veće osjetljivosti na takve vibracije u usporedbi s neizoliranim vodičima.

Sigurnost svih u okolini voda i pouzdanost rada samog voda su od velike važnosti, stoga je neophodno osigurati da provjesi vodiča zadovoljavaju sve sigurnosne uvjete propisane standardima.

Prilikom proračuna, uzimaju se u obzir sljedeće pretpostavke [9]:

- Vodič je homogen i elastičan.
- Specifična masa vodiča m_1 [kg/m] jednaka je po duljini.
- Vodič je obješen između dvije točke A i B.
- Horizontalna komponenta σ_0 [N/mm²] ukupnog naprezanja vodiča σ [N/mm²] jednaka je u svakoj točki vodiča jer ne postoji nikakav prirast horizontalnog naprezanja

Mehanički proračun vodiča započinje izračunom vlastite i reducirane težine vodiča, G_0 i g_0 :

Vlastita težina vodiča:

$$G_0 = m_1 \cdot g \left[\frac{N}{m} \right] \quad (5.1)$$

Reducirana težina vodiča:

$$g_0 = \frac{G_0}{A} \left[\frac{N}{m \cdot mm^2} \right] \quad (5.2)$$

gdje je:

- g – gravitacijska konstanta; $g = 9,81 \text{ m/s}$
- A – presjek vodiča; $[mm^2]$
- m_i – uzdužna masa vodiča; $[kg/m]$

Nakon izračuna reducirane težine vodiča, potrebno je također uzeti u obzir dodatno opterećenje koje vodič podnosi pri temperaturama od -5°C . Dodatno opterećenje proizlazi iz prisutnosti leda, snijega i inja. U daljnjem proračunu primjenjuje se sljedeći postupak kako bi se uračunalo to dodatno opterećenje.

Normalno dodatno opterećenje:

$$G_{10} = 0,18 \cdot \sqrt{d} \cdot g \left[\frac{N}{m} \right] \quad (5.3)$$

Stvarno dodatno opterećenje uslijed zaleđivanja:

$$G_1 = k \cdot G_{10} \left[\frac{N}{m} \right] \quad (5.4)$$

U izrazu (5.3), d označava promjer vodiča u $[mm]$.

U izrazu (5.4.), oznaka k označava faktor normalnog dodatnog tereta, ovisi o geografskom području gdje se nalazi vod, a može iznositi: $k = 1 - 1,6 - 2,5 - 10 \Rightarrow$ preporuka je za poluizolirani vodič uzeti da je $k = 1,6$

Te je konačna (reducirana) težina zaleđenog vodiča:

$$g_z = \frac{G_0 + G_1}{A} \left[\frac{N}{m \cdot mm^2} \right] \quad (5.5)$$

U praksi prilikom izračunavanja mehaničkog proračuna konačna težina zaleđenog vodiča izražava se u $\left[\frac{N}{m \cdot mm^2}\right]$ dok se u stvarnim projektima takvi izrazi preračunavaju u $\left[\frac{daN}{m \cdot mm^2}\right]$ što je jednako kao opterećenje u kilogramima.

Koristeći dostupne podatke, izračunava se kritični raspon a_k koji uz idealni raspon $a_{idealno}$ omogućuje određivanje maksimalnog opterećenja vodiča pri temperaturi od -20°C ili pri $-5^\circ\text{C} + \text{LED}$. Kritični raspon se izračunava koristeći maksimalno naprezanje vodiča (označeno kao σ_{max}) u izrazu:

$$a_k = \sigma_{max} \sqrt{\frac{360\beta}{g_z - g_0^2}} [m] \quad (5.4)$$

A idealni se raspon izračunava prema izrazu (5.5):

$$a_{idealno} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n a_i^3}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^2}{a_i}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^3}{a_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^2}{a_i}}} [m] \quad (5.5)$$

U izrazu (5.5) $a_{idealno}$ predstavlja duljine raspona svakog pojedinog ovjesišta, koje su korigirane zbog denivelacije ovjesišta:

$$a' = \sqrt{h^2 + a^2} [m] \quad (5.6)$$

Na temelju toga, može se odrediti početno stanje jednadžbe stanja prema sljedećim uvjetima:

1. ako je $a_{idealno} < a_k$, tada je početno stanje pri temperaturi od -20°C bez dodatnog opterećenja
2. ako je $a_{idealno} > a_k$, tada je početno stanje pri temperaturi od $-5^\circ\text{C} + \text{LED}$

Prije nego što se podaci unesu u konačnu jednadžbu stanja, treba izračunati nadomjesno maksimalno naprezanje prema izrazu (5.7). Ovo je potrebno zbog činjenice da su oslonci vodiča rijetko postavljeni na istoj visini te se javlja denivelacija.

$$\bar{\sigma}_1 = \sigma_{max} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^3}{a_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^2}{a_i}} \left[\frac{N}{m}\right] \quad (5.7)$$

Ako između uporišta nema nikakve razlike u visini, odnosno nema denivelacije, tada vrijedi:

$$\bar{\sigma} = \sigma = \sigma_{max} \quad (5.8)$$

Preporučuje se da maksimalno radno naprezanje za poluizolirane vodiče iznosi $80 \frac{N}{m^2}$, dok za višesistemske SN nadzemne vodove s poluizoliranim vodičima na određenim mjestima gdje se zahtijeva smanjeno naprezanje (npr. prelazi preko autoputa, željezničkih pruga, plovnih rijeka i kanala) iznosi $70 \frac{N}{m^2}$. [4]

Konačno, jednačba stanja može se riješiti korištenjem nekih od metoda za rješavanje kubnih jednačbi, prema izrazu (5.9). Indeks 1 u izrazu označava početna stanja koja su određena prema gore navedena dva uvjeta, dok indeks 2 predstavlja vrijednosti na temperaturi koja se izračunava.

$$\frac{\bar{g}_1 - \bar{g}_2}{E} + \beta (\vartheta_1 - \vartheta_2) = \frac{a_{idealno}^2}{24} \left(\frac{g_1^2}{6_1^2} - \frac{g_2^2}{6_2^2} \right) \quad (5.9)$$

Izraz (5.9) koji je naveden označava da se E odnosi na modul elastičnosti, a nalazi se u tablicama proizvođača s jedinicom N/mm². Oznaka β predstavlja koeficijent linearnog toplinskog širenja, a mjerne jedinice su °C⁻¹. Ova jednačba se može rješavati računalno, što je najjednostavnije i uobičajeno u praksi, ali se može rješavati i ručno primjenom iteracijskih postupaka za rješavanje kubne jednačbe.

Važno je napomenuti da se za sve temperature, osim pri -5°C, dodatno opterećenje izračunava uzimajući u obzir smanjenu težinu nezaleđenog vodiča, dok se pri -5°C koristi smanjena težina zaleđenog vodiča (izraz (5.5)).

Gornji izraz treba riješiti kako bi se dobila naprezanja kao rezultat, uz različite vrijednosti temperatura u rasponu od -20°C do +40°C. Ako postoje denivelacije, rezultat će biti nadomjesno naprezanje koje treba pretvoriti u stvarno naprezanje. To se može postići izokretanjem izraza (5.7) koji onda glasi:

$$\sigma = \bar{\sigma} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \frac{a_i^3}{a_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i^2}{a_i}} \left[\frac{N}{mm^2 \cdot m} \right] \quad (5.10)$$

Izračunavanje idealnog provjesa za idealni raspona, ovisno o temperaturi ϑ , može se izvesti na sljedeći način:

$$f = \frac{a_{idealno}^2 \cdot g_0}{8 \cdot 6_9} \quad (5.11)$$

A horizontalna sila na idealnom rasponu pri temperaturi ϑ :

$$F_H = \sigma \cdot A \quad (5.12)$$

Nakon provedenih prethodno navedenih proračuna, moguće je odrediti provjes f pri različitim temperaturama ϑ :

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_1 \cdot g_0}{8 \cdot \sigma} [m] \quad (5.13)$$

Konačna provjera se može obaviti izračunavanjem kritične temperature, na sličan način kao i kritični raspon. Postoje dvije mogućnosti za rješavanje:

- Ako je kritična temperatura (ϑ_k) manja od $+40^\circ\text{C}$, tada se najveći provjes vodiča javlja pri temperaturi $+40^\circ\text{C}$.
- Ako je kritična temperatura (ϑ_k) veća od $+40^\circ\text{C}$, tada se najveći provjes vodiča javlja pri temperaturi -5°C s ledom.

A kritična se temperatura ϑ_k određuje prema formuli:

$$\vartheta_k = \frac{\sigma_z}{\beta E} \left(1 - \frac{g_0}{g_z} \right) - 5 \quad [^\circ\text{C}] \quad (5.14)$$

U izrazu (5.14) koristi se simbol σ_z koji označava naprezanje vodiča pod dodatnim teretom leda, snijega iliinja. Današnji proizvođači često pružaju gotove tablice koje prikazuju provjes poluizoliranih vodiča određenih presjeka, uzimajući u obzir temperaturu, zateznu silu i duljinu raspona, no te tablice su uglavnom za horizontalne raspone.

Na sljedećim slikama može se vidjeti primjer takvih tablica za poluizolirane vodiče presjeka 70mm^2 i 120mm^2 , izrađen od aluminijeve legure AlMgSi, s bubrivim nitima koje sprječavaju prodor vlage u vodič. Oznake vodiča su: CCST AAAC 70/120mm², 20(24kV). U tablicama su navedeni izrazi na engleskom jeziku, prijevodi engleskih izraza na hrvatski: "Površina vodiča" za „Conductor area“, "Odgovarajući raspon" za „Equivalent span“, "Temperatura vodiča" za "Cond. Temp", "Zatezna sila" za "Tensile force", "provjes vodiča u metrima na rasponu" za "sag in meters at span" [5].

CCST AAAC 70mm², 20(24)kV

Conductor area = 70 mm², CCST AlMgSi, 20(24)kV,
Equivalent span = 80 m, Stress value in conductor at 0°C = 30N/mm²

Cond.-temp °C	Tensile-force N	Sag in meters at a span																	
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
50	1277	0,03	0,12	0,27	0,48	0,75	1,08	1,47	1,92	2,43	3,00	3,63	4,33	5,08	5,89	6,76	7,69	8,68	9,73
45	1323	0,03	0,12	0,26	0,46	0,72	1,04	1,42	1,86	2,35	2,90	3,51	4,17	4,90	5,68	6,52	7,42	8,38	9,39
40	1374	0,03	0,11	0,25	0,45	0,70	1,01	1,37	1,79	2,26	2,79	3,38	4,02	4,72	5,47	6,28	7,15	8,07	9,05
35	1430	0,03	0,11	0,24	0,43	0,67	0,97	1,31	1,72	2,17	2,68	3,25	3,86	4,53	5,26	6,03	6,87	7,75	8,69
30	1493	0,03	0,10	0,23	0,41	0,64	0,92	1,26	1,64	2,08	2,57	3,11	3,70	4,34	5,04	5,78	6,58	7,42	8,32
25	1564	0,02	0,10	0,22	0,39	0,61	0,88	1,20	1,57	1,99	2,45	2,97	3,53	4,15	4,81	5,52	6,28	7,09	7,95
20	1644	0,02	0,09	0,21	0,37	0,58	0,84	1,14	1,49	1,89	2,33	2,82	3,36	3,94	4,57	5,25	5,97	6,74	7,56
15	1735	0,02	0,09	0,20	0,35	0,55	0,80	1,08	1,42	1,79	2,21	2,68	3,18	3,74	4,33	4,98	5,66	6,39	7,17
10	1839	0,02	0,08	0,19	0,33	0,52	0,75	1,02	1,34	1,69	2,09	2,52	3,00	3,53	4,09	4,69	5,34	6,03	6,76
5	1960	0,02	0,08	0,18	0,31	0,49	0,70	0,96	1,25	1,59	1,96	2,37	2,82	3,31	3,84	4,41	5,01	5,66	6,34
0	2100	0,02	0,07	0,16	0,29	0,46	0,66	0,90	1,17	1,48	1,83	2,21	2,63	3,09	3,58	4,11	4,68	5,28	5,92
-5	2263	0,02	0,07	0,15	0,27	0,42	0,61	0,83	1,09	1,37	1,70	2,05	2,44	2,87	3,32	3,82	4,34	4,90	5,49
-10	2453	0,02	0,06	0,14	0,25	0,39	0,56	0,77	1,00	1,27	1,56	1,89	2,25	2,64	3,07	3,52	4,00	4,52	5,07
-15	2674	0,01	0,06	0,13	0,23	0,36	0,52	0,70	0,92	1,16	1,43	1,74	2,07	2,42	2,81	3,23	3,67	4,15	4,65
-20	2930	0,01	0,05	0,12	0,21	0,33	0,47	0,64	0,84	1,06	1,31	1,58	1,89	2,21	2,57	2,95	3,35	3,78	4,24
-25	3223	0,01	0,05	0,11	0,19	0,30	0,43	0,58	0,76	0,96	1,19	1,44	1,71	2,01	2,33	2,68	3,05	3,44	3,86
-30	3552	0,01	0,04	0,10	0,17	0,27	0,39	0,53	0,69	0,87	1,08	1,31	1,56	1,83	2,12	2,43	2,77	3,12	3,50

Slika 5.2. Provjersi pri različitim temperaturama iz ENSTO kataloga za poluizolirane vodiče nazivnog 70mm² [5]

CCST AAAC 120mm², 20(24)kV

Conductor area = 120mm², CCST AlMgSi, 20(24)kV,
Equivalent span = 80m, Stress value in conductor at 0°C = 30N/mm²

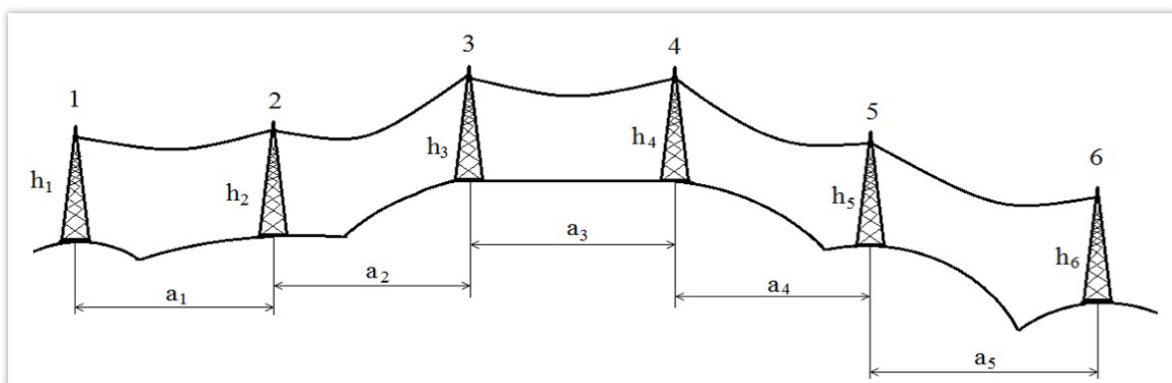
Cond.-temp °C	Tensile-force N	Sag in meters at a span																	
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
50	2071	0,03	0,12	0,26	0,46	0,72	1,04	1,42	1,85	2,34	2,89	3,50	4,16	4,89	5,67	6,50	7,40	8,35	9,37
45	2151	0,03	0,11	0,25	0,45	0,70	1,00	1,36	1,78	2,25	2,78	3,37	4,01	4,70	5,45	6,26	7,12	8,04	9,02
40	2241	0,03	0,11	0,24	0,43	0,67	0,96	1,31	1,71	2,16	2,67	3,23	3,85	4,51	5,24	6,01	6,84	7,72	8,65
35	2341	0,03	0,10	0,23	0,41	0,64	0,92	1,25	1,64	2,07	2,56	3,09	3,68	4,32	5,01	5,75	6,55	7,39	8,29
30	2455	0,02	0,10	0,22	0,39	0,61	0,88	1,19	1,56	1,98	2,44	2,95	3,51	4,12	4,78	5,49	6,24	7,05	7,90
25	2583	0,02	0,09	0,21	0,37	0,58	0,83	1,14	1,48	1,88	2,32	2,80	3,34	3,92	4,54	5,21	5,93	6,70	7,51
20	2730	0,02	0,09	0,20	0,35	0,55	0,79	1,07	1,40	1,78	2,19	2,65	3,16	3,71	4,30	4,93	5,61	6,34	7,11
15	2900	0,02	0,08	0,19	0,33	0,52	0,74	1,01	1,32	1,67	2,06	2,50	2,97	3,49	4,05	4,64	5,28	5,97	6,69
10	3097	0,02	0,08	0,17	0,31	0,48	0,70	0,95	1,24	1,57	1,93	2,34	2,78	3,27	3,79	4,35	4,95	5,59	6,26
5	3328	0,02	0,07	0,16	0,29	0,45	0,65	0,88	1,15	1,46	1,80	2,18	2,59	3,04	3,53	4,05	4,60	5,20	5,83
0	3600	0,02	0,07	0,15	0,27	0,42	0,60	0,81	1,06	1,35	1,66	2,01	2,40	2,81	3,26	3,74	4,26	4,81	5,39
-5	3920	0,02	0,06	0,14	0,24	0,38	0,55	0,75	0,98	1,24	1,53	1,85	2,20	2,58	2,99	3,44	3,91	4,41	4,95
-10	4297	0,01	0,06	0,13	0,22	0,35	0,50	0,68	0,89	1,13	1,39	1,69	2,01	2,35	2,73	3,14	3,57	4,03	4,51
-15	4736	0,01	0,05	0,11	0,20	0,32	0,46	0,62	0,81	1,02	1,26	1,53	1,82	2,14	2,48	2,84	3,24	3,65	4,10
-20	5242	0,01	0,05	0,10	0,18	0,29	0,41	0,56	0,73	0,93	1,14	1,38	1,64	1,93	2,24	2,57	2,92	3,30	3,70
-25	5814	0,01	0,04	0,09	0,16	0,26	0,37	0,50	0,66	0,83	1,03	1,25	1,48	1,74	2,02	2,32	2,64	2,98	3,34
-30	6447	0,01	0,04	0,08	0,15	0,23	0,33	0,46	0,59	0,75	0,93	1,12	1,34	1,57	1,82	2,09	2,38	2,68	3,01

Slika 5.3. Provjersi pri različitim temperaturama iz ENSTO kataloga za poluizolirane vodiče presjeka 99mm² [5]

6. ANALITIČKI MEHANIČKI PRORAČUN SN VODA SA POLUIZOLIRANIM VODIČIMA

Code	Old code	Area mm ²	No. of wires	Diameter		Mass per unit length kg/km	Rated strength kN	DC resistance Ohm/km	Final modulus of elasticity N/mm ²	Coefficient of linear expansion 1/K	Current carrying capacity A
				Wire	Cond.						
				mm	mm						
16-AL3	16	15,9	7	1,70	5,10	43,4	4,69	2,0701	60000	2,30E-05	105
24-AL3	25	24,2	7	2,10	6,30	66,2	7,15	1,3566	60000	2,30E-05	135
34-AL3	35	34,4	7	2,50	7,50	93,8	10,14	0,9572	60000	2,30E-05	170
49-AL3	50	49,5	7	3,00	9,00	135,1	14,60	0,6647	60000	2,30E-05	210
48-AL3	50	48,3	19	1,80	9,00	132,7	14,26	0,6841	57000	2,30E-05	210
66-AL3	70	65,8	19	2,10	10,5	180,7	19,41	0,5026	57000	2,30E-05	255
93-AL3	95	93,3	19	2,50	12,5	256,0	27,51	0,3546	57000	2,30E-05	320
117-AL3	120	117,0	19	2,80	14,0	321,2	34,51	0,2827	57000	2,30E-05	365
147-AL3	150	147,1	37	2,25	15,8	405,3	43,40	0,2256	57000	2,30E-05	425
182-AL3	185	181,6	37	2,50	17,5	500,3	53,58	0,1827	57000	2,30E-05	490
243-AL3	240	242,5	61	2,25	20,3	670,3	71,55	0,1373	55000	2,30E-05	585
299-AL3	300	299,4	61	2,50	22,5	827,5	88,33	0,1112	55000	2,30E-05	670
400-AL3	400	400,1	61	2,89	26,0	1105,9	118,04	0,0832	55000	2,30E-05	810
500-AL3	500	499,8	61	3,23	29,1	1381,4	147,45	0,0666	55000	2,30E-05	930
626-AL3	625	626,2	91	2,96	32,6	1737,7	184,73	0,0534	55000	2,30E-05	1075
802-AL3	800	802,1	91	3,35	36,9	2225,8	236,62	0,0417	55000	2,30E-05	1255
1000-AL3	1000	999,7	91	3,74	41,1	2774,3	294,91	0,0334	55000	2,30E-05	1450

Slika 6.1. Dokument koji sadrži propisane vrijednosti aluminijskih PIV tipa AL3 po europskoj normi EN50182/2001[10]



Slika 6.2. Zatezno polje od 5 raspona [11]

Tablica 6.1. Podatci vodiča CCSX_AL3_70 dobiveni iz slike 2.3.3 i slike 6.1 [11]

Podatci vodiča	CCSX_AL3_70
Nazivni presjek / mm ²	70
Računski presjek A / mm ²	65,8
Promjer vodiča d / mm	15,2
Uzdužna masa $m_1 / \frac{kg}{m}$	0,275
Modul elastičnosti $E / \frac{N}{mm^2}$	60000
Koeficijent linearnog toplinskog istežanja $\beta / \frac{1}{^\circ C}$	$23 \cdot 10^{-6}$

Koeficijent dodatnog tereta: $k = 1,0$; Maksimalno radno dozvoljeno naprežanje $\sigma_d / \frac{N}{mm^2} = 80$

Tablica 6.2. Zadani rasponi između stupova dalekovoda [11]

Zadani rasponi a [m]:	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅
	50	60	65	50	65

Tablica 6.3. Zadane visine ovjesišta [11]

Visine ovjesišta h [m]:	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	h ₅	h ₆
	45	50	60	60	50	40

6.1. Korigiranje vrijednosti raspona zbog denivelacije ovjesišta

Nakon što su svi podatci prikupljeni kreće se sa mehaničkim proračunom, prvo se iz zadanih visina ovjesišta izračuna visinska razlika odnosno denivelacija ovjesišta:

Denivelacija ovjesišta:

$$h_{12} = h_2 - h_1 = 50 \text{ m} - 45 \text{ m} = 5 \text{ m} \quad (6.1.1)$$

$$h_{23} = h_3 - h_2 = 60 \text{ m} - 50 \text{ m} = 10 \text{ m} \quad (6.1.2)$$

$$h_{34} = h_4 - h_3 = 60 \text{ m} - 60 \text{ m} = 0 \text{ m} \quad (6.1.3)$$

$$h_{45} = h_5 - h_4 = 50 \text{ m} - 60 \text{ m} = -10 \text{ m} \quad (6.1.4)$$

$$h_{56} = h_6 - h_5 = 40 \text{ m} - 50 \text{ m} = -10 \text{ m} \quad (6.1.5)$$

Zbog denivelacije ovjesišta potrebno je korigirati dužine raspona svih ovjesišta.

Spojnice ovjesišta:

$$a'_1 = \sqrt{h_{12}^2 + a_1^2} = \sqrt{5^2 + 50^2} = 50,24938 \text{ m} \quad (6.1.6)$$

$$a'_2 = \sqrt{h_{23}^2 + a_2^2} = \sqrt{10^2 + 60^2} = 60,8276 \text{ m} \quad (6.1.7)$$

$$a'_3 = \sqrt{h_{34}^2 + a_3^2} = \sqrt{0^2 + 65^2} = 65 \text{ m} \quad (6.1.8)$$

$$a'_4 = \sqrt{h_{45}^2 + a_4^2} = \sqrt{-10^2 + 50^2} = 48,9898 \text{ m} \quad (6.1.9)$$

$$a'_5 = \sqrt{h_{56}^2 + a_5^2} = \sqrt{-10^2 + 65^2} = 64,22616 \text{ m} \quad (6.1.10)$$

6.2. Definiranje početnog stanja temperature za horizontalne komponente napreznja

Vlastita težina vodiča:

$$G_0 = m_1 \cdot g = 0,275 \cdot 9,81 = 2,6978 \frac{N}{m} \quad (6.2.1)$$

Reducirana težina vodiča:

$$g_0 = \frac{G_0}{A} = \frac{2,6978}{65,8} = 0,039 \frac{N}{m \cdot mm^2} \quad (6.2.2)$$

Normalno dodatno opterećenje:

$$G_{10} = 0,18 \cdot \sqrt{d} \cdot g = 0,18 \cdot \sqrt{15,2} \cdot 9,81 = 6,8844 \frac{N}{m} \quad (6.2.3)$$

Stvarno dodatno opterećenje uslijed zaleđivanja:

$$G_1 = k \cdot G_{10} = 1,0 \cdot 6,8844 = 6,8844 \frac{N}{m} \quad (6.2.4)$$

Reducirana težina zaleđenog vodiča:

$$g_z = \frac{G_0 + G_1}{A} = \frac{2,6978 + 6,8844}{65,8} = 0,137 \frac{N}{m \cdot mm^2} \quad (6.2.5)$$

Dobivena reducirana težina voda i reducirana težina zaleđenog voda omogućuju izračun kritičnog raspona a_k koji se može kasnije usporediti s idealnim rasponom $a_{idealno}$ kako bi se odredilo osnovno stanje jednadžbe stanja.

Kritični raspon:

$$a_k = \sigma_{max} \sqrt{\frac{360\beta}{g_z - g_0^2}} = 80 \cdot \sqrt{\frac{360 \cdot 23 \cdot 10^{-6}}{0,146^2 - 0,041^2}} = 55,43 \text{ m} \quad (6.2.6)$$

Idealni raspon:

$$a_{\text{idealno}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n a_i^3}{\sum_{i=1}^n a_i^2} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n a_i^2}{\sum_{i=1}^n a_i}} = \quad (6.2.7)$$

Nakon što se uvrste svi parametri (6.2.8) dobiva se idealan raspon (6.2.8):

$$= \sqrt{\frac{50^3 + 60^3 + 65^3 + 50^3 + 65^3}{\frac{50,24938^2}{50} + \frac{60,8276^2}{60} + \frac{65^2}{65} + \frac{48,9898^2}{50} + \frac{64,22616^2}{65}} \cdot \frac{\frac{50,24938^3}{50^2} + \frac{60,8276^3}{60^2} + \frac{65^3}{65^2} + \frac{48,9898^3}{50^2} + \frac{64,22616^3}{65^2}}{\frac{50,24938^2}{50} + \frac{60,8276^2}{60} + \frac{65^2}{65} + \frac{48,9898^2}{50} + \frac{64,22616^2}{65}} \quad (6.2.8)$$

$$a_{\text{idealno}} = \sqrt{\frac{1015250}{288,628} \cdot \frac{288,0053}{288,628}} = 59,181 \text{ m} \quad (6.2.9)$$

Osnovno stanje jednadžbe stanja:

$a_{\text{idealno}} = 59,181 \text{ m} > a_k = 55,43 \text{ m}$ iz čega slijedi da je početno stanje -5° C sa dodatnim opterećenjem.

Početno stanje definira se sljedećim jednadžbama:

$$g_2 = -5^\circ \text{C} \quad (6.2.10)$$

$$g_1 = g_z = 0,137 \frac{\text{N}}{\text{m} \cdot \text{mm}^2} \quad (6.2.11)$$

$$g_0 = g_2 = 0,039 \frac{\text{N}}{\text{m} \cdot \text{mm}^2} \quad (6.2.12)$$

$$\sigma_1 = \sigma_d = 80 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (6.2.13)$$

Nadomjesno naprezanje maksimalnog radnog naprezanja:

$$\bar{\sigma}_1 = \sigma_{\max} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^3}{a_i'^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^2}{a_i}} = 80 \cdot \frac{288,0053}{288,628} = 79,8274 \frac{N}{m} \quad (6.2.14)$$

Opća formula za horizontalne komponente naprezanja za zatezno polje za odabrane temperature:

$$\frac{\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_2}{E} + \beta (\vartheta_1 - \vartheta_2) = \frac{a_{idealno}^2}{24} \left(\frac{g_1^2}{\bar{\sigma}_1^2} - \frac{g_2^2}{\bar{\sigma}_2^2} \right) \quad (6.2.15)$$

6.3. Horizontalne komponente naprezanja pri odabranim temperaturama

Za $\vartheta_2 = -20^\circ\text{C}$:

$$\frac{\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_2}{E} + \beta (\vartheta_1 - \vartheta_2) = \frac{a_{idealno}^2}{24} \left(\frac{g_1^2}{\bar{\sigma}_1^2} - \frac{g_2^2}{\bar{\sigma}_2^2} \right) \quad (6.3.1)$$

$$\frac{79,8274 - \bar{\sigma}_2}{60000} + 23 \cdot 10^{-6} (-5 - (-20)) = \frac{59,181^2}{24} \left(\frac{0,24^2}{79,8274^2} - \frac{0,05703^2}{\bar{\sigma}_2^2} \right) \quad (6.3.2)$$

$$\frac{79,8274 - \bar{\sigma}_2}{60000} + 3,45 \cdot 10^{-4} = 4,298 \cdot 10^{-4} - \frac{0,222}{\bar{\sigma}_2^2} / \cdot 60000 / \cdot \bar{\sigma}_2^2 \quad (6.3.3)$$

$$\bar{\sigma}_2^2 (79,8274 - \bar{\sigma}_2) + 20,7 \bar{\sigma}_2^2 - 25,788 \bar{\sigma}_2^2 - 13320 = 0 \quad (6.3.4)$$

$$-\bar{\sigma}_2^3 + 79,8274 \bar{\sigma}_2^2 + 20,7 \bar{\sigma}_2^2 - 25,788 \bar{\sigma}_2^2 + 13320 = 0 / \cdot (-1) \quad (6.3.5)$$

$$\bar{\sigma}_2^3 - 74,74 \bar{\sigma}_2^2 - 28478,122 = 0 \quad (6.3.6)$$

$$\bar{\sigma}_2 = 76,98 \frac{N}{mm^2} \quad (6.3.7)$$

$$\sigma_2 = \sigma_{-20^\circ\text{C}} = \bar{\sigma}_2 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^3}{a_i'^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^2}{a_i}} = 76,98 \cdot \frac{288,0053}{288,628} = 76,81 \frac{N}{mm^2} \quad (6.3.8)$$

Za $\vartheta_2 = -10^\circ\text{C}$:

$$\frac{79,8274 - \overline{\delta}_2}{60000} + 23 \cdot 10^{-6}(-5 - (-10)) = \frac{59,181^2}{24} \left(\frac{0,137^2}{79,8274^2} - \frac{0,039^2}{\overline{\delta}_2^2} \right) \quad (6.3.9)$$

$$\frac{79,8274 - \overline{\delta}_2}{60000} + 1,15 \cdot 10^{-4} = 4,298 \cdot 10^{-4} - \frac{0,222}{\overline{\delta}_2^2} / \cdot 60000 / \cdot \overline{\delta}_2^2 \quad (6.3.10)$$

$$\overline{\delta}_2^2 (79,8274 - \overline{\delta}_2) + 6,9 \overline{\delta}_2^2 - 25,788 \overline{\delta}_2^2 + 13320 = 0 \quad (6.3.11)$$

$$-\overline{\delta}_2^3 + 79,8274 \overline{\delta}_2^2 + 6,9 \overline{\delta}_2^2 - 25,788 \overline{\delta}_2^2 + 13320 = 0 / \cdot (-1) \quad (6.3.12)$$

$$\overline{\delta}_2^3 - 60,94 \overline{\delta}_2^2 - 13320 = 0 \quad (6.3.13)$$

$$\overline{\delta}_2 = 64,17 \frac{N}{mm^2} \quad (6.3.14)$$

$$\sigma_2 = \sigma_{-10^\circ\text{C}} = \overline{\delta}_2 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^3}{a_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^2}{a_i}} = 64,17 \cdot \frac{288,0053}{288,628} = 64,04 \frac{N}{mm^2} \quad (6.3.15)$$

Za $\vartheta_2 = 0^\circ\text{C}$:

$$\frac{79,8274 - \overline{\delta}_2}{60000} + 23 \cdot 10^{-6}(-5 - (0)) = \frac{59,181^2}{24} \left(\frac{0,137^2}{79,8274^2} - \frac{0,039^2}{\overline{\delta}_2^2} \right) \quad (6.3.16)$$

$$\frac{79,8274 - \overline{\delta}_2}{60000} + 2,3 \cdot 10^{-5} = 4,298 \cdot 10^{-4} - \frac{0,222}{\overline{\delta}_2^2} / \cdot 60000 / \cdot \overline{\delta}_2^2 \quad (6.3.17)$$

$$\overline{\delta}_2^2 (79,8274 - \overline{\delta}_2) + 1,38 \overline{\delta}_2^2 - 25,788 \overline{\delta}_2^2 + 13320 = 0 \quad (6.3.18)$$

$$-\overline{\delta}_2^3 + 79,8274 \overline{\delta}_2^2 + 1,38 \overline{\delta}_2^2 - 25,788 \overline{\delta}_2^2 + 13320 = 0 / \cdot (-1) \quad (6.3.19)$$

$$\overline{\delta}_2^3 - 55,41 \overline{\delta}_2^2 - 13320 = 0 \quad (6.3.20)$$

$$\overline{\delta}_2 = 59,22 \frac{N}{mm^2} \quad (6.3.21)$$

$$\sigma_2 = \sigma_{0^\circ\text{C}} = \overline{\delta}_2 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^3}{a_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^2}{a_i}} = 59,22 \cdot \frac{288,0053}{288,628} = 59,1 \frac{N}{mm^2} \quad (6.3.22)$$

Za $\vartheta_2 = 10^\circ\text{C}$:

$$\frac{79,8274 - \overline{\delta_2}}{60000} + 23 \cdot 10^{-6}(-5 - (10)) = \frac{59,181^2}{24} \left(\frac{0,137^2}{79,8274^2} - \frac{0,039^2}{\overline{\delta_2}^2} \right) \quad (6.3.23)$$

$$\frac{79,8274 - \overline{\delta_2}}{60000} - 3,45 \cdot 10^{-4} = 4,298 \cdot 10^{-4} - \frac{0,222}{\overline{\delta_2}^2} / \cdot 60000 / \cdot \overline{\delta_2}^2 \quad (6.3.24)$$

$$\overline{\delta_2}^2 (79,8274 - \overline{\delta_2}) - 20,7 \overline{\delta_2}^2 - 25,788 \overline{\delta_2}^2 + 13320 = 0 \quad (6.3.25)$$

$$-\overline{\delta_2}^3 + 79,8274 \overline{\delta_2}^2 - 20,7 \overline{\delta_2}^2 - 25,788 \overline{\delta_2}^2 + 13320 = 0 / \cdot (-1) \quad (6.3.26)$$

$$\overline{\delta_2}^3 - 33,34 \overline{\delta_2}^2 - 13320 = 0 \quad (6.3.27)$$

$$\overline{\delta_2} = 41,19 \frac{N}{mm^2} \quad (6.3.28)$$

$$\sigma_2 = \sigma_{10^\circ\text{C}} = \overline{\delta_2} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^3}{a_i'^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^2}{a_i}} = 41,19 \cdot \frac{288,0053}{288,628} = 41,11 \frac{N}{mm^2} \quad (6.3.29)$$

Za $\vartheta_2 = 20^\circ\text{C}$:

$$\frac{79,8274 - \overline{\delta_2}}{60000} + 23 \cdot 10^{-6}(-5 - (20)) = \frac{59,181^2}{24} \left(\frac{0,137^2}{79,8274^2} - \frac{0,039^2}{\overline{\delta_2}^2} \right) \quad (6.3.30)$$

$$\frac{79,8274 - \overline{\delta_2}}{60000} - 5,75 \cdot 10^{-4} = 4,298 \cdot 10^{-4} - \frac{0,222}{\overline{\delta_2}^2} / \cdot 60000 / \cdot \overline{\delta_2}^2 \quad (6.3.31)$$

$$\overline{\delta_2}^2 (79,8274 - \overline{\delta_2}) - 34,5 \overline{\delta_2}^2 - 25,788 \overline{\delta_2}^2 + 13320 = 0 \quad (6.3.32)$$

$$-\overline{\delta_2}^3 + 79,8274 \overline{\delta_2}^2 - 34,5 \overline{\delta_2}^2 - 25,788 \overline{\delta_2}^2 + 13320 = 0 / \cdot (-1) \quad (6.3.33)$$

$$\overline{\delta_2}^3 - 19,54 \overline{\delta_2}^2 - 13320 = 0 \quad (6.3.34)$$

$$\overline{\delta_2} = 32,3 \frac{N}{mm^2} \quad (6.3.35)$$

$$\sigma_2 = \sigma_{20^\circ\text{C}} = \overline{\delta_2} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^3}{a_i'^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^2}{a_i}} = 32,3 \cdot \frac{288,0053}{288,628} = 32,24 \frac{N}{mm^2} \quad (6.3.36)$$

Za $\vartheta_2 = 30^\circ\text{C}$:

$$\frac{79,8274 - \overline{\delta_2}}{60000} + 23 \cdot 10^{-6}(-5 - (30)) = \frac{59,181^2}{24} \left(\frac{0,137^2}{79,8274^2} - \frac{0,039^2}{\overline{\delta_2}^2} \right) \quad (6.3.37)$$

$$\frac{79,8274 - \overline{\delta_2}}{60000} - 8,05 \cdot 10^{-4} = 4,298 \cdot 10^{-4} - \frac{0,222}{\overline{\delta_2}^2} / \cdot 60000 / \cdot \overline{\delta_2}^2 \quad (6.3.38)$$

$$\overline{\delta_2}^2 (79,8274 - \overline{\delta_2}) - 48,3 \overline{\delta_2}^2 - 25,788 \overline{\delta_2}^2 + 13320 = 0 \quad (6.3.39)$$

$$-\overline{\delta_2}^3 + 79,8274 \overline{\delta_2}^2 - 48,3 \overline{\delta_2}^2 - 25,788 \overline{\delta_2}^2 + 13320 = 0 / \cdot (-1) \quad (6.3.40)$$

$$\overline{\delta_2}^3 - 5,74 \overline{\delta_2}^2 - 13320 = 0 \quad (6.3.41)$$

$$\overline{\delta_2} = 25,78 \frac{N}{\text{mm}^2} \quad (6.3.42)$$

$$\sigma_2 = \sigma_{30^\circ\text{C}} = \overline{\delta_2} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^3}{a_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^2}{a_i}} = 25,78 \cdot \frac{288,0053}{288,628} = 25,728 \frac{N}{\text{mm}^2} \quad (6.3.43)$$

Za $\vartheta_2 = 40^\circ\text{C}$:

$$\frac{79,8274 - \overline{\delta_2}}{60000} + 23 \cdot 10^{-6}(-5 - (40)) = \frac{59,181^2}{24} \left(\frac{0,137^2}{79,8274^2} - \frac{0,039^2}{\overline{\delta_2}^2} \right) \quad (6.3.44)$$

$$\frac{79,8274 - \overline{\delta_2}}{60000} - 1,035 \cdot 10^{-3} = 4,298 \cdot 10^{-4} - \frac{0,222}{\overline{\delta_2}^2} / \cdot 60000 / \cdot \overline{\delta_2}^2 \quad (6.3.45)$$

$$\overline{\delta_2}^2 (79,8274 - \overline{\delta_2}) - 62,1 \overline{\delta_2}^2 - 25,788 \overline{\delta_2}^2 + 13320 = 0 \quad (6.3.46)$$

$$-\overline{\delta_2}^3 + 79,8274 \overline{\delta_2}^2 - 62,1 \overline{\delta_2}^2 - 25,788 \overline{\delta_2}^2 + 13320 = 0 / \cdot (-1) \quad (6.3.47)$$

$$\overline{\delta_2}^3 + 8,06 \overline{\delta_2}^2 - 13320 = 0 \quad (6.3.48)$$

$$\overline{\delta_2} = 21,3 \frac{N}{\text{mm}^2} \quad (6.3.49)$$

$$\sigma_2 = \sigma_{40^\circ\text{C}} = \overline{\delta_2} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^3}{a_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^2}{a_i}} = 21,3 \cdot \frac{288,0053}{288,628} = 21,26 \frac{N}{\text{mm}^2} \quad (6.3.50)$$

Za $\vartheta_2 = -5^\circ\text{C} + \text{LED}$:

$$\frac{\overline{g_1 - g_2}}{E} + \beta (\vartheta_1 - \vartheta_2) = \frac{a_{idealno}^2}{24} \left(\frac{g_1^2}{\overline{g_1^2}} - \frac{g_2^2}{\overline{g_2^2}} \right) \quad (6.3.51)$$

$$\frac{79,8274 - \overline{g_2}}{60000} + 23 \cdot 10^{-6} (-5 - (-5 + LED)) = \frac{59,181^2}{24} \left(\frac{0,137^2}{79,8274^2} - \frac{0,137^2}{\overline{g_2^2}} \right) \quad (6.3.52)$$

$$\frac{79,8274 - \overline{g_2}}{60000} = 4,298 \cdot 10^{-4} - \frac{2,739}{\overline{g_2^2}} / \cdot 60000 / \cdot \overline{g_2^2} \quad (6.3.53)$$

$$\overline{g_2^2} (79,8274 - \overline{g_2}) - 25,788 \overline{g_2^2} + 164340 = 0 \quad (6.3.54)$$

$$-\overline{g_2^3} + 79,8274 \overline{g_2^2} - 25,788 \overline{g_2^2} + 164340 = 0 / \cdot (-1) \quad (6.3.55)$$

$$\overline{g_2^3} - 54,0394 \overline{g_2^2} - 164340 = 0 \quad (6.3.56)$$

$$\overline{g_2} = 79,83 \frac{N}{mm^2} \quad (6.3.57)$$

$$\sigma_2 = \sigma_{-5^\circ\text{C} + LED} = \overline{g_2} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^3}{a_i'^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^2}{a_i}} = 79,83 \cdot \frac{288,0053}{288,628} = 79,67 \frac{N}{mm^2} \quad (6.3.58)$$

6.4. Horizontalne sile za odabrane temperature

$$F_{H-20^\circ\text{C}} = \sigma_{-20^\circ\text{C}} \cdot A = 76,81 \cdot 70 = 5376,7 \text{ N} \quad (6.4.1)$$

$$F_{H-10^\circ\text{C}} = \sigma_{-10^\circ\text{C}} \cdot A = 64,17 \cdot 70 = 4491,9 \text{ N} \quad (6.4.2)$$

$$F_{H0^\circ\text{C}} = \sigma_{0^\circ\text{C}} \cdot A = 59,1 \cdot 70 = 4137 \text{ N} \quad (6.4.3)$$

$$F_{H10^\circ\text{C}} = \sigma_{10^\circ\text{C}} \cdot A = 41,11 \cdot 70 = 2877,7 \text{ N} \quad (6.4.4)$$

$$F_{H20^\circ\text{C}} = \sigma_{20^\circ\text{C}} \cdot A = 32,24 \cdot 70 = 2256,8 \text{ N} \quad (6.4.5)$$

$$F_{H30^\circ\text{C}} = \sigma_{30^\circ\text{C}} \cdot A = 25,728 \cdot 70 = 1800,96 \text{ N} \quad (6.4.6)$$

$$F_{H40^\circ\text{C}} = \sigma_{40^\circ\text{C}} \cdot A = 21,26 \cdot 70 = 1488,2 \text{ N} \quad (6.4.7)$$

$$F_{H-5^\circ\text{C} + led} = \sigma_{-5^\circ\text{C} + led} \cdot A = 79,67 \cdot 70 = 5576 \text{ N} \quad (6.4.8)$$

6.5. Idealan provjes za idealni raspon i odabrane temperature

$$f = \frac{a_{idealno}^2 \cdot g_0}{8 \cdot 6,9} \quad (6.5.1)$$

Za $\vartheta_2 = -20^\circ\text{C}$:

$$f = \frac{a_{idealno}^2 \cdot g_0}{8 \cdot 6,9} = \frac{59,181^2 \cdot 0,039}{8 \cdot 76,81} = 0,222 \text{ m} \quad (6.5.2)$$

Za $\vartheta_2 = -10^\circ\text{C}$:

$$f = \frac{a_{idealno}^2 \cdot g_0}{8 \cdot 6,9} = \frac{59,181^2 \cdot 0,039}{8 \cdot 64,04} = 0,267 \text{ m} \quad (6.5.3)$$

Za $\vartheta_2 = 0^\circ\text{C}$:

$$f = \frac{a_{idealno}^2 \cdot g_0}{8 \cdot 6,9} = \frac{59,181^2 \cdot 0,039}{8 \cdot 59,1} = 0,289 \text{ m} \quad (6.5.4)$$

Za $\vartheta_2 = 10^\circ\text{C}$:

$$f = \frac{a_{idealno}^2 \cdot g_0}{8 \cdot 6,9} = \frac{59,181^2 \cdot 0,039}{8 \cdot 41,11} = 0,415 \text{ m} \quad (6.5.5)$$

Za $\vartheta_2 = 20^\circ\text{C}$:

$$f = \frac{a_{idealno}^2 \cdot g_0}{8 \cdot 6,9} = \frac{59,181^2 \cdot 0,039}{8 \cdot 32,24} = 0,53 \text{ m} \quad (6.5.6)$$

Za $\vartheta_2 = 30^\circ\text{C}$:

$$f = \frac{a_{idealno}^2 \cdot g_0}{8 \cdot 6,9} = \frac{59,181^2 \cdot 0,039}{8 \cdot 25,73} = 0,664 \text{ m} \quad (6.5.7)$$

Za $\vartheta_2 = 40^\circ\text{C}$:

$$f = \frac{a_{idealno}^2 \cdot g_0}{8 \cdot 6,9} = \frac{59,181^2 \cdot 0,039}{8 \cdot 21,24} = 0,804 \text{ m} \quad (6.5.7)$$

Za $\vartheta_2 = -5^\circ\text{C} + \text{LED}$:

$$f = \frac{a_{idealno}^2 \cdot g_z}{8 \cdot 6_{\vartheta}} = \frac{59,181^2 \cdot 0,137}{8 \cdot 79,76} = 0,752 \text{ m} \quad (6.5.8)$$

6.6. Provjersi za odabrane raspone i odabrane temperature

Provjersi za raspon a_1 i odabrane temperature:

Za $\vartheta_2 = -20^\circ\text{C}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_1 \cdot g_0}{8 \cdot 6_{-20^\circ\text{C}}} = \frac{50 \cdot 50,24938 \cdot 0,039}{8 \cdot 76,81} = 0,1595 \text{ m} \quad (6.6.1)$$

Za $\vartheta_2 = -10^\circ\text{C}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_1 \cdot g_0}{8 \cdot 6_{-10^\circ\text{C}}} = \frac{50 \cdot 50,24938 \cdot 0,039}{8 \cdot 64,04} = 0,1913 \text{ m} \quad (6.6.2)$$

Za $\vartheta_2 = 0^\circ\text{C}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_1 \cdot g_0}{8 \cdot 6_{0^\circ\text{C}}} = \frac{50 \cdot 50,24938 \cdot 0,039}{8 \cdot 59,1} = 0,2073 \text{ m} \quad (6.6.3)$$

Za $\vartheta_2 = 10^\circ\text{C}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_1 \cdot g_0}{8 \cdot 6_{10^\circ\text{C}}} = \frac{50 \cdot 50,24938 \cdot 0,039}{8 \cdot 41,11} = 0,2979 \text{ m} \quad (6.6.4)$$

Za $\vartheta_2 = 20^\circ\text{C}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_1 \cdot g_0}{8 \cdot 6_{20^\circ\text{C}}} = \frac{50 \cdot 50,24938 \cdot 0,039}{8 \cdot 32,24} = 0,3799 \text{ m} \quad (6.6.5)$$

Za $\vartheta_2 = 30^\circ\text{C}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_1 \cdot g_0}{8 \cdot 6_{30^\circ\text{C}}} = \frac{50 \cdot 50,24938 \cdot 0,039}{8 \cdot 25,73} = 0,476 \text{ m} \quad (6.6.6)$$

Za $\vartheta_2 = 40^\circ\text{C}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_1 \cdot g_0}{8 \cdot 6_{40^\circ\text{C}}} = \frac{50 \cdot 50,24938 \cdot 0,039}{8 \cdot 21,24} = 0,5767m \quad (6.6.7)$$

Za $\vartheta_2 = -5^\circ\text{C} + \text{LED}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_1 \cdot g_z}{8 \cdot 6_{-5^\circ\text{C} + \text{LED}}} = \frac{50 \cdot 50,24938 \cdot 0,137}{8 \cdot 79,76} = 0,539m \quad (6.6.8)$$

Provjesi za raspon a_2 i odabrane temperature:

Za $\vartheta_2 = -20^\circ\text{C}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_1 \cdot g_0}{8 \cdot 6_{-20^\circ\text{C}}} = \frac{60 \cdot 60,8276 \cdot 0,039}{8 \cdot 76,81} = 0,232m \quad (6.6.9)$$

Za $\vartheta_2 = -10^\circ\text{C}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_1 \cdot g_0}{8 \cdot 6_{-10^\circ\text{C}}} = \frac{60 \cdot 60,8276 \cdot 0,039}{8 \cdot 64,04} = 0,278m \quad (6.6.10)$$

Za $\vartheta_2 = 0^\circ\text{C}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_1 \cdot g_0}{8 \cdot 6_{0^\circ\text{C}}} = \frac{60 \cdot 60,8276 \cdot 0,039}{8 \cdot 59,1} = 0,301m \quad (6.6.11)$$

Za $\vartheta_2 = 10^\circ\text{C}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_1 \cdot g_0}{8 \cdot 6_{10^\circ\text{C}}} = \frac{560 \cdot 60,8276 \cdot 0,039}{8 \cdot 41,11} = 0,433m \quad (6.6.12)$$

Za $\vartheta_2 = 20^\circ\text{C}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_1 \cdot g_0}{8 \cdot 6_{20^\circ\text{C}}} = \frac{60 \cdot 60,8276 \cdot 0,039}{8 \cdot 32,24} = 0,552m$$

Za $\vartheta_2 = 30^\circ\text{C}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_1 \cdot g_0}{8 \cdot 6_{20^\circ\text{C}}} = \frac{60 \cdot 60,8276 \cdot 0,039}{8 \cdot 25,73} = 0,691m \quad (6.6.14)$$

Za $\vartheta_2 = 40^\circ\text{C}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_1 \cdot g_0}{8 \cdot 6_{40^\circ\text{C}}} = \frac{60 \cdot 60,8276 \cdot 0,039}{8 \cdot 21,24} = 0,838m \quad (6.6.15)$$

Za $\vartheta_2 = -5^\circ\text{C} + \text{LED}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_1 \cdot g_0}{8 \cdot 6_{-5^\circ\text{C} + \text{LED}}} = \frac{60 \cdot 60,8276 \cdot 0,137}{8 \cdot 79,76} = 0,784m \quad (6.6.16)$$

Provjesi za raspon a_3 i odabrane temperature:

Za $\vartheta_2 = -20^\circ\text{C}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_1 \cdot g_0}{8 \cdot 6_{-20^\circ\text{C}}} = \frac{65 \cdot 65 \cdot 0,039}{8 \cdot 76,81} = 0,268m \quad (6.6.17)$$

Za $\vartheta_2 = -10^\circ\text{C}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_1 \cdot g_0}{8 \cdot 6_{-10^\circ\text{C}}} = \frac{65 \cdot 65 \cdot 0,039}{8 \cdot 64,04} = 0,322m \quad (6.6.18)$$

Za $\vartheta_2 = 0^\circ\text{C}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_1 \cdot g_0}{8 \cdot 6_{0^\circ\text{C}}} = \frac{65 \cdot 65 \cdot 0,039}{8 \cdot 59,1} = 0,349m \quad (6.6.19)$$

Za $\vartheta_2 = 10^\circ\text{C}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_1 \cdot g_0}{8 \cdot 6_{10^\circ\text{C}}} = \frac{65 \cdot 65 \cdot 0,039}{8 \cdot 41,11} = 0,501m \quad (6.6.20)$$

Za $\vartheta_2 = 20^\circ\text{C}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_1 \cdot g_0}{8 \cdot 6_{20^\circ\text{C}}} = \frac{65 \cdot 65 \cdot 0,039}{8 \cdot 32,24} = 0,639m \quad (6.6.21)$$

Za $\vartheta_2 = 30^\circ\text{C}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_1 \cdot g_0}{8 \cdot 6_{20^\circ\text{C}}} = \frac{65 \cdot 65 \cdot 0,039}{8 \cdot 25,73} = 0,801m \quad (6.6.22)$$

Za $\vartheta_2 = 40^\circ\text{C}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_1 \cdot g_0}{8 \cdot 6_{40^\circ\text{C}}} = \frac{65 \cdot 65 \cdot 0,039}{8 \cdot 21,24} = 0,97m \quad (6.6.23)$$

Za $\vartheta_2 = -5^\circ\text{C} + \text{LED}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_1 \cdot g_0}{8 \cdot 6_{-5^\circ\text{C} + \text{LED}}} = \frac{65 \cdot 65 \cdot 0,137}{8 \cdot 79,76} = 0,907m \quad (6.6.24)$$

Provjesi za raspon a_4 i odabrane temperature:

Za $\vartheta_2 = -20^\circ\text{C}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_1 \cdot g_0}{8 \cdot 6_{-20^\circ\text{C}}} = \frac{50 \cdot 48,9898 \cdot 0,039}{8 \cdot 76,81} = 0,155m \quad (6.6.25)$$

Za $\vartheta_2 = -10^\circ\text{C}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_1 \cdot g_0}{8 \cdot 6_{-10^\circ\text{C}}} = \frac{50 \cdot 48,9898 \cdot 0,039}{8 \cdot 64,04} = 0,186m \quad (6.6.26)$$

Za $\vartheta_2 = 0^\circ\text{C}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_1 \cdot g_0}{8 \cdot 6_{0^\circ\text{C}}} = \frac{50 \cdot 48,9898 \cdot 0,039}{8 \cdot 59,1} = 0,202m \quad (6.6.27)$$

Za $\vartheta_2 = 10^\circ\text{C}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_1 \cdot g_0}{8 \cdot 6_{10^\circ\text{C}}} = \frac{50 \cdot 48,9898 \cdot 0,039}{8 \cdot 41,11} = 0,291m \quad (6.6.28)$$

Za $\vartheta_2 = 20^\circ\text{C}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_1 \cdot g_0}{8 \cdot 6_{20^\circ\text{C}}} = \frac{50 \cdot 48,9898 \cdot 0,039}{8 \cdot 32,24} = 0,371m \quad (6.6.29)$$

Za $\vartheta_2 = 30^\circ\text{C}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_1 \cdot g_0}{8 \cdot 6_{30^\circ\text{C}}} = \frac{50 \cdot 48,9898 \cdot 0,039}{8 \cdot 25,73} = 0,464m \quad (6.6.30)$$

Za $\vartheta_2 = 40^\circ\text{C}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_1 \cdot g_0}{8 \cdot 6_{40^\circ\text{C}}} = \frac{50 \cdot 48,9898 \cdot 0,039}{8 \cdot 21,24} = 0,562m \quad (6.6.31)$$

Za $\vartheta_2 = -5^\circ\text{C} + \text{LED}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_1 \cdot g_z}{8 \cdot 6_{-5^\circ\text{C} + \text{LED}}} = \frac{50 \cdot 48,9898 \cdot 0,137}{8 \cdot 79,76} = 0,526m \quad (6.6.32)$$

Provjesi za raspon a_5 i odabrane temperature:

Za $\vartheta_2 = -20^\circ\text{C}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_1 \cdot g_0}{8 \cdot 6_{-20^\circ\text{C}}} = \frac{65 \cdot 64,2262 \cdot 0,039}{8 \cdot 76,81} = 0,265m \quad (6.6.33)$$

Za $\vartheta_2 = -10^\circ\text{C}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_1 \cdot g_0}{8 \cdot 6_{-10^\circ\text{C}}} = \frac{65 \cdot 64,2262 \cdot 0,039}{8 \cdot 64,04} = 0,318m \quad (6.6.34)$$

Za $\vartheta_2 = 0^\circ\text{C}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_{1'} \cdot g_0}{8 \cdot 6_{0^\circ\text{C}}} = \frac{65 \cdot 64,2262 \cdot 0,039}{8 \cdot 59,1} = 0,344m \quad (6.6.35)$$

Za $\vartheta_2 = 10^\circ\text{C}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_{1'} \cdot g_0}{8 \cdot 6_{10^\circ\text{C}}} = \frac{65 \cdot 64,2262 \cdot 0,039}{8 \cdot 41,11} = 0,495m \quad (6.6.36)$$

Za $\vartheta_2 = 20^\circ\text{C}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_{1'} \cdot g_0}{8 \cdot 6_{20^\circ\text{C}}} = \frac{65 \cdot 64,2262 \cdot 0,039}{8 \cdot 32,24} = 0,631m \quad (6.6.37)$$

Za $\vartheta_2 = 30^\circ\text{C}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_{1'} \cdot g_0}{8 \cdot 6_{30^\circ\text{C}}} = \frac{65 \cdot 64,2262 \cdot 0,039}{8 \cdot 25,73} = 0,791m \quad (6.6.38)$$

Za $\vartheta_2 = 40^\circ\text{C}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_{1'} \cdot g_0}{8 \cdot 6_{40^\circ\text{C}}} = \frac{65 \cdot 64,2262 \cdot 0,039}{8 \cdot 21,24} = 0,958m \quad (6.6.39)$$

Za $\vartheta_2 = -5^\circ\text{C} + \text{LED}$:

$$f' = \frac{a_1 \cdot a'_{1'} \cdot g_0}{8 \cdot 6_{-5^\circ\text{C} + \text{LED}}} = \frac{65 \cdot 64,2262 \cdot 0,137}{8 \cdot 79,76} = 0,896m \quad (6.6.40)$$

6.7. Kritična temperatura

$$\vartheta_k = \frac{6_z}{\beta_E} \left(1 - \frac{g_o}{g_z} \right) - 5 = \frac{80}{23 \cdot 10^{-6} \cdot 60000} \cdot \left(1 - \frac{0,039}{0,137} \right) - 5 = 36,47^\circ\text{C} \quad (6.7.1)$$

$\vartheta_k = 36,47^\circ\text{C} < 40^\circ\text{C}$ iz čega slijedi da najveći provjes nije pri -5°C

Kao što je vidljivo u tablici:

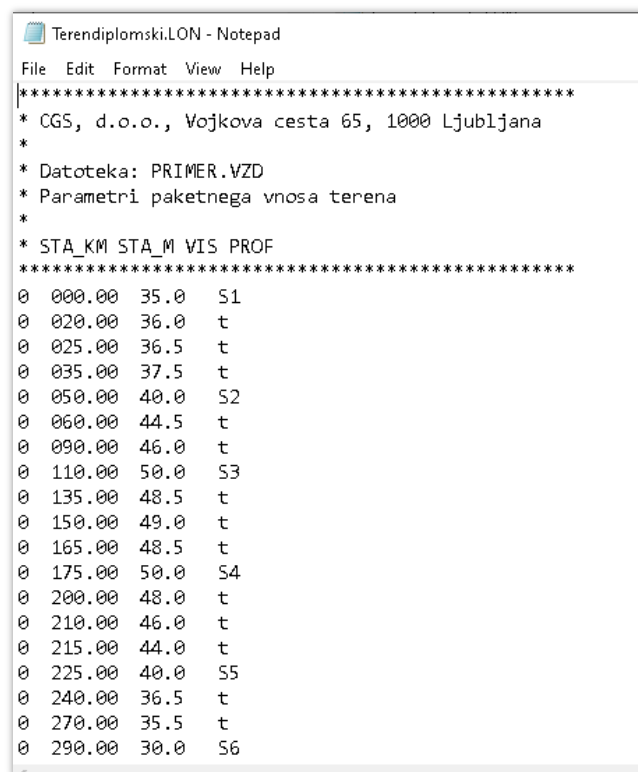
Idealni raspon $\alpha_{idealno} = 59,181m$		Montaža pri temperaturi (°C)							
		-20°C	-10°C	0°C	10°C	20°C	30°C	40°C	-5°C+LED
Idealni provjes vodiča f (m) za idealan raspon		0,222	0,267	0,289	0,415	0,53	0,664	0,804	0,752
Horizontalno naprezanje ($\frac{daN}{mm^2}$)		7,681	6,404	5,91	4,111	3,224	2,573	2,124	7,976
Horizontalna sila (daN)		537,67	449,19	413,7	287,77	225,68	180,1	148,82	557,6
Provjes f' (m) za stvarne raspone									
Stup	Raspon a (m)								
1									
	50	0,16	0,1913	0,2073	0,2979	0,3799	0,476	0,5767	0,539
2									
	60	0,232	0,278	0,301	0,433	0,552	0,691	0,838	0,784
3									
	65	0,268	0,322	0,349	0,501	0,639	0,801	0,97	0,907
4									
	50	0,155	0,186	0,202	0,291	0,371	0,464	0,562	0,526
5									
	65	0,265	0,318	0,344	0,495	0,631	0,791	0,958	0,896
6									

Slika 6.7.1. Tablica svih rješenja mehaničkog proračuna

7. MEHANIČKI PRORAČUN SN VODA SA PI VODIČIMA U PROGRAMU AUTOCAD ELECTRA

7.1. Unos podataka zateznog polja u program AutoCad Electra

Mehanički proračun u programu AutoCad Electra započinje sa unosom parametara terena u program pomoću tablice ispisane u notepad-u (Slika 7.1). Kod stvarnih dalekovoda parametre terena prethodno izmjeri geodet u dogovoru sa projektantom pri odabiru putanje voda.



```
Terendiplomski.LON - Notepad
File Edit Format View Help
*****
* CGS, d.o.o., Vojkova cesta 65, 1000 Ljubljana
*
* Datoteka: PRIMER.VZD
* Parametri paketnega vnosa terena
*
* STA_KM STA_M VIS PROF
*****
0 000.00 35.0 S1
0 020.00 36.0 t
0 025.00 36.5 t
0 035.00 37.5 t
0 050.00 40.0 S2
0 060.00 44.5 t
0 090.00 46.0 t
0 110.00 50.0 S3
0 135.00 48.5 t
0 150.00 49.0 t
0 165.00 48.5 t
0 175.00 50.0 S4
0 200.00 48.0 t
0 210.00 46.0 t
0 215.00 44.0 t
0 225.00 40.0 S5
0 240.00 36.5 t
0 270.00 35.5 t
0 290.00 30.0 S6
```

Slika 7.1.1. LON file s parametrima dalekovodai (stacionaži terena i visini profila)

U tablicu se unose sljedeći podatci:

1. Stacionaža u kilometrima
2. Stacionaža u metrima
3. Visina terena u metrima
4. Naziv svake stacionaže (teren ili stup)

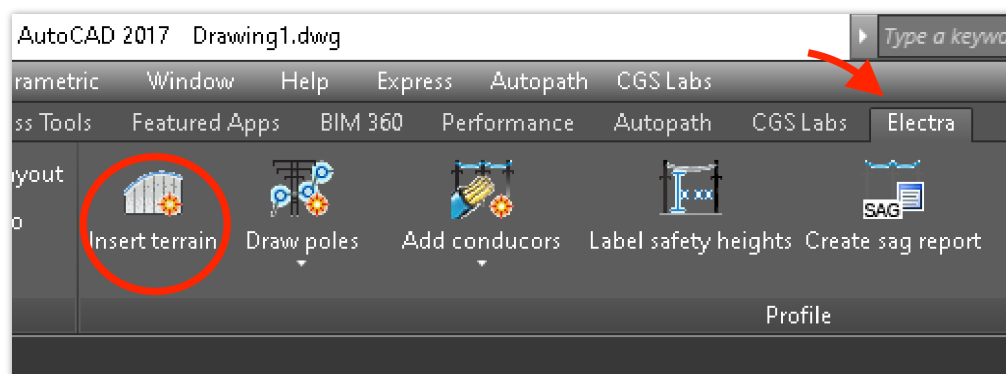
Kod projektiranja dalekovoda, stacionaža se koristi za identifikaciju i označavanje točaka duž trase dalekovoda. Svaki stup ili objekt duž dalekovoda ima svoju stacionažu koja označava njegovu udaljenost od početne točke trase.

Visina terena je važna jer po njoj se odabiru vršna mjesta za postavljanje stupova kako bi se zadovoljila sigurnosna visina.

Nakon što su uneseni svi parametri zateznog polja iz poglavlja 6. U programu AutoCAD 2017 otvara se kartica Electra i odbire „insert terrain“ (slika 7.2), te se odabire LON file i odabire se mjerilo u kojem će se nacrtati zatezno polje.

Mjerilo koje se odabire je 1:2000 za x os (duljinu trase) i 1:500 za y os odnosno za visinu terena.

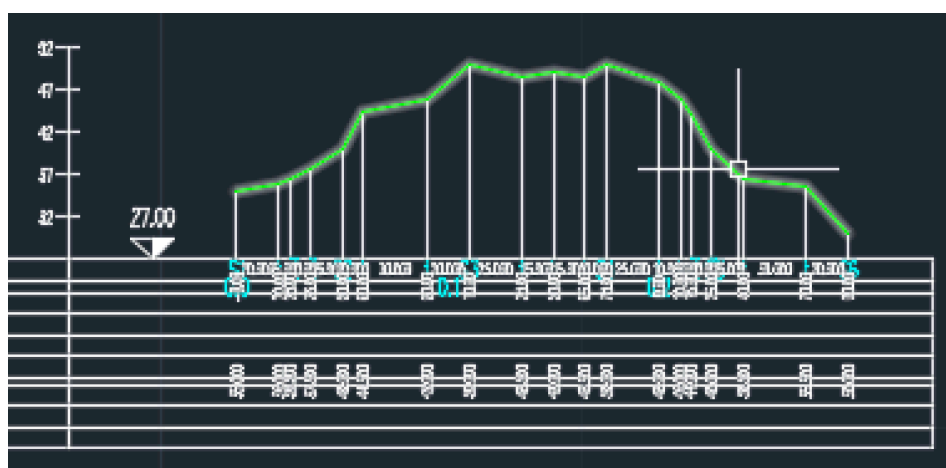
Važno je napomenuti da se detalji postupka mogu razlikovati ovisno o verziji AutoCAD-a i dodatnim modulima koje koristite.



Slika 7.1.2. unos parametara u program AutoCAD

Nakon unosa svih parametara i postavki mjerila, generirat će se horizontalni presjek terena koji je prikazan na (slici 7.1.3). Ovaj presjek terena pruža detaljan prikaz visina terena duž odabrane trase dalekovoda, omogućuje vizualnu analizu nagiba, izbočine ili udubljenja terena duž trase dalekovoda.

Korištenjem ovog presjeka terena, mogu se donositi informirane odluke o postavljanju stupova, prilagodbi vodova ili izradi odgovarajućih temelja na temelju topografije područja priloženog u projekt u obliku ortofoto satelitske snimke (ortogonalne projekcije terena).



Slika 7.1.3. Horizontalni presjek terena

7.2. Postavljanje stupova i vodova

Nakon odabira kartice “Draw poles” iz izbornika Electra u programu AutoCAD, sljedeći koraci u postavljanju stupova dalekovoda su sljedeći:

- U prozoru koji se prikazuje (Slika 7.2.1) nakon odabira “Draw poles”, treba unijeti stacionažu
- Zatim, treba odabrati vrstu stupa koji će se koristiti na određenoj poziciji. Može se odabrati između zateznih stupova (koji se koriste za podršku zategnutih vodova) ili nosnih stupova (koji se koriste za podršku vodova koji nisu pod zategom).
- Nakon odabira vrste stupa odabire se visina stupova zavisno o zadovoljenosti sigurnosne visine

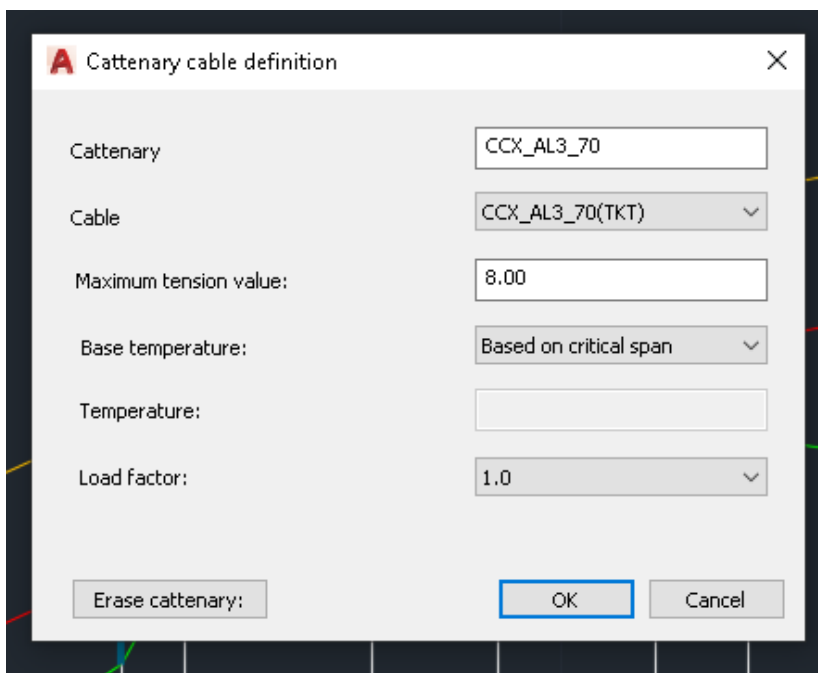
Proces se ponavlja za sve stupove u zateznom polju.

Incoming rope	Height	Outgoing rope	
		CCX_AL3	+
			+

Slika 7.2.1. Određivanje parametara stupa S1

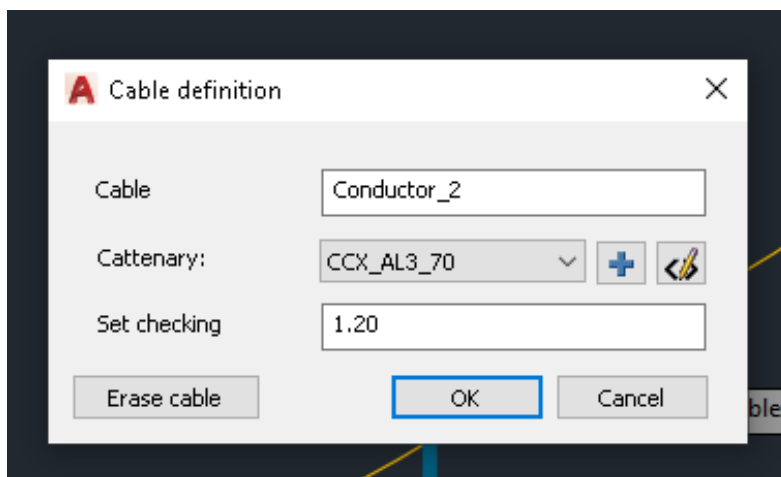
Nakon unosa svih potrebnih informacija, program će postaviti stupove dalekovoda na odgovarajuće pozicije duž trase, uzimajući u obzir unesene parametre.

Pomoću funkcionalnosti Autocad Electra za postavljanje vodova (vodiča) na stupove, može se precizno odrediti vrsta, položaj, maksimalno horizontalno naprezanje i koeficijent dodatnog tereta.



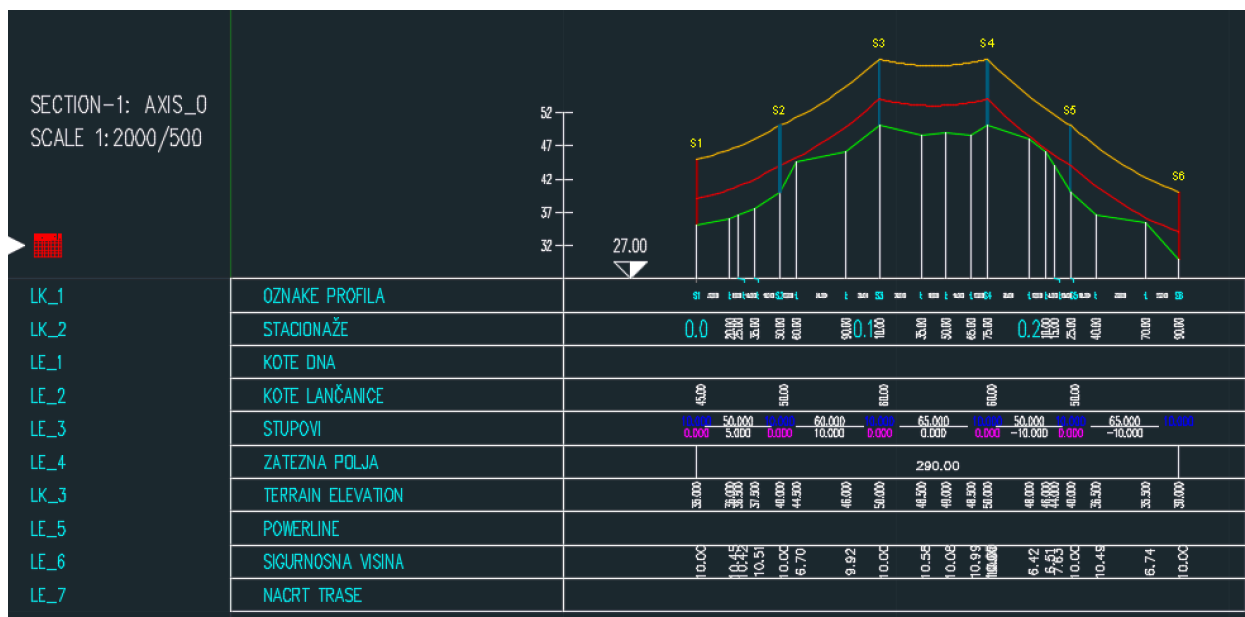
Slika 7.2.2. Određivanje parametara vodiča

Sigurnosna se visina podešava na opciji „Set cheking“ (Slika 7.2.2) gdje 1,20 označava podešavanje sigurnosne visine na 6m. To se računa množenjem faktora 1,20 sa brojem 5 koji je unesen prema postavkama programa kao minimalna visina.



Slika 7.2.3. Određivanje sigurnosne visine

Kada su konačno svi parametri uneseni dobiva se sljedeći prikaz:



Slika 7.2.4. Prikaz uzdužnog profila zadanog zateznog polja u programu AutoCAD

7.3. Rezultati mehaničkog proračuna

Pritiskom na karticu „Create sag report“ iz izbornika na (slici 7.1.2) program izbacuje izvješće o svim potrebnim proračunatim vrijednostima za mehanički proračun kao što su: Idealni raspon, kritični raspon, početna temperatura, kritična temperatura, na kojoj temperaturi je najveći provjes itd.

Cable name	: Conductor_2
Cable type	: CCX_AL3_70(TKT)
Ideal span	: 59.168 m
Critical span	: 54.394 m
Base temperature	: -5.0 Deg.C
Critical temperature	: 36.7 Deg.C
Maximal sag at temperature	: 40.0 Deg.C
Calculation span	: 8.00 daN/mm2
Load factor	: 1.0
Total catenary length	: 292.8

Slika 7.3.1. Prikaz iz izvješća o provjesima (SAG report) s osnovnim podatcima

U nastavku slijedi mehanički proračun provjesa za sve raspone u zadanom zateznom polju:

Span :S1 - S2
 Sag at max. tension :0.548 m
 Tension :8.013 daN/mm2
 Tension force :560.887 daN
 Maximal sag :0.579 m

Temperature	Sag	Length	Tension	Tension	Resultant tension	Resultant tension
Deg. C	m	m	daN/mm2	daN		
-20	0.161	50.252	7.643	534.982	7.672	537.009
-15	0.176	50.252	7.000	490.001	7.026	491.808
-10	0.193	50.252	6.370	445.909	6.393	447.500
-5	0.214	50.253	5.757	403.023	5.777	404.406
0	0.238	50.253	5.168	361.774	5.185	362.958
5	0.267	50.254	4.610	322.717	4.624	323.713
10	0.301	50.255	4.093	286.502	4.105	287.328
15	0.340	50.256	3.626	253.788	3.635	254.461
20	0.383	50.258	3.215	225.072	3.223	225.614
25	0.430	50.260	2.865	200.538	2.871	200.971
30	0.479	50.262	2.571	180.004	2.576	180.347
35	0.529	50.265	2.329	163.013	2.333	163.286
40	0.579	50.268	2.128	148.993	2.132	149.208
-5	0.548	50.266	8.000	560.000	8.013	560.887

Load calculations at -5 degrees C

	Without load	Wind load only	Ice load only	Wind and ice load
Tension (N)	5.757	0.000	8.000	0.000
Sag (m)	0.214	0.000	0.548	0.000
Vertical angle (deg.)	0.000	0.000	0.000	0.000

Slika 7.3.2. Tablica za raspon a1 s dobivenim izračunatim provjesima i zateznom čvrstoćom

Span :S2 - S3
 Sag at max. tension :0.795 m
 Maximal sag :0.835 m

Temperature	Sag	Length	Tension	Tension	Resultant tension	Resultant tension
Deg. C	m	m	daN/mm2	daN		
-20	0.234	60.838	7.646	535.187	7.732	541.262
-15	0.255	60.838	7.008	490.566	7.086	496.031
-10	0.280	60.839	6.383	446.808	6.453	451.676
-5	0.310	60.839	5.775	404.221	5.836	408.509
0	0.345	60.840	5.189	363.220	5.242	366.952
5	0.386	60.842	4.633	324.341	4.679	327.549
10	0.434	60.844	4.117	288.219	4.156	290.942
15	0.490	60.846	3.650	255.503	3.683	257.789
20	0.552	60.849	3.239	226.698	3.266	228.604
25	0.620	60.852	2.886	202.014	2.909	203.599
30	0.691	60.856	2.590	181.302	2.609	182.620
35	0.763	60.861	2.345	164.133	2.360	165.235
40	0.835	60.866	2.142	149.951	2.155	150.877
-5	0.795	60.863	8.000	560.000	8.052	563.620

Load calculations at -5 degrees C

	Without load	Wind load only	Ice load only	Wind and ice load
Tension (N)	5.775	0.000	8.000	0.000
Sag (m)	0.310	0.000	0.795	0.000
Vertical angle (deg.)	0.000	0.000	0.000	0.000

Slika 7.3.3. Tablica za raspon a2 s dobivenim izračunatim provjesima i zateznom čvrstoćom

Span :S3 - S4
 Sag at max. tension :0.921 m
 Maximal sag :0.976 m

Temperature	Sag	Length	Tension	Tension	Resultant tension	Resultant tension
Deg. C	m	m	daN/mm2	daN		
-20	0.271	65.003	7.641	534.864	7.642	534.939
-15	0.296	65.004	6.995	489.678	6.997	489.759
-10	0.325	65.004	6.363	445.393	6.364	445.483
-5	0.360	65.005	5.748	402.337	5.749	402.436
0	0.402	65.007	5.156	360.947	5.158	361.057
5	0.450	65.008	4.597	321.789	4.599	321.912
10	0.508	65.011	4.079	285.524	4.081	285.663
15	0.573	65.013	3.612	252.814	3.614	252.971
20	0.647	65.017	3.202	224.151	3.205	224.329
25	0.726	65.022	2.853	199.705	2.856	199.904
30	0.809	65.027	2.561	179.273	2.564	179.495
35	0.893	65.033	2.320	162.383	2.323	162.628
40	0.976	65.039	2.121	148.454	2.125	148.722
-5	0.921	65.035	8.000	560.000	8.013	560.899

Load calculations at -5 degrees C

	Without load	Wind load only	Ice load only	Wind and ice load
Tension (N)	5.748	0.000	8.000	0.000
Sag (m)	0.360	0.000	0.921	0.000
Vertical angle (deg.)	0.000	0.000	0.000	0.000

Slika 7.3.4. Tablica za raspon a3 s dobivenim izračunatim provjesima i zateznom čvrstoćom

Span :S4 - S5
 Sag at max. tension :0.556 m
 Maximal sag :0.581 m

Temperature	Sag	Length	Tension	Tension	Resultant tension	Resultant tension
Deg. C	m	m	daN/mm2	daN		
-20	0.163	51.005	7.648	535.325	7.819	547.344
-15	0.178	51.005	7.014	490.946	7.173	502.089
-10	0.195	51.005	6.392	447.414	6.539	457.700
-5	0.216	51.006	5.786	405.028	5.921	414.481
0	0.240	51.006	5.203	364.196	5.326	372.846
5	0.269	51.007	4.649	325.440	4.762	333.331
10	0.302	51.008	4.134	289.384	4.237	296.570
15	0.341	51.009	3.667	256.669	3.760	263.217
20	0.384	51.011	3.254	227.807	3.340	233.796
25	0.431	51.013	2.900	203.024	2.979	208.535
30	0.480	51.015	2.603	182.192	2.676	187.304
35	0.530	51.018	2.356	164.903	2.424	169.686
40	0.581	51.021	2.152	150.610	2.216	155.124
-5	0.556	51.019	8.000	560.000	8.236	576.513

Load calculations at -5 degrees C

	Without load	Wind load only	Ice load only	Wind and ice load
Tension (N)	5.786	0.000	8.000	0.000
Sag (m)	0.216	0.000	0.556	0.000
Vertical angle (deg.)	0.000	0.000	0.000	0.000

Slika 7.3.5. Tablica za raspon a4 s dobivenim izračunatim provjesima i zateznom čvrstoćom

Span	:S5 – S6					
Sag at max. tension	:0.932 m					
Tension	:8.177 daN/mm2					
Tension force	:572.379 daN					
Maximal sag	:0.980 m					
=====						
Temperature	Sag	Length	Tension	Tension	Resultant tension	Resultant tension
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Deg. C	m	m	daN/mm2	daN		
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-20	0.274	65.774	7.645	535.140	7.755	542.883
-15	0.299	65.774	7.006	490.437	7.109	497.661
-10	0.328	65.775	6.380	446.602	6.476	453.318
-5	0.363	65.776	5.771	403.946	5.860	410.170
0	0.404	65.777	5.184	362.888	5.266	368.641
5	0.453	65.779	4.628	323.968	4.704	329.276
10	0.509	65.781	4.112	287.825	4.182	292.723
15	0.575	65.784	3.644	255.108	3.709	259.639
20	0.648	65.788	3.233	226.323	3.293	230.536
25	0.727	65.792	2.881	201.674	2.937	205.618
30	0.810	65.797	2.586	181.002	2.639	184.726
35	0.895	65.803	2.341	163.875	2.392	167.420
40	0.980	65.810	2.139	149.729	2.188	153.132
-5	0.932	65.806	8.000	560.000	8.177	572.379
Load calculations at -5 degrees C						
			Without load	Wind load only	Ice load only	Wind and ice load
Tension (N)			5.771	0.000	8.000	0.000
Sag (m)			0.363	0.000	0.932	0.000
Vertical angle (deg.)			0.000	0.000	0.000	0.000

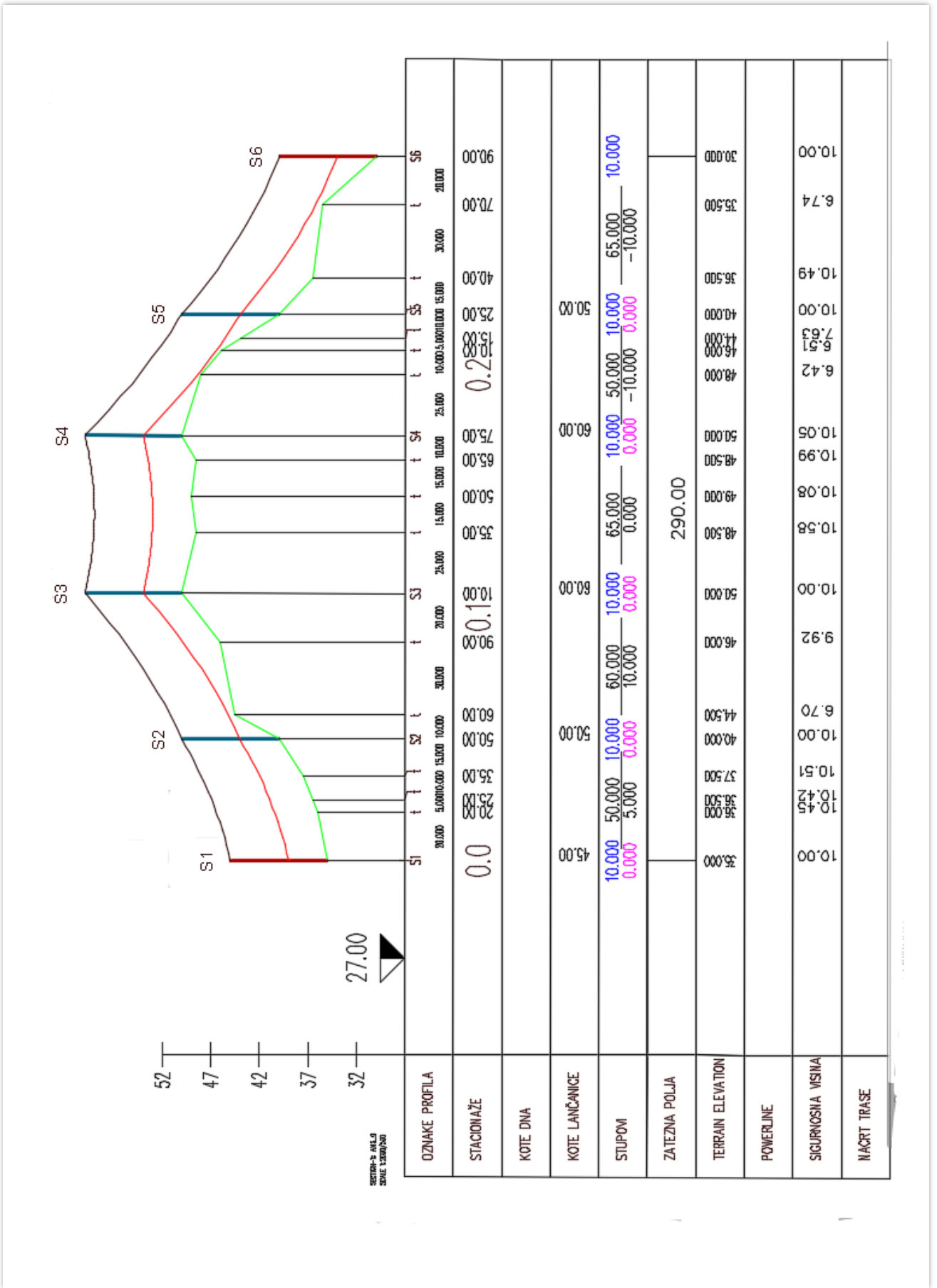
Slika 7.3.6. Tablica za raspon a5 s dobivenim izračunatim provjesima i zateznom čvrstoćom

Izrada mehaničkog proračuna u programu AutoCAD Electra pruža značajne prednosti u odnosu na tradicionalni proces ručnog proračuna. Program omogućuje brzu izradu proračuna s vizualnim prikazom horizontalnog presjeka trase dalekovoda. Osim toga, automatsko prepoznavanje sigurnosne udaljenosti dodatno olakšava i ubrzava postupak proračuna.

Sigurnosna visina i sigurnosna udaljenost:

- Sportskih igrališta ili kampovi - sigurnosna udaljenost mora iznositi 6m
- Zgrade - sigurnosna udaljenost mora iznositi 4m za pristupačne dijelove zgrade i 2,5m za nepristupačne dijelove zgrade a sigurnosna visina mora iznositi 5m za pristupačne dijelove zgrade i 3m za nepristupačne dijelove zgrade.
- Ako vod prelazi preko parkirališta ili autobusnog stajališta, sigurnosna visina iznosi 7m. (Mehaničko ili električno pojačanje nije potrebno)
- Vod na prosječnom terenu – sigurnosna udaljenost od bilo kojeg djela terena mora iznositi 3m.
- Sigurnosna udaljenost izoliranog vodiča od bilo kojeg dijela drveta ili grmlja je maksimalni otklon od vjetra u sredini raspona, povećan za iznos sigurnosne udaljenosti od 0,3m [12]

Sigurnosna visina u slučaju riješenog zateznog polja za sve raspone je 6m.



Slika 7.3.7. Uzdužni profil zateznog polja

8. USPOREDBA ANALITIČKOG PRORAČUNA I PRORAČUNA U PROGRAMU ELECTRA

Tablica 8.1. Prikaz razlike između veličine provjesa u oba načina

Temperatura		-20°C	-10°C	0°C	10°C	20°C	30°C	40°C	-5°C+LED
Stup	Raspon	Provjes f' (m) za stvarne raspone							
S1									
	50m	0,16	0,191	0,207	0,2979	0,3799	0,476	0,577	0,539
		0,161	0,193	0,238	0,301	0,383	0,479	0,529	0,548
		0,001	0,002	0,031	0,0031	0,0031	0,003	0,048	0,009
S2									
	60m	0,232	0,278	0,301	0,433	0,552	0,691	0,838	0,784
		0,234	0,28	0,345	0,434	0,552	0,691	0,835	0,795
		0,002	0,002	0,044	0,001	0	0	0,003	0,011
S3									
	65m	0,268	0,322	0,349	0,501	0,639	0,801	0,97	0,907
		0,271	0,325	0,402	0,508	0,647	0,809	0,976	0,921
		0,003	0,003	0,053	0,007	0,008	0,008	0,006	0,014
S4									
	50m	0,155	0,186	0,202	0,291	0,371	0,464	0,562	0,526
		0,163	0,195	0,24	0,302	0,384	0,48	0,581	0,556
		0,008	0,009	0,038	0,011	0,013	0,016	0,019	0,03
S5									
	65m	0,265	0,318	0,344	0,495	0,631	0,791	0,958	0,896
		0,274	0,328	0,404	0,509	0,648	0,81	0,98	0,923
		0,009	0,01	0,06	0,014	0,017	0,019	0,022	0,027
S6									
Analitički									
Electra									
Razlika									

Najveća razlika između raspona je 0,053m u 3. rasponu pri temperaturi od 0 °C

Tablica 8.2. Prikaz razlike idealnog, kritičnog raspona i kritične temperature.

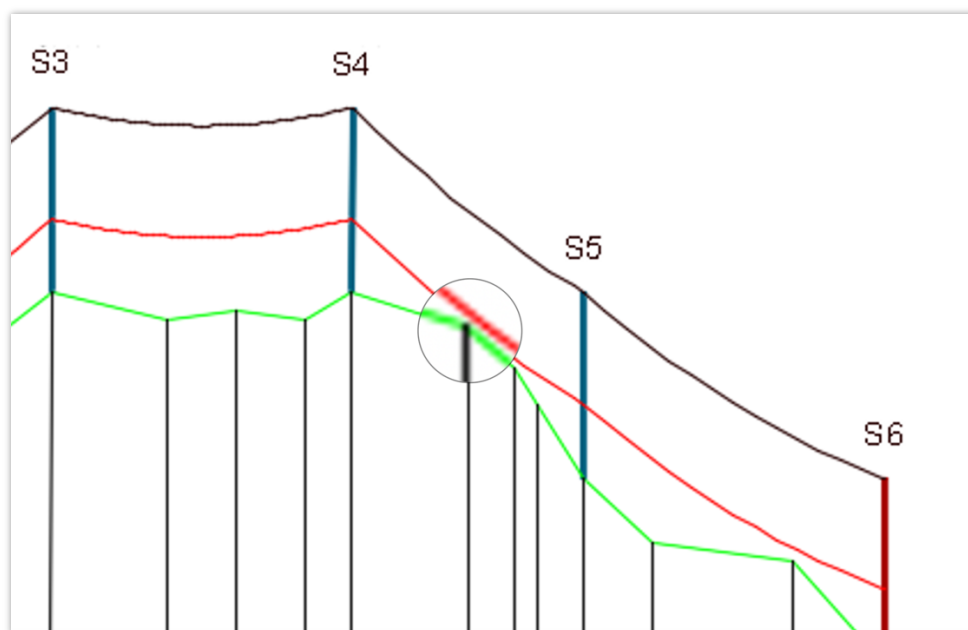
Idealan raspon	$a_{idealno} = 59,181m$	$a_{idealno} = 59,168m$
Kritični raspon	$a_k = 55,43m$	$a_k = 54,394m$
Kritična temperatura	$\vartheta_k = 36,47^{\circ}C$	$\vartheta_k = 36,7^{\circ}C$

Osim što je ne usporedivo brže, prednost rješavanja mehaničkog proračuna u AutoCad-u je ta što se može unjeti i stacionaža terena s time se više može vizualizirati sami projekt i lakše uočiti potencijalne probleme i pronaći im rješenje.

Primjer:

Projekt je započet tako da su prvo odabrani stupovi, glave stupova i oprema koja će se koristiti na zadanom zateznom polju. U tom smislu, odabrani su čelično rešetkasti stup tipa L9 i "delta" glava stupa (Slika 4.10.3), kompozitni potporni izolatori SIW 24S proizvođača Dervasil, zatezni izolatori i sva potrebna zaštitna oprema prema poglavlju 2.

Nakon unosa visina stupova, maksimalnog naprezanja, položaja vodiča na stupu i svih ostalih potrebnih parametara na uzdužnom profilu, primijećeno je da na jednom dijelu zbog izbočenosti terena nije zadovoljena sigurnosna visina. Kako bi se riješio ovaj problem, izvršena je promjena opreme. Umjesto rešetkastog stupa tipa L9 s "delta" glavom, odabran je čelično rešetkasti stup tipa NAH visine 10 m i "gama" glava stupa (Slika 4.10.5). Ovom promjenom su svi vodiči bili u najvišoj točki stupa, a sigurnosna visina je zadovoljena (Slika 8.3).



Slika 8.3. Uvećani prikaz zadovoljavanja sigurnosne visine

9. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu detaljno je proveden mehanički proračun poluizoliranih srednjenaponskih vodova s posebnim naglaskom na primjenu poluizoliranih vodiča u zahtjevnim uvjetima poput šumovitih područja, blizine naseljenih mjesta i ekstremnih lokacija obilježenih jakim vjetrovima, ledom i obilnom količinom kiše. Kroz ovu analizu, istraženi su aspekti naprezanja, horizontalnih sila i veličine provjesa vodova te njihova promjena pod utjecajem različitih temperatura i opterećenja.

Nalazi proračuna ukazuju na to da su naprezanja, horizontalne sile i provjesi vodova podložni varijacijama uzrokovanim promjenom temperature i opterećenja. Uočeno je da povećanje temperature i prisutnost leda dovode do povećanja provjesa vodova. S obzirom na težinu izolacije, PI vodiči su pokazali nešto veći provjes u usporedbi s neizoliranim vodovima. Stoga je važno uzeti u obzir ove promjene prilikom projektiranja i održavanja srednjenaponskih vodova u zahtjevnim uvjetima. Osim toga, rad se bavi detaljnim opisom elemenata koji se koriste pri spajanju vodova sa stupom ili drugim vodovima kako bi se osigurala stabilnost i sigurnost od različitih faktora kao što su eolske vibracije i prenaponi, kao i problemi uzrokovani ledom, temperaturom i snijegom.

Ovaj aspekt proračuna pruža vrijedne smjernice inženjerima za izgradnju i održavanje srednjenaponskih vodova koji će izdržati izazove takvih uvjeta. Kroz usporedbu dvaju načina izrade mehaničkog proračuna, zaključeno je da oba pristupa rezultiraju sličnim rezultatima. Međutim, mehanički proračun u programu AutoCAD Electra ističe se kao bolji izbor s obzirom na svoju bržu izvedbu proračuna, veći broj opcija i poboljšanu vizualizaciju projekta. Ove prednosti omogućuju inženjerima da brzo i efikasno projektiraju dalekovode uzimajući u obzir sve relevantne parametre. Stoga, preporučuje se korištenje AutoCAD Electra programa kao alata za mehanički proračun polu izoliranih srednjenaponskih vodova.

Ukupno gledajući, ovaj rad pridonosi razumijevanju mehaničkog proračuna poluizoliranih srednjenaponskih vodova i njegove primjene u specifičnim uvjetima. Njegovi nalazi ukazuju na važnost uzimanja u obzir promjena temperature i opterećenja te izbora odgovarajućih elemenata za osiguravanje stabilnosti i sigurnosti vodova. Daljnje istraživanje može se usredotočiti na optimizaciju dizajna vodova, primjenu alternativnih vrsta vodiča te detaljniju analizu utjecaja različitih parametara na performanse dalekovoda. Ovaj rad služi kao temelj za daljnji razvoj i unaprjeđenje pristupa mehaničkom proračunu srednjenaponskih vodova, čime se omogućava stvaranje efikasnijih i sigurnijih elektroenergetskih mreža u zahtjevnim uvjetima.

LITERATURA

- [1] „ELCA katalog“ - https://elka.hr/wp-content/uploads/2019/05/Energetski-srednjenaponski-kabeli-do-36-kV-Power-cables-up-to-36-kV_r2.pdf, 05.veljača.2023.
- [2] „TFKable Katalog“ - https://www.tfkable.com/en_pl/catalogs-and-brochures/catalogues.html, 05.veljača.2023.
- [3] “NKT Cables”, <https://www.nkt.com/products-solutions/medium-voltage/medium-voltage-cables/22-pas-22-pas-w-12-20-kv>, 05.veljača.2023.
- [4] “Katalog Eltrim”, <https://www.eltrim.com.pl/assets/katalogi/Katalog-przewody-napowietrzne-2020.pdf>, 05.veljača.2023.
- [5] „Full covered conductor solution“, ENTSO, 2017.
- [6] „Tehnička preporuka broj 10v“ 2. izdanje, Elektroprivreda Srbije, Listopad 2013.
- [7] “Oprema za Poluizolirane SN vodove” , HEP, 2022.
- [8] „Sanacija 20 kV DV TS 20/0,4 kV Jelenje 2 – TS 20/0,4 kV Trnovica , HEP,2020.
- [9] „Končar Tehnički priručnik“ – peto izdanje; 1991.
- [10] SICAME katalog - <https://www.sicame.com.au/catalogue>, 05.veljača.2023.
- [11] V. Komen: „Prijenos i distribucija električne energije“, predavanja i upute konstrukcijskih radova, Tehnički fakultet Rijeka 2022.
- [12] „Upute za projektiranje“, Energetski institut „Hrvoje Požar.

POPIS OZNAKA I KRATICA

1. Kratice:

NV – nadzemni vod

EES – elektro energetska sustava

Al/Fe – aluminijsko užice s čeličnom jezgrom

PI – poluizolirani vodič

SN – srednje naponski

XLPE – umreženi polietilen

UV – ultra ljubičaste

2. Oznake:

U_n [kV] – nazivni napon

g – gravitacija

g_z – reducirana težina zaleđenog vodiča

G_0 – vlastita težina vodiča

f [m] – provjes vodiča na nadzemnom vodu

a [m] – dužina raspona nadzemnog voda

A [mm²] – poprečni presjek vodiča

m_1 – jedinična masa vodiča

h [m] – visina

E [N/mm²] - modul elastičnosti vodiča

F [daN] - sila

β [°C⁻¹] - koeficijent linearnog toplinskog istezanja

k – koeficijent dodatnog tereta na vodiču NV na temperaturi -5°C + LED

ϑ – temperatura vodiča

σ – naprezanje vodiča

SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

U ovom diplomskom radu prikazana je analiza mehaničkog proračuna srednjenaponskog voda s poluizoliranim vodičem. Fokus je bio na primjeni poluizoliranih vodiča u zahtjevnim uvjetima poput šumovitih područja, blizine naseljenih mjesta i ekstremnih lokacija obilježenih jakim vjetrovima, ledom i obilnom količinom kiše. Proračun je otkrio varijacije u naprezanjima, horizontalnim silama i provjesu pod utjecajem promjene temperature i opterećenja. Usporedba s neizoliranim vodovima pokazala je nešto veći provjes kod poluizoliranih vodova zbog dodane težine izolacije. U istraživanju su također analizirani elementi koji se koriste za spajanje vodova kako bi se osigurala stabilnost i sigurnost protiv faktora poput eolskih vibracija, problema s ledom, temperaturnih učinaka i snijega.

Usporedba dvaju načina mehaničkog proračuna istaknula je prednost programa AutoCAD Electra koji nudi bržu izvedbu, veći broj opcija i poboljšanu vizualizaciju projekta. Ove prednosti omogućuju inženjerima učinkovito projektiranje dalekovoda uzimajući u obzir sve relevantne parametre. Ovo istraživanje doprinosi razumijevanju mehaničkog proračuna srednjenaponskih vodova s poluizoliranim vodičima i njihove primjene u specifičnim uvjetima. Također sugerira daljnje istraživanje koje bi se moglo usmjeriti na optimizaciju dizajna dalekovoda, istraživanje alternativnih vrsta vodiča te analizu utjecaja različitih parametara na performanse dalekovoda.

Sveukupno, ovaj diplomski rad služi kao temelj za daljnji razvoj i unaprjeđenje pristupa mehaničkom proračunu srednjenaponskih vodova, čime se olakšava stvaranje efikasnijih i sigurnijih električnih mreža u zahtjevnim uvjetima.

Ključne riječi:

Mehanički proračun, poluizolirani srednjenaponski vodiči, izvješće o provjesu, AutoCAD Electra, optimizacija dizajna, stabilnost, sigurnost.

SUMMARY AND KEY WORDS

This thesis presents an analysis of the mechanical calculation of a medium-voltage power line with a semi-insulated conductor. The focus was on the application of semi-insulated conductors in demanding conditions such as wooded areas, proximity to populated areas, and extreme locations characterized by strong winds, ice, and heavy rainfall. The calculation revealed variations in stresses, horizontal forces, and sagging due to temperature fluctuations and loading conditions. A comparison with non-insulated conductors showed slightly higher sagging in semi-insulated conductors due to the added weight of insulation. The study also examined the elements used for connecting the conductors to ensure stability and safety against factors like aeolian vibrations and ice-related issues, temperature effects, and snow.

The comparison of two methods for mechanical calculation highlighted the superiority of the AutoCAD Electra program, which offered faster performance, a greater number of options, and improved project visualization. These advantages enable engineers to efficiently design power lines, taking into account all relevant parameters. This research contributes to the understanding of the mechanical calculation of medium-voltage power lines with semi-insulated conductors and their application in specific conditions. Furthermore, it suggests further exploration for optimizing power line designs, exploring alternative conductor types, and analyzing the impact of different parameters on power line performance.

Overall, this thesis serves as a foundation for further development and improvement of the mechanical calculation approach for medium-voltage power lines, facilitating the creation of more efficient and secure electrical networks in demanding conditions.

Key words:

Mechanical calculation, semi-isolated medium voltage conductors, sag report, AutoCAD Electra, design optimization, stability, safety.