

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta  
za gradbeništvo  
in geodezijo



Jamova cesta 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

**DRUGG** – Digitalni repozitorij UL FGG  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Azinovič, B. 2012. Uporaba metode načrtovanja nosilnosti za jeklene konstrukcije daljnovodnih stebrov. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Dolšek, M.): 71 str.

University  
of Ljubljana

Faculty of  
Civil and Geodetic  
Engineering



Jamova cesta 2  
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

**DRUGG** – The Digital Repository  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Azinovič, B. 2012. Uporaba metode načrtovanja nosilnosti za jeklene konstrukcije daljnovodnih stebrov. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Dolšek, M.): 71 pp.

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
gradbeništvo in  
geodezijo



Jamova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ  
GRADBENIŠTVA  
KONSTRUKCIJSKA SMER

Kandidat:

**BORIS AZINOVIC**

**UPORABA METODE NAČRTOVANJA NOSILNOSTI ZA  
JEKLENE KONSTRUKCIJE DALJNOVODNIH  
STEBROV**

Diplomska naloga št.: 3236/KS

**APPLICATION OF CAPACITY DESIGN PROCEDURE  
FOR TRANSMISSION TOWERS**

Graduation thesis No.: 3236/KS

**Mentor:**

izr. prof. dr. Matjaž Dolšek

**Predsednik komisije:**

izr. prof. dr. Janko Logar

**Član komisije:**

doc. dr. Mojca Šraj

Ljubljana, 07. 09. 2012

## **IZJAVE**

Podpisani Boris Azinović izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »Uporaba metode načrtovanja nosilnosti za jeklene konstrukcije daljnovodnih stebrov«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG:

Ljubljana, 20.8.2012

Boris Azinović

**BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>006:621.315.1:624.07(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Boris Azinovič</b>
<b>Mentor:</b>	<b>izr. prof. dr. Matjaž Dolšek</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Uporaba metode načrtovanja nosilnosti za jeklene konstrukcije daljnovodnih stebrov</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>Diplomska naloga – univerzitetni študij</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>71 str., 32 pregl., 43 sl, 1 pril.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>daljnovodni stebri, porušitve, projektiranje, SIST EN 50341-1, potisna analiza, metoda načrtovanja nosilnosti</b>

**Izvleček**

V diplomski nalogi obravnavamo problematiko porušitev jeklenih paličnih daljnovodnih stebrov. Porušitev enega ali več zaporednih stebrov, lahko povzroči prekinitev prenosa električne energije. Posledično se zmanjšajo dohodki iz naslova prenosa energije, poleg tega so precejšnji tudi neposredni stroški zaradi vzpostavitve prvotnega stanja. V teoretičnem delu so na kratko predstavljeni najpogostejši vzroki porušitev in možne zaščite pred porušitvami stebrov zaradi pojava prekomerne dodatne obtežbe na vodnikih. V praktičnem delu diplomske naloge obravnavamo nosilni daljnovodni steber NC74 daljnovoda  $2 \times 110$  kV, pri čemer projektne vplive na konstrukcijo definiramo po predpisih SIST EN 50341-1 ter na podlagi linearno-elastične analize preprojektiramo kritične elemente obstoječe konstrukcije. Sledi nelinearna statična analiza za obtežne kombinacije z žledom, ki so se izkazale za najbolj kritične pri projektiranju. Izkaže se, da so za daljnovodni steber značilne razmeroma majhne dodatne nosilnosti zaradi vpliva prerazporejanja obremenitve na nosilne elemente konstrukcije. Dodatna varnost proti porušitvi je zato v veliki meri posledica stopnje izkoriščenosti elementov pri projektiranju. V zadnjem delu diplomske naloge projektiramo daljnovodni steber po načelih metode načrtovanja nosilnosti. Z namenom, da bi preprečili globalno porušitev konstrukcije, varujemo diagonalne in vertikalne elemente, medtem ko za šibek člen, kjer dopustimo poškodbe, izberemo konzole stebra, na katere so obešeni vodniki daljnovoda. Oslabitev konzole smo dosegli z zmanjšanjem profila najbolj izkoriščenega elementa na konzoli, utrditev trupa stebra pa s povečanjem profilov za diagonalne in vertikalne elemente. Na ta način smo preprečili globalno porušitev konstrukcije, pri čemer se je masa konstrukcije povečala za približno 14%. Za aplikacijo metode v praksi bi bilo potrebno predhodno izvesti verjetnostno analizo pojava izrednih obtežb in stroškovno analizo, s katero bi ugotovili, ali je predlagan način projektiranja ekonomsko upravičen.

## **BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

<b>UDC:</b>	<b>006:621.315.1:624.07(043.2)</b>
<b>Author:</b>	<b>Boris Azinović</b>
<b>Supervisor:</b>	<b>Assoc. Prof. Matjaž Dolšek, Ph.D.</b>
<b>Title:</b>	<b>Application of capacity design procedure for transmission towers</b>
<b>Document type:</b>	<b>Graduation Thesis – University studies</b>
<b>Scope and tools:</b>	<b>71 p., 32 tab., 43 fig., 1 ann.</b>
<b>Keywords:</b>	<b>transmission towers, collapse, structural design, SIST EN 50341-1, pushover analysis, capacity design</b>

### **Abstract**

The issues of collapse of steel-truss transmission towers are addressed in the thesis. The collapse of one or several consecutive towers causes loss of electricity supply. Consequently, a part of income from energy supply may be lost. In addition, collapse of tower cause high direct costs of restoration of transmission line. In the theoretical part of the thesis, the most frequent collapse patterns due to extreme action on conductors, as well as possible solutions for protection of the towers against collapse are presented. The practical part of the thesis, which addresses electric transmission tower NC74 of the  $2 \times 110$  kV transmission line, involves definition of the design action according to standard EN 50341-1 and redesign of critical elements of the existing tower on the basis of linear-elastic analysis. Follow nonlinear static analysis for sleet-based load cases, which represented the most critical action for design of the tower. The results of nonlinear static analysis indicated that overstrength due to redundancy of such towers is minor. The estimated overstrength of the tower is thus primarily consequence of the utilization rate of the structural elements in the design. In the last part of the thesis, capacity design procedure is applied to the transmission tower in order to prevent global collapse of structure. The diagonals and the vertical elements of the tower were protected against failure, whereas cantilevers of the tower were selected as weak parts of the structure. In order to meet this requirement, the diagonals and vertical elements of the tower were strengthened, and the element of the cantilever, which had the largest utilization rate, was weakened by selecting smaller cross-section of the structural element of the cantilever. This design procedure prevents global collapse of structure for the price of increased mass of the structure, which was in this case approximately 14% larger than that in the case of conventional design. For the application of the proposed design approach in practice, a probabilistic analysis of the occurrence of the extreme actions and the cost-benefit analysis should be performed in order to prove or disprove the economic feasibility of the proposed design approach.

## ZAHVALA

Zahvala gre v prvi vrsti mentorju izr. prof. dr. Matjažu Dolšku, ki mi je svetoval in me usmerjal skozi potek izdelave diplomske naloge.

Hvala vsem zaposlenim na podjetju IMK za pomoč, še posebej Metodu Bonči, ki je tudi dal idejo za diplomsko nalogo.

Hvala tudi mami Ireni, očetu Želimirju, bratu Davidu in prijateljici Sari za podporo med študijem in pri pisanju diplomske naloge.

## KAZALO VSEBINE

<b>1 UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2 KRATEK OPIS PROBLEMATIKE PORUŠITEV DALJNOVODNIH STEBROV .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Vzroki za porušitev daljnovodnih stebrov .....</b>	<b>3</b>
2.1.1 Porušitev stebrov zaradi potresa .....	3
2.1.2 Porušitev zaradi pojava žleda kot dodatnega bremena na vodnikih .....	4
2.1.3 Porušitev zaradi ekstremnega vetra .....	5
<b>2.2 Oblike porušitev jeklenih daljnovodnih stebrov .....</b>	<b>7</b>
<b>2.3 Možnosti zaščite pred rušenjem daljnovodnih stebrov zaradi prekomerne dodatne obtežbe na vodnikih .....</b>	<b>9</b>
2.3.1 Termične rešitve .....	9
2.3.2 Mehanske rešitve .....	10
2.3.3 Inženirske rešitve na daljnovodih .....	11
2.3.4 Ostale rešitve .....	14
<b>3 OPIS KONSTRUKCIJE.....</b>	<b>15</b>
<b>4 DOLOČITEV VPLIVOV NA KONSTRUKCIJO.....</b>	<b>17</b>
<b>4.1 Lastna teža konstrukcije.....</b>	<b>17</b>
<b>4.2 Sile v obesiščih vrvi zaradi lastne teže in obtežbe žleda.....</b>	<b>17</b>
4.2.1 Obtežbe žleda na vrveh .....	17
4.2.2 Natezne napetosti v vrveh zaradi lastne teže in obtežbe žleda pri različnih temperaturah....	18
4.2.3 Sile v obesiščih vrvi zaradi lastne teže vrvi in obtežbe žleda na vrveh.....	20
4.2.4 Sile v obesiščih vrvi zaradi lastne teže izolatorjev in obtežbe žleda na izolatorje .....	21
<b>4.3 Obtežba zaradi pritiska vetra .....</b>	<b>21</b>
4.3.1 Obtežba vetra splošno .....	21
4.3.2 Obtežba vetra na konstrukcijo daljnovodnega stebra .....	21
4.3.3 Sile v obesiščih vrvi zaradi obtežbe vetra na vrvi .....	23
4.3.4 Sile v obesiščih vrvi zaradi obtežbe vetra na izolatorje .....	24
<b>4.4 Montažne obtežbe.....</b>	<b>25</b>
<b>4.5 Kombinacije obtežb in obtežna tabela.....</b>	<b>25</b>
<b>5 IZRAČUN NOTRANJIH SIL IN DIMENZIONIRANJE.....</b>	<b>30</b>
<b>5.1 Opis numeričnega modela .....</b>	<b>30</b>

<b>5.2 Parametri za dimenzioniranje jeklenih konstrukcij v programu SAP 2000.....</b>	<b>32</b>
5.2.1 Uklonska dolžina elementov .....	33
<b>5.3 Postopek računa nosilnosti elementov .....</b>	<b>35</b>
<b>5.4 Rezultati dimenzioniranja za elemente.....</b>	<b>37</b>
5.4.1 Dimenzioniranje vogalnikov in prečk .....	38
5.4.2 Dimenzioniranje križnih diagonal .....	39
<b>5.5 Primer dimenzioniranja spojev .....</b>	<b>40</b>
5.5.1 Računska nosilnost vijakov pri pritrjevanju kotnikov .....	41
5.5.2 Kontrola členkastih spojev med diagonalami in vogalniki.....	42
<b>6 MODELIRANJE NEELASTIČNEGA ODZIVA.....</b>	<b>44</b>
<b>6.1 Modeliranje konstrukcije.....</b>	<b>44</b>
<b>6.2 Material .....</b>	<b>44</b>
<b>6.3 Plastični členki .....</b>	<b>45</b>
6.3.1 Primer podajanja plastičnega člena v programu SAP 2000.....	48
<b>6.4 Določitev parametrov analize .....</b>	<b>50</b>
<b>6.5 Potisna analiza za obtežno kombinacijo J .....</b>	<b>51</b>
<b>6.6 Potisna analiza za obtežno kombinacijo K.....</b>	<b>53</b>
<b>6.7 Potisna analiza za upogib stebra prečno glede na smer daljnovoda.....</b>	<b>54</b>
<b>6.8 Potisna analiza konzole za horizontalno obtežbo .....</b>	<b>56</b>
<b>6.9 Primerjava rezultatov in nevarnost rušitve stebrov.....</b>	<b>58</b>
<b>7 UPORABA METODE NAČRTOVANJA NOSILNOSTI ZA DALJNOVODNE STEBRE.....</b>	<b>60</b>
<b>7.1 Opis metode.....</b>	<b>60</b>
<b>7.2 Uporaba metode za horizontalno obtežbo v obesiških konzol .....</b>	<b>61</b>
7.2.1 Izbira šibkega člena .....	62
7.2.2 Projektiranje varovanih delov.....	64
<b>7.3 Ocena primernosti uporabe metode .....</b>	<b>66</b>
<b>8 ZAKLJUČKI .....</b>	<b>68</b>
<b>VIRI.....</b>	<b>70</b>



## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Termične rešitve (Allaire, 1998) .....	10
Preglednica 2: Mehanske rešitve (Allaire, 1998) .....	13
Preglednica 3: Ostale rešitve (Allaire, 1998) .....	14
Preglednica 4: Karakteristike vodnikov in zaščitne vrvi .....	18
Preglednica 5: Horizontalne natezne napetosti v vrveh pri različnih temperaturah .....	20
Preglednica 6: Sile v obesiščih vrvi zaradi lastne teže vrvi in obtežbe žleda na vrveh .....	20
Preglednica 7: Sile vetra na posamezen odsek daljnovodnega stebra .....	23
Preglednica 8: Obtežba v obesiščih vrvi zaradi obtežbe z vetrom na vrvi .....	24
Preglednica 9: Opis obtežnih primerov za nosilne stebre po standardu SIST EN 50341-1 .....	26
Preglednica 10: Parcialni varnostni faktorji po SIST EN 50341-1 .....	27
Preglednica 11: Obtežna tabela za vodnike, pomnožena s parcialnimi varnostnimi faktorji .....	29
Preglednica 12: Obtežna tabela za zaščitno vrv, pomnožena s parcialnimi varnostnimi faktorji .....	29
Preglednica 13: Izkoriščenost nosilnosti za najbolj obremenjene vogalnike .....	38
Preglednica 14: Izkoriščenost nosilnosti za najbolj obremenjene prečke .....	39
Preglednica 15: Križne diagonale s prekoračeno nosilnostjo .....	39
Preglednica 16: Izkoriščenost nosilnosti za predhodno neustrezne diagonale z zamenjanimi kotniki ..	40
Preglednica 17: Izkoriščenost nosilnosti za najbolj obremenjene križne diagonale po zamenjavi kotnikov .....	40
Preglednica 18: Značilnosti vijaka M12 5.6 in razpored lukenj za vijake .....	42
Preglednica 19: Strižna nosilnost vijakov M12 5.6 in nosilnost vijakov na bočni pritisk .....	42
Preglednica 20: Značilnosti vijaka M12 8.8 in razpored lukenj za vijake .....	43
Preglednica 21: Strižna nosilnost vijakov M12 8.8 in nosilnost vijakov na bočni pritisk .....	43
Preglednica 22: Vrednosti parametrov a, b, in c za povezja iz jeklenih dvojnih kotnikov po standardu FEMA 356 .....	46
Preglednica 23: Vrednosti parametrov IO, LS in CP iz jeklenih dvojnih kotnikov po FEMA 356 .....	46
Preglednica 24: Karakteristike elementa DI_C17 .....	48
Preglednica 25: Vrednosti parametrov elementa DI_C17 za potisno analizo .....	48
Preglednica 26: Primerjava rezultatov nelinearnih statičnih analiz .....	58
Preglednica 27: Izkoriščenost izbranega šibkega člena pri linearno-elastični analizi .....	63
Preglednica 28: Izkoriščenost šibkega člena pri zmanjšanju kotnika .....	63
Preglednica 29: Najbolj izkoriščen vertikalni element in diagonala pri linearno-elastični analizi za primer osnovne konstrukcije .....	64
Preglednica 30: Faktor dodatne nosilnosti za šibek člen na konzoli .....	65
Preglednica 31: Primerjava notranjih sil po MNN in linearno-elastični analizi .....	65
Preglednica 32: Izkoriščenost nosilnosti varovanih elementov po zamenjavi kotnikov .....	66

**KAZALO SLIK**

Slika 1: Poškodbe zaradi potresa na daljnovodu Sichuan. a) porušitev zaradi velike amplitude nihanja v vertikalni smeri, b) porušitev zaradi utekočinjanja terena (vir: Tian, 2010) .....	3
Slika 2: a) obloge žleda v kombinaciji z mokrim snegom na vodniku daljnovoda in b) obloge trdega ivja (vir: Zadnik, 2006).....	4
Slika 3: Detajl neenakomernega nabiranja in odpadanja žleda z vodnikov in s konstrukcije stebra (vir: Zadnik, 2006) .....	5
Slika 4: Nosilna izolatorska veriga (vir: Zadnik, 2006) .....	6
Slika 5: Nihanje vodnikov zaradi vetra (vir: CIGRE, 2007) .....	6
Slika 6: Porušitev glave daljnovodnega stebra oblike "Y" (vir: Basin Electric, 2010) .....	7
Slika 7: Upogib daljnovodnega stebra vzdolž daljnovoda (vir: Siemens, 2006).....	7
Slika 8: Daljnovodni steber M65 v regiji Münsterland (Nemčija) porušen z upogibom prečno glede na smer daljnovoda (vir: Baer, 2011).....	8
Slika 9: Torzijska obremenitev zaradi pretrga dveh vodnikov na stebru 2x110 kV daljnovoda Čajkino - Jasinovataja v Ukrajini (vir: Zadnik, 2006).....	8
Slika 10: Odstranjevanje ledu s pomočjo škripca - ice rolling (vir: Manitoba Hydro, 2012).....	11
Slika 11: Plastično deformiranje konzol je preprečilo večje poškodbe konstrukcije stebra (vir: Zadnik, 2006).....	12
Slika 12: Protiuteži na vodnikih 220 kV daljnovoda (vir: Farzaneh, 2008).....	13
Slika 13: Izsek trase obravnavanega daljnovoda.....	15
Slika 14: Nosilni daljnovodni steber NC74. Vertikalna kota označuje razdaljo od temeljev do vrha konice. Horizontalne kote so merjene od osi elementov. ....	16
Slika 15: Vpliv vetra na odsek stene stebra oz. konzole (vir: SIST EN 50341-1:2002) .....	22
Slika 16: Tloris stebra z oznako koordinatnih osi in smeri vetra (vir: SIST EN 50341-1:2002) .....	25
Slika 17: Obremenitev, ki povzroči torzijski zasuk stebra (vir: SIST EN 50341-1:2002) .....	27
Slika 18: Obremenitev, ki povzroči upogib stebra vzdolž daljnovoda (vir: SIST EN 50341-1:2002)..	28
Slika 19: Obremenitev, ki povzroči upogib stebra prečno glede na smer daljnovoda (vir: SIST EN 50341-1:2002) .....	28
Slika 20: Spodnja konzola v programu SAP2000 v.14.2.4. Različni profili so označeni z barvami.....	30
Slika 21: Računski model in obtežba vetra v a) x-smeri, b) y-smeri in c) pod kotom 45°. Točkovne sile znašajo od 0.02 do 2 kN. ....	31
Slika 22: Parametri dimenzioniranja jeklenih konstrukcij v programu SAP2000 v.14.2.4 a) na nivoju konstrukcije in b) na nivoju elementa.....	32
Slika 23: Uklonske dolžine za vogalnike simetričnega in zamaknjene paličja (vir: SIST EN 50341-1:2002).....	33
Slika 24: Značilne oblike paličij in oznake dolžin križnih diagonal (vir: SIST EN 50341-1:2002) .....	34

Slika 25: Podrobnosti računa projektne uklonske nosilnosti elementov v programu SAP 2000 .....	35
Slika 26: Interakcijska enačba med uklonom okoli močne osi in upogibnimi momenti.....	36
Slika 27: Izkoriščenost profilov .....	37
Slika 28: Lega vijakov v kotniku z enim priključenim krakom (vir: SIST EN 50341-1:2002) .....	42
Slika 29: Odnos normiran zasuk (pomik)/moment (sila) (FEMA, 2000) .....	45
Slika 30: Točke IO, LS in CP (FEMA, 2000).....	46
Slika 31: Primer podajanja plastičnega osnega členka v programu SAP 2000 .....	49
Slika 32: Parametri numerične analize.....	50
Slika 33: Oblika obtežbe za potisno analizo, ki povzroči torzijski zasuk stebra.....	51
Slika 34: Nastanek plastičnih členkov pri torzijskem zasuku stebra.....	52
Slika 35: Oblika obtežbe za potisno analizo, ki povzroči upogib stebra vzdolž daljnovoda .....	53
Slika 36: Nastanek plastičnih členkov pri upogibu stebra vzdolž daljnovoda .....	54
Slika 37: Oblika obtežbe za potisno analizo, ki povzroči upogib stebra prečno glede na smer daljnovoda.....	55
Slika 38: Nastanek plastičnih členkov pri upogibu stebra prečno na smer daljnovoda .....	56
Slika 39: Model konzole in oblika obtežbe za potisno analizo .....	57
Slika 40: Nastanek plastičnih členkov za potisno analizo konzole na horizontalno obtežbo.....	57
Slika 41: Analogija med konstrukcijo in verigo z duktilnim šibkim členom (vir: Fajfar, Fischinger, Beg, 8.poglavje priročnika Projektiranje gradbenih konstrukcij po Evrokod standardih, 2009) .....	60
Slika 42: Nastanek prvega plastičnega členka pri potisni analizi konzole.....	63
Slika 43: Primerjava mase stebrov .....	66



## 1 UVOD

Današnjega vsakdanjega življenja si ne moremo več predstavljati brez določenih dobrin, ki jih je prinesel razvoj človeštva. Ena izmed najpomembnejših takih dobrin je zagotovo elektrika. Njena vloga v modernih gospodinjstvih in industriji je nenadomestljiva in brez elektrike moderna civilizacija zagotovo ne bi bila to, kar je danes. Skokovit tehnični razvoj je prinesel potrebo po gradnji čedalje zmogljivejših elektram različnih vrst in moči, hkrati pa tudi potrebo po transportu proizvedene energije na daljše razdalje. Zaradi tega so se začeli graditi daljnovodi, ki se povezujejo v omrežja za prenos električne energije.

Daljnovod je nadzemni elektroenergetski objekt, ki omogoča prenos električne energije od proizvajalca do porabnika. Osnovni elementi, ki sestavljajo daljnovod so: trasa, temelji, stebri, vodniki, zaščitne vrvi in izolacijski elementi. V diplomski nalogi smo pozornost posvetili daljnovodnim stebrom, ki so glavni nosilni element vodnikov, preko katerih se pretaka električna energija.

Kot vsaka gradbena konstrukcija so daljnovodni stebri izpostavljeni zelo različnim vplivom, na podlagi katerih določimo zasnovo in dimenzije konstrukcije. Med posameznimi vplivi sta za konstrukcije daljnovodnih stebrov najbolj kritična pojav vetra in žleda kot dodatne obtežbe na vodnikih. Slednja lahko povzročita porušitev enega ali več zaporednih stebrov, kar lahko pomeni izpad celotnega daljnovoda. Takšni dogodki povzročijo prekinitev prenosa električne energije v času rekonstrukcije, kar upravljavcu povzroči izpad dohodka iz naslova prenosa energije, poleg tega pa še velike stroške zaradi obnove nosilnih konstrukcij. Obenem pa izpad električne energije, če ga ni možno nadomestiti iz drugega omrežja, pomeni tudi veliko neprijetnost za ljudi in hkrati povzroči veliko materialno škodo, saj so dandanes praktično vse dejavnosti povezane z električno energijo.

Lastniki in načrtovalci daljnovodov so praktično po vsem svetu postavljeni pred vprašanje, kako se obvarovati pred poškodbami daljnovodnih stebrov ob upoštevanju tehnične varnosti in ekonomike izgradnje. Enotne filozofije, standardnih rešitev ali splošne tehnične prakse na tem področju še ni. Na podlagi dosedanjih izkušenj bi bilo potrebno uvesti postopke, s katerimi lahko v kritičnih trenutkih zmanjšamo obtežbo na konstrukcije daljnovodnih stebrov, jih tako razbremenimo in zaščitimo pred poškodbami (Zadnik, 2006).

V splošnem delu diplomske naloge je na kratko predstavljena problematika porušitev jeklenih paličnih daljnovodnih stebrov. Opisali smo najpogostejše vzroke za porušitve in možne oblike porušitve. V nadaljevanju pa smo pokazali do sedaj uporabljene in zabeležene načine preprečevanja poškodb na stebrih zaradi pojava prekomerne dodatne obtežbe na vodnikih.

V praktičnem delu diplomske naloge obravnavamo tipski daljnovodni steber daljnovoda 2 x 110 kV, ki je bil projektiran po starih jugoslovanskih predpisih. Najprej preverimo primernost teh daljnovodnih stebrov glede na vplive, ki jih uvaja predpisih SIST EN 50341-1 ter ga preprojektiramo na podlagi rezultatov linearno-elastične analize. Predpostavili smo, da se stebri nahajajo na trasi Postojna – Pivka, kjer je glede na nov predpis potrebno upoštevati največji vpliv žleda in vetra za področje Slovenije. S tem smo določili najbolj neugodno kombinacijo vplivov za konstrukcijo daljnovodnega stebra.

V nadaljevanju diplomske naloge predstavljamo rezultate nelinearne statične analize, kjer ugotovimo, katera kombinacija obtežbe je najbolj kritična za porušitev obravnavanega daljnovodnega stebra ter kolikšna je varnost v smislu razmerja med nosilnostjo in projektno obremenitvijo. Sledi še uporaba metode načrtovanja nosilnosti («capacity design») za primer daljnovodnih stebrov. Postopek načrtovanja nosilnosti se uporablja za projektiranje potresnoodpornih objektov. Z uporabo tega načina projektiranja varujemo ključne nosilne elemente konstrukcije, pri čemer dovoljujemo poškodbe na tistih delih konstrukcije, ki nimajo bistvenega vpliva na globalno stabilnost konstrukcije. Podoben princip projektiranja smo uporabili na primeru daljnovodnega stebra, čeprav tovrsten pristop v obstoječih standardih SIST EN 50341-1 za projektiranje jeklenih konstrukcij prenosnega električnega omrežja ni eksplicitno določen in strogo obvezujoč, kot je denimo pri projektiranju potresnoodpornih konstrukcij. V omenjenem standardu je podan le informativni dodatek A o uskladitvi nosilnosti, ki navaja priporočena merila za projektiranje (trajanje in stroški popravil zaradi poškodb naj bodo čim manjši; komponenta daljnovoda z najnižjo stopnjo zanesljivosti naj bo izbrana tako, da pri odpovedi povzroči najmanjše sekundarne vplive obtežbe na druge komponente, da se čimbolj zmanjša nevarnost nastopa kaskadnih rušitev...).

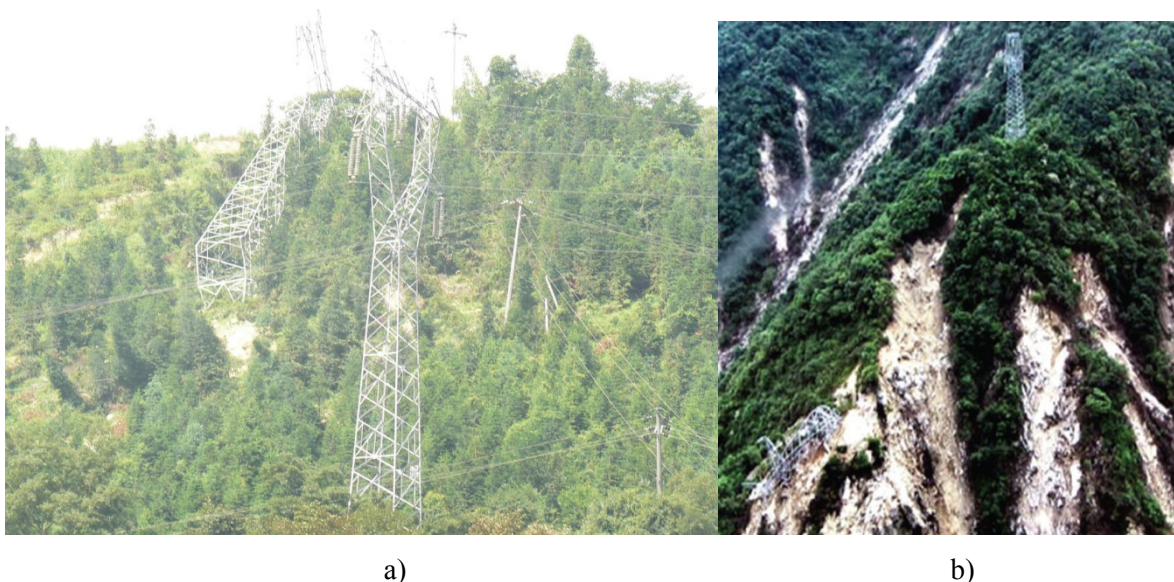
## 2 KRATEK OPIS PROBLEMATIKE PORUŠITEV DALJNOVODNIH STEBROV

### 2.1 Vzroki za porušitev daljnovodnih stebrov

V diplomski nalogi obravnavamo jeklene palične konstrukcije daljnovodnih stebrov, ki so najbolj pogosto sestavljene iz enakokrakih kotnikov. V preteklosti so se take konstrukcije rušile zaradi pojava različnih poškodb na sami konstrukciji (korozija, staranje in utrujanje materialov, poškodbe temeljev...), napak pri izdelavi in montaži (premočno napenjanje vodnika v času montaže, slabo detajlirani elementi...) in izrednih vplivov (potres, veter, žled). Največkrat so porušitve posledica kombinacije zgoraj naštetih negativnih dejavnikov. V tem poglavju se omejimo na opise porušitev zaradi prekoračitve predvidenih vplivov, saj se takim porušitvam najtežje izognemo.

#### 2.1.1 Porušitev stebrov zaradi potresa

V preteklosti je bilo malo porušitev jeklenih daljnovodnih stebrov, ki so bile posledica potresov. To kaže na dobro potresno odpornost takih konstrukcij, ki so odporne predvsem zaradi svoje majhne mase. Zato je projektna obtežba vetra na daljnovodne stebre običajno večja od potresne obtežbe, kar je ravno nasprotno kot pri stavbah. Pričakovano je, da projektna potresna obtežba presega obtežbo vetra le na seizmično zelo aktivnih območjih. Tian in soavtorji (2010) ugotavljajo, da so se porušitve zaradi potresov v preteklosti pojavile predvsem v primeru potresov z veliko amplitudo nihanja v vertikalni smeri. Poleg tega lahko med porušitve zaradi potresa štejemo še porušitve, ki se pojavijo posredno zaradi mehčanja terena, ki jih povzroči potres.



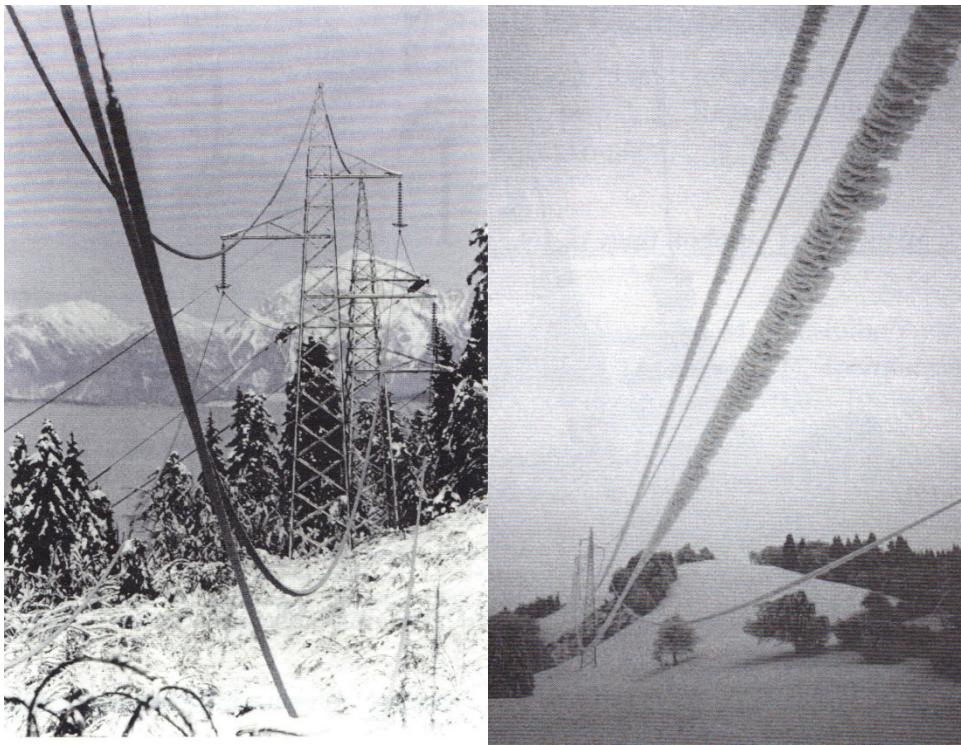
Slika 1: Poškodbe zaradi potresa na daljnovodu Sichuan. a) porušitev zaradi velike amplitude nihanja v vertikalni smeri, b) porušitev zaradi utekočinjanja terena (vir: Tian, 2010)

### 2.1.2 Porušitev zaradi pojava žleda kot dodatnega bremena na vodnikih

Na vodnikih daljnovodov se v različnih oblikah nabirajo dodatna bremena. Med najnevarnejša dodatna bremena na vodnikih sodijo:

- Čisti led (žled)
- Mehko ali trdo ivje
- Moker sneg

Največkrat se na vodnikih pojavi kombinacija naštetih dodatnih bremen. Slovenski standard SIST EN 50341-1 za vse vrste naštetih dodatnih bremen uporablja poenoten izraz žled. Ta izraz uporabljamo v nadaljevanju diplomske naloge.



a)

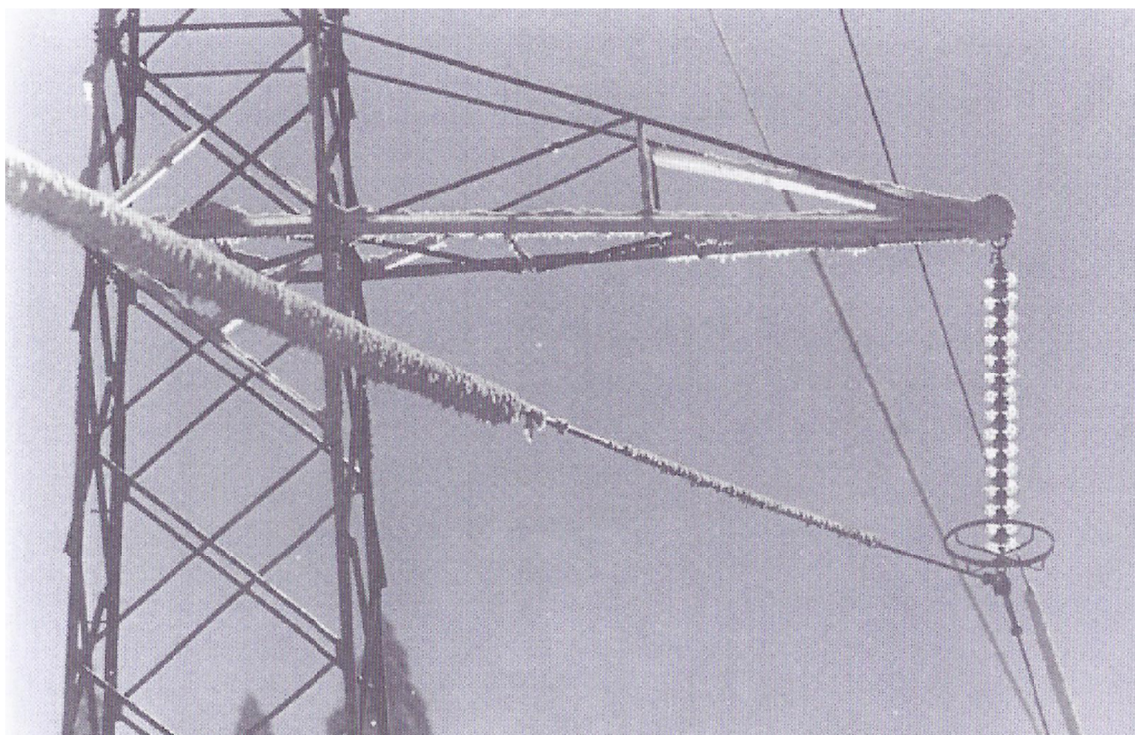
b)

Slika 2: a) obloge žleda v kombinaciji z mokrim snegom na vodniku daljnovoda in b) obloge trdega ivja (vir: Zadnik, 2006)

Obtežbe žleda delujejo v smeri gravitacije, zato se prištevajo kot dodatna masa k masi vodnika. Zaradi povečanja mase vodnika se povečajo natezne napetosti v vodniku in s tem obremenitve na samo konstrukcijo stebra. Poveča se tako vertikalna kot horizontalna komponenta sile v obesiščih vodnikov. Samo povečanje statične obtežbe v obesiščih pa največkrat še ne pomeni porušitve stebra (Zadnik, 2006).



Do porušitev je v preteklosti prihajalo predvsem zaradi neenakomerne obtežbe z žledom na vodnikih. Neenakomerna obtežba z žledom je lahko posledica različnih okoliščin, vendar sta za tako obtežbo najbolj pogosta dva vzroka. Pri prvem vzroku gre za neenakomerno nabiranje žleda na dvosistemskih stebrih zaradi razlike v jakosti toka na vodnikih posameznega sistema. To povzroči različno segretost vodnikov posameznega sistema in zato različno obtežbo na vsakem sistemu (Baer, 2011). Drugi vzrok, ki je bolj nevaren, pa je neenakomerno odpadanje žleda z vodnikov. Pojav izredne obtežbe z žledom je sicer redek, ko pa do tega pride, je verjetnost neenakomernega odpadanja zelo velika. Nevarnost pri hipnem odpadanju žleda z vodnikov je toliko večja zaradi tega, ker vodniki pri hipnem odpadu žleda močno zanihajo. To povzroči dodaten dinamični efekt, zaradi katerega se statična obtežba v obesiščih vodnikov še dodatno poveča.

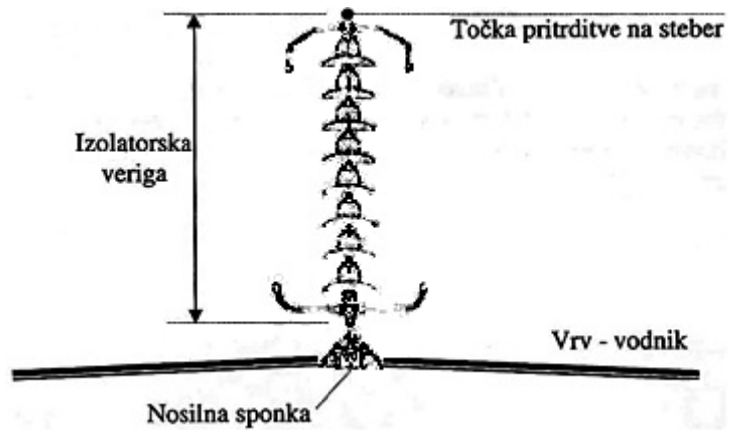


Slika 3: Detajl neenakomernega nabiranja in odpadanja žleda z vodnikov in s konstrukcije stebra (vir: Zadnik, 2006)

### 2.1.3 Porušitev zaradi ekstremnega vetra

Poznamo dva vzroka porušitev zaradi vetra. Pri prvem gre za pojav prevelikega pritiska vetra na samo konstrukcijo daljnovodnega stebra, ki je posledica vetra z ekstremno visoko hitrostjo, orkana ali tornada. Drugi vzrok pa je posledica neugodnega nihanja vodnikov zaradi vetra. Nevarno je predvsem nihanje vodnikov z nizko frekvenco in visoko amplitudo (angl. »galloping«). Za nastanek takšnega nihanja so odločilni naslednji faktorji: hitrost vetra, smer vetra, oblika površine vodnika in lastna frekvenca vodnika. Nastanek neugodnih vibracij je zato pogosto povezan s pojavom žleda na vodnikih, ki spremeni obliko površine vodnika (CIGRE, 2007). Nihanje vodnikov povzroči utrujanje materialov iz katerih so narejene izolatorske verige, nosilne sponke ter ostali elementi potrebni za

pritrditve vodnika na obesiče (slika 4). Zaradi utrujanja lahko ti elementi odpovejo, kar povzroči odpetje vodnika s stebra. Poleg dinamičnih vplivov, ki jih povzročijo nihanje, pa odpetje vodnika s stebra obenem pomeni nastanek neenakomerne obtežbe na daljnovodni steber, ki v skrajnem primeru lahko pomeni tudi porušitev celotnega stebra.



Slika 4: Nosilna izolatorska veriga (vir: Zadnik, 2006)



Slika 5: Nihanje vodnikov zaradi vetra (vir: CIGRE, 2007)

## 2.2 Oblike porušitev jeklenih daljnovodnih stebrov

Prevladujoče obremenitve v jeklenih paličnih stebrih so osne sile. Porušitve se zato največkrat pojavijo zaradi uklona elementov (uklon vogalnih elementov, uklon povezja), krhkega nateznega loma elementov in porušitev spojev (pretrg vijaka, porušitev neto prereza...). Glede na obliko porušitev, ki se pri tem pojavi ločimo naslednje primere:

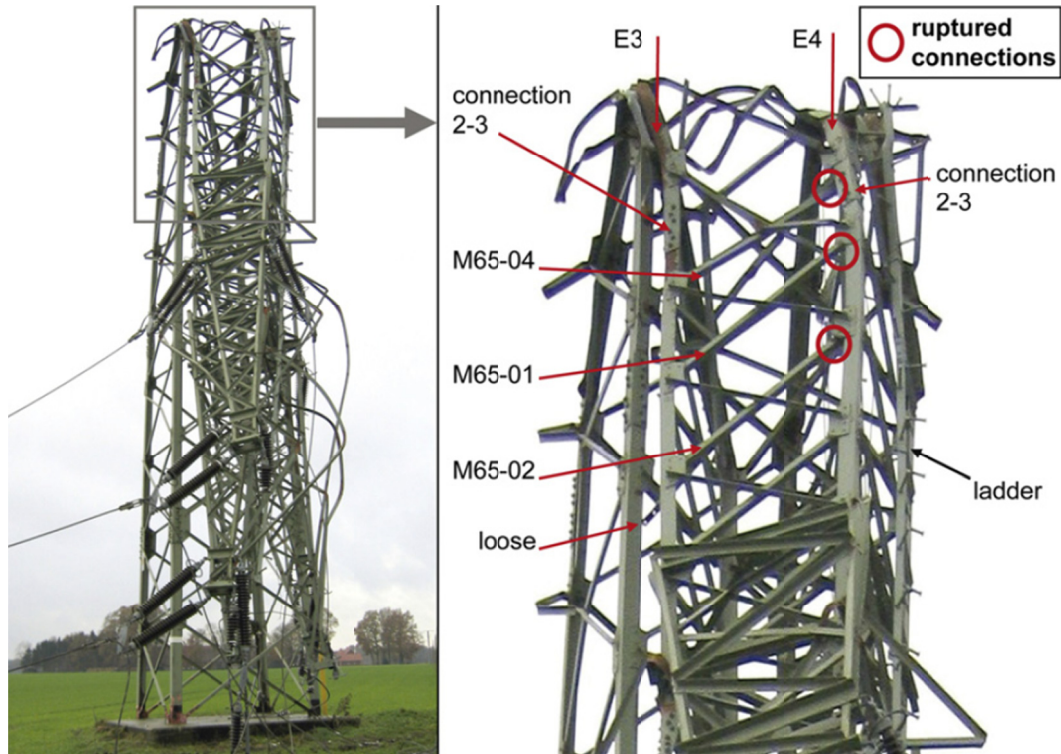
- Lokalna porušitev stebra (lahko se poruši del stebra, običajno konzola ali glava stebra) (slika 6)
- Upogib stebra vzdolž daljnovoda (slika 7)
- Upogib stebra prečno glede na smer daljnovoda (slika 8)
- Torzijska porušitev (slika 9)



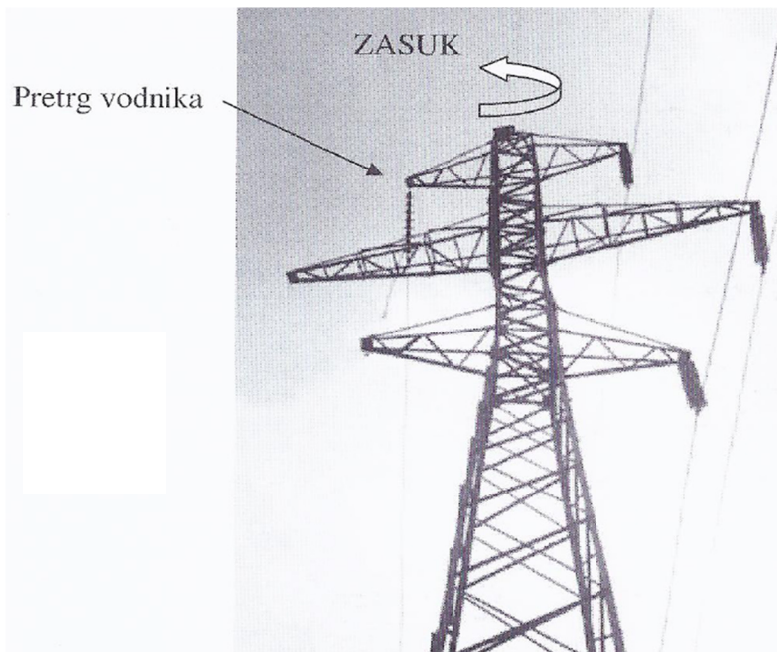
Slika 6: Porušitev glave daljnovodnega stebra oblike "Y" (vir: Basin Electric, 2010)



Slika 7: Upogib daljnovodnega stebra vzdolž daljnovoda (vir: Siemens, 2006)



Slika 8: Daljnovodni steber M65 v regiji Münsterland (Nemčija) porušen z upogibom prečno glede na smer daljnovoda (vir: Baer, 2011)



Slika 9: Torzijska obremenitev zaradi pretrga dveh vodnikov na stebru 2x110 kV daljnovoda Čajkino - Jasinovataja v Ukrajini (vir: Zadnik, 2006)

## **2.3 Možnosti zaščite pred rušenjem daljnovodnih stebrov zaradi prekomerne dodatne obtežbe na vodnikih**

Porušitve, ki se pojavijo zaradi premočnega pritiska vetra na samo konstrukcijo je težko preprečiti za premalo nosilen daljnovodni steber. Bolj uspešno pa lahko preprečimo porušitve zaradi neugodnega nihanja vodnikov, ki se pojavi zaradi pritiska vetra na vodnike. Takšno nihanje lahko preprečimo z uporabo različnih dušilcev, ki spremenijo lastno frekvenco vodnika. Lastno frekvenco vodnika pa lahko spremenimo tudi z odstranitvijo žleda z vodnikov, ki je eden izmed faktorjev, ki vplivajo na nihanje (CIGRE, 2007). V tem poglavju smo se bolj podrobno posvetili opisom zaščite pred rušenjem stebrov zaradi pojava žleda kot dodatnega bremena na vodnikih. Obstojećih metod za odstranjevanje žleda je več, odločitev o aplikaciji določene metode pa je pogojena bodisi z njeno izvedljivostjo bodisi z njeno ekonomsko upravičenostjo.

V grobem lahko ločimo dve metodi, s katerimi preprečujemo porušitve zaradi obtežbe z žledom na vodnikih. Prva rešitev je aktivna, to pomeni, da preprečimo nabiranje žleda že pred ali med nevihto, torej v času njegovega najbolj intenzivnega nastajanja. Ker se pri takem načinu žled sploh ne nabere na vodnike, je s tem preprečena njihova preobremenitev, ki bi povzročila prekoračitev sil v obesiščih, zaradi katere se daljnovodni steber lahko poruši. Obenem pa so s tako rešitvijo preprečeni tudi dinamični efekti povečanja obtežbe, ki nastajajo pri odpadanju žleda, in vplivi utrujanja materiala zaradi nihanja vodnikov. Druga rešitev je pasivna, to pomeni, da dodatna bremena odstranjujemo takrat, ko so se že nabrala na vodnikih. Pri teh metodah pa gre v večini primerov za skrajšanje časa, potrebnega za obnovitev daljnovodov in ponovno vzpostavitev omrežja (Allaire, 1998). V nadaljevanju so prikazani možni načini zaščite stebrov glede na uporabljeno tehniko.

### **2.3.1 Termične rešitve**

Poznamo štiri termične rešitve, ki so bile do sedaj razvite in uspešno uporabljene na vodnikih daljnovodov. Dve metodi temeljita na uporabi Joulovega efekta (pojav sproščanja toplote zaradi prenosa električnega toka skozi vodnik), pri čemer teče skozi vodnike električni tok, ki je močnejši od nominalnega. Povečanje lahko ustvarimo z rahlim dvigom intenzivnosti toka ali pa z različnimi vrstami kratkih stikov. Pri preostalih dveh termičnih rešitvah pa je segrevanje vodnikov posredno. Pri prvem načinu posrednega segrevanja vodnikov uporabljamo spreminjanje magnetnega polja v okolici vodnikov, kar povzroči inducirano dodatno tok v vodniku. Pri drugem posrednem načinu pa vodnike ovijemo z električnimi žicami, skozi katere teče tok neodvisno glede na vodnike. Takšno gretje lahko primerjamo npr. z električnim talnim gretjem (Allaire, 1998).

**Preglednica 1: Termične rešitve (Allaire, 1998)**

<b>OPIS METODE</b>	<b>DELOVANJE</b>	<b>EFEKTIVNOST</b>	<b>MOŽNOST UPORABE</b>	<b>STROŠKI</b>
<b>Dodatni električni tok v vodniku</b>	Žled, moker sneg, ivje	Delna	Aplikacija metode mogoča, ponekod se že uporablja	Srednje visoki
<b>Kratkostični tok</b>	Žled, moker sneg, ivje	Popolna	Aplikacija metode mogoča, ponekod se že uporablja	Visoki
<b>Induciranje toka s spreminjanjem magnetnega polja v okolici vodnika</b>	Žled, moker sneg, ivje	Delna	Aplikacija metode mogoča, ponekod se že uporablja	Visoki
<b>Uporaba dodatnih žic za segrevanje</b>	Žled, moker sneg, ivje	Popolna	Aplikacija metode mogoča, ponekod se že uporablja	Srednje visoki

### 2.3.2 Mehanske rešitve

To so rešitve, ki pomenijo bodisi mehansko odstranjevanje žleda z vodnikov bodisi inženirske rešitve aplicirane na daljnovodih.

#### 2.3.2.1 Mehansko odstranjevanje žleda

- »AD HOC« metode

Ena izmed prvih metod, ki jih štejemo med mehanske rešitve, je ročno odstranjevanje žleda. Na nedostopnih predelih si pri takem odstranjevanju pomagajo s helikopterji ali celo s strelji šibrovk. Take metode so zelo nezanesljive, vprašljiva pa je tudi njihova varnost, zato jih označimo pod skupnim imenom kot "AD HOC" metode (Allaire, 1998).

- Vsiljene vibracije

Pri tej rešitvi je potreben eksterni vibrator, ki povzroči nihanje zaledenelega vodnika. Z nihanjem povzročimo odpadanje žleda z vodnikov. Tako odstranjevanje je težko aplicirati v uporabo, saj z vibracijami povzročimo oslabilte vrvi (Allaire, 1998).

- »Ice rolling«

Tu je prisotna uporaba mobilnega škripca, ki je pritrjen na konec vrvi. Škripec potuje po vodniku in lomi žledni oklep (Manitoba Hydro, 2012).



Slika 10: Odstranjevanje ledu s pomočjo škripca - ice rolling (vir: Manitoba Hydro, 2012)

### 2.3.3 Inženirske rešitve na daljnovodih

- Zdrs vodnika v nosilni sponki

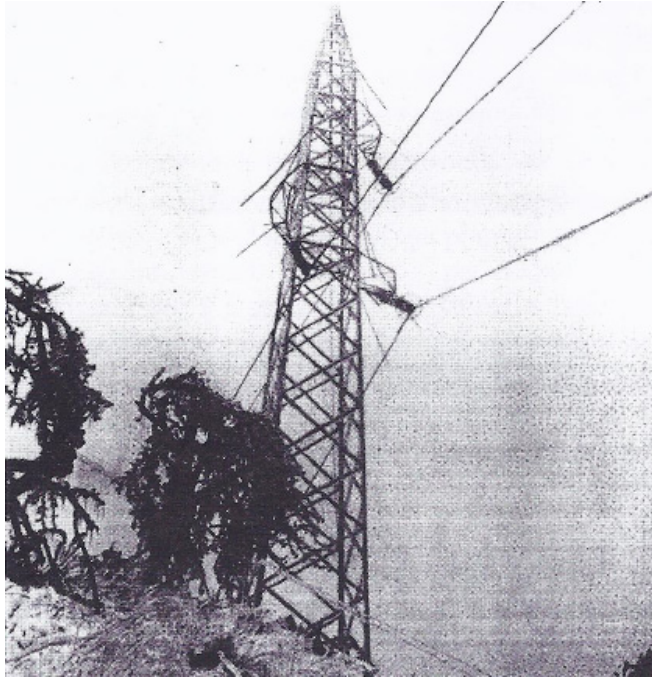
S kalibrirano nosilno sponko vodnika (slika 4) lahko dosežemo, da vodnik v sponki ob preseženi torni sili v stiku vodnik-sponka zdrsne v smer rezultante obtežbe. Mehanizem deluje tako, da vodnik zdrsne v razpetino, v kateri se nabere večja obtežba z žledom. S tem se v tej razpetini poveča povprečna natezna napetost v sami vrvi, v obesišču pa se vzpostavi ravnotežje horizontalnih sil, kar razbremeni steber v horizontalni smeri. Slabost te rešitve je, da se lahko vodnik ob drsenju mehansko poškoduje, kar zahteva dodatna dela pri sanaciji (Zadnik, 2006).

- Podaljšanje obesne sponke

Osnovni mehanizem zaščite pred poružitvijo stebra je analogen kot pri zdrs vodnika, le da dosežemo navidezno povečanje dolžine vodnika v eni razpetini in s tem zmanjšanje napenjalne sile z uporabo posebnega mehanizma sponke. Vodnik se v tem primeru ne premika relativno na sponko (Zadnik, 2006).

- Deformiranje konzol

S posebnimi konstrukcijskimi rešitvami na stebru naj bi se v območju konstrukcije konzole dosegel isti učinek kot pri podaljševanju obesne sponke, to je navidezno povečanje dolžine vodnika v eni razpetini in s tem zmanjšanje horizontalne napenjalne sile (Zadnik, 2006).



**Slika 11: Plastično deformiranje konzol je preprečilo večje poškodbe konstrukcije stebra (vir: Zadnik, 2006)**

- Odpetje vodnika s stebra

Pri tem se vodnik ob točno določeni sili odgne od obesišča na stebru ter pade na tla. S tem se konstrukcija stebra razbremeni ter ostane nepoškodovana, kar omogoča relativno hitro sanacijo situacije, ki je v bistvu le lokalno popravilo vodnikov, ki so padli na tla in se pri tem poškodovali, in ponovni dvig vodnikov v prejšnjo lego. Slaba stran te rešitve je, da je odpetje in padec vodnikov na tla smrtno nevarno za kogarkoli, ki bi bil v tistem trenutku pod daljnovodom (Zadnik, 2006).

- Protiuteži

S protiutežmi izboljšamo torzijsko odpornost vodnika, zato se le-ta težje obrača v smeri nastajanja ledu. Ta ukrep pride najbolj do izraza pri velikih razponih. Z njim vsaj delno omilimo nastanek simetrične obloge, posledično pa tudi zmanjšamo količino žleda na vodnike. Slika 12 kaže, kako se zmanjša nabiranje žleda v okolici protiuteži, kljub temu pa obloge še vedno nastanejo na preostalem delu vodnika. Na 160 m razponu je bilo zmanjšanje prisotno le na razdalji 30-40 m v okolici uteži (Farzaneh, 2008).





Slika 12: Protiteži na vodnikih 220 kV daljnovoda (vir: Farzaneh, 2008)

- Uporaba zaščitnih premazov na vodnikih

Uporaba premazov na vodnikih daljnovodnih stebrov še ni bila aplicirana. Za preprečitev nabiranja mokrega snega, žleda ali ivja lahko uporabimo hidrofobne ali ledenofobne premaze. Uporabimo lahko tudi razne viskozne in mastne premaze. Do sedaj so tako zaščito največ uporabljali pri solarnih celicah (Allaire, 1998).

Preglednica 2: Mehanske rešitve (Allaire, 1998)

OPIS METODE	DELOVANJE	EFEKTIVNOST	MOŽNOST UPORABE	STROŠKI
»AD HOC«	Žled, moker sneg, ivje	Spremenljiva	Aplikacija metode mogoča, prisotni varnostni pomisleki	Srednje visoki
»Ice rolling«	Žled, moker sneg, ivje	Popolna	Aplikacija metode mogoča, ponekod se že uporablja	Srednje visoki
Vsiljene vibracije	Mehko ivje	Delna	Težko apliciranje metode	Nizki
Zdrs v nosilni sponki	Žled, moker sneg, ivje	Samo zmanjšanje poškodb stebra	Aplikacija metode mogoča, ponekod se že uporablja	Nizki, odvisni od poškodb
Podaljšanje obesne sponke	Žled, moker sneg, ivje	Samo zmanjšanje poškodb stebra	Aplikacija metode mogoča, ponekod se že uporablja	Nizki, odvisni od poškodb
Deformiranje konzol	Žled, moker sneg, ivje	Samo zmanjšanje poškodb stebra	Aplikacija metode mogoča, ponekod se že uporablja	Nizki, odvisni od poškodb
Odpetje vodnika s stebra	Žled, moker sneg, ivje	Samo zmanjšanje poškodb stebra	Aplikacija metode mogoča, ponekod se že uporablja	Nizki, odvisni od poškodb
Protiteži	Žled, moker sneg, ivje	Zelo majhna	Aplikacija metode mogoča, ponekod se že uporablja	Nizki
Zaščitni premazi	Žled, moker sneg, ivje	Zelo majhna	Še v fazi testiranja, potencialno uporabna rešitev	Srednje visoki

### 2.3.4 Ostale rešitve

V tem poglavju so rešitve, ki so bodisi še v konceptualni fazi, ali pa so jih do sedaj uspešno uporabljali v drugih panogah in bi jih morda lahko uporabili tudi za daljnovode. So še v fazi testiranja, njihova uporaba pa je za zdaj še vprašljiva.

Preglednica 3: Ostale rešitve (Allaire, 1998)

<b>OPIS METODE</b>	<b>DELOVANJE</b>	<b>EFEKTIVNOST</b>	<b>MOŽNOST UPORABE</b>	<b>STROŠKI</b>
<b>Elektromagnetni impulzi</b>	Žled, moker sneg, ivje	Popolna	Uporaba v letalstvu, možno tudi za vodnike	Srednje visoki
<b>Ultrazvočne metode</b>	Žled, moker sneg, ivje	Potrebno testirati za vodnike	Uporaba v letalstvu, težko aplicirati na vodnike	/
<b>Pnevmatske metode</b>	Žled, moker sneg, ivje	Popolna	Uporaba v letalstvu, možno tudi za vodnike	Srednje visoki
<b>Shape memory alloys</b>	Žled, moker sneg, ivje	Potrebno testirati za vodnike	Potencialno tudi za vodnike	/
<b>Zamrzitev vodnih kapljic</b>	Žled	/	Konceptualna faza	/
<b>Segrevanje vodnih kapljic</b>	Žled, moker sneg, ivje	/	Konceptualna faza	/

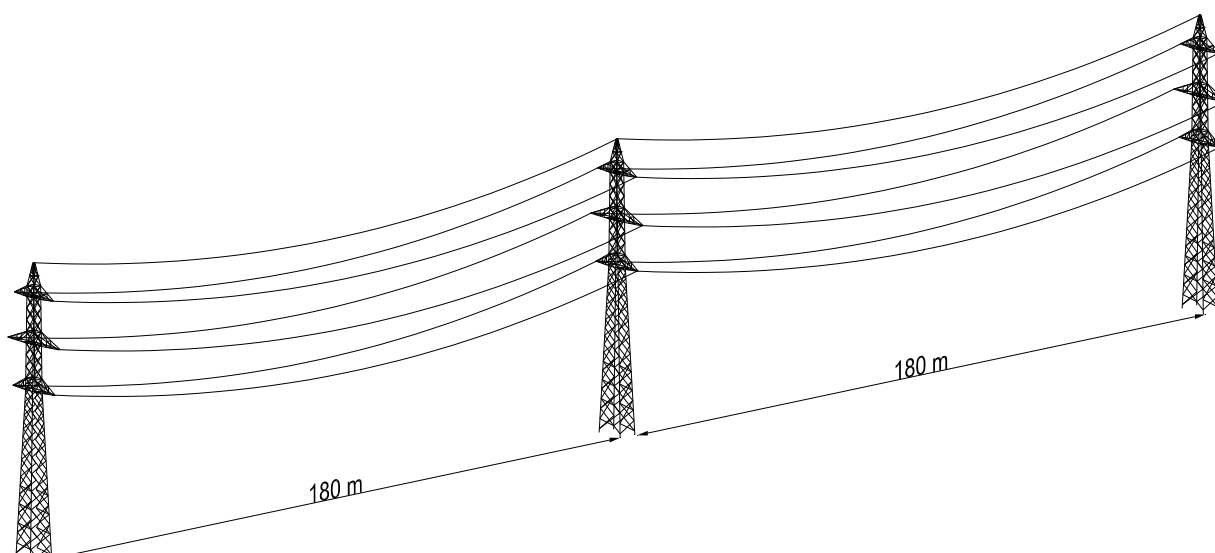
### 3 OPIS KONSTRUKCIJE

Preverjamo nosilni daljnovodni steber z oznako NC74, ki so ga zasnovali v projektantskem biroju IBE Ljubljana. Stebri so bili zasnovani po jugoslovanskem pravilniku iz leta 1988. Za lokacijo konstrukcije je predpostavljena trasa Postojna – Pivka.

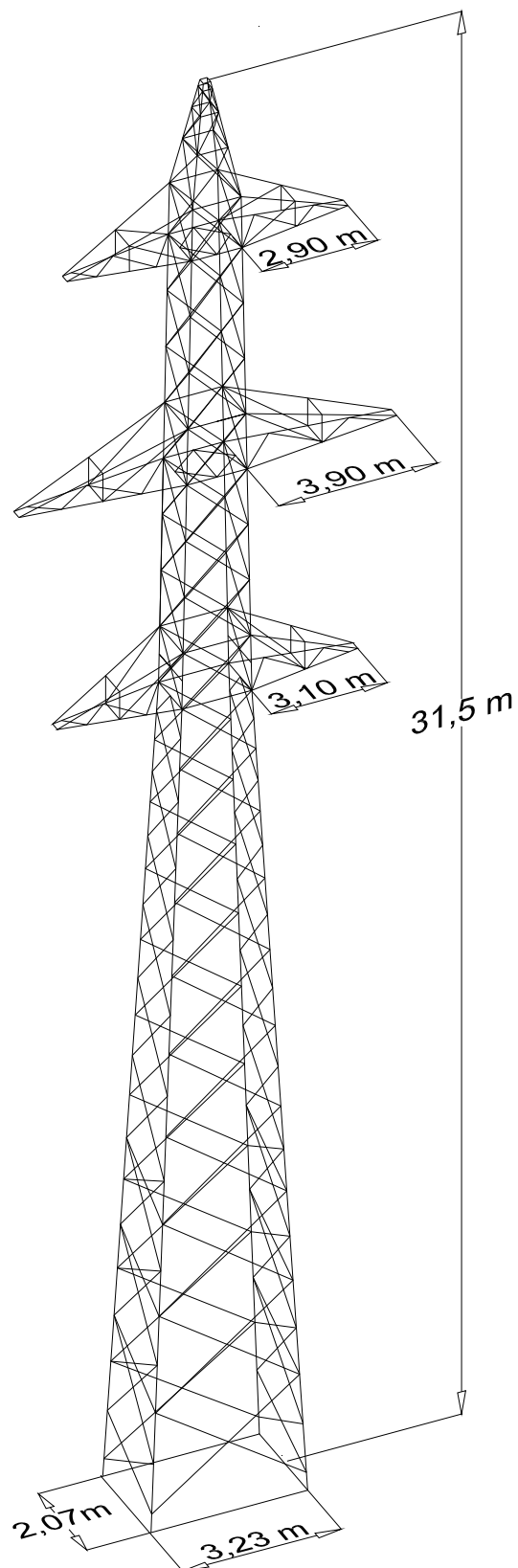
Obravnavani nosilni daljnovodni steber je 31,5 m visoka jeklena prostorska palična konstrukcija z obliko glave "sod". Glava stebra je sestavljena iz treh parov konzol in konice. Spodnja konzola se nahaja na višini 17,9 m od tal, srednja na višini 22,9 m in zgornja na višini 27,9 m. Dimenzije razpetin konzol so prikazane na sliki 14. Bolj natančen opis geometrije in oznake posameznih elementov so vidne na načrtu (Priloga A).

Razpetini levo in desno od stebra merita 180 m, obesišča vodnikov pa so na enaki višini. Med stebri je napetih 6 vodnikov tipa Al/Fe 240/40 mm<sup>2</sup> ter zaščitna vrv AlMg1/Fe 95/55 mm<sup>2</sup>. Prijemališča sil so na koncih konzol za vodnike in na vrhu konice za zaščitno strelovodno vrv. Največja obratovalna (mehanska) napetost v vodniku je lahko 8 kN/cm<sup>2</sup>, v zaščitni vrvi pa 15 kN/cm<sup>2</sup>.

Posamezni elementi stebra so izdelani iz vroče valjanih enakokrakih profilov. Za profile in priključne pločevine dejanske konstrukcije je bilo uporabljeno jeklo Č.0361 izdelano po standardu JUS C.B0.500. V modelu pa smo uporabili jeklo S235 JR, ki je izdelano po evropskem standardu EN 10025:1993 in je primerljivo z zgoraj omenjenim jeklom. Za stikovanje elementov so uporabljeni vijaki trdnostnega razreda 5.6.



Slika 13: Izsek trase obravnavanega daljnovoda



Slika 14: Nosilni daljnovodni steber NC74. Vertikalna koda označuje razdaljo od temeljev do vrha konice.  
Horizontalne kote so merjene od osi elementov.

## 4 DOLOČITEV VPLIVOV NA KONSTRUKCIJO

Stalni vplivi na daljnovodni steber so sledeči: lastna teža profilov, priključnih pločevin, izolatorjev, vodnikov in zaščitnih vrvi ter drugih fiksnih delov opreme.

Spremenljivo obtežbo predstavljajo: obtežba z vetrom, ki deluje na vse komponente daljnovoda (daljnovodni steber, vodnike, zaščitne vrvi, izolatorje) in obtežba z žledom, ki deluje na vodnike, zaščitne vrvi ter izolatorje.

Določanje vplivov na daljnovodni steber je zelo zahtevno zaradi nelinearnega obnašanja vrvi. Z izrazom vrv v nadaljevanju označujemo tako vodnike kot zaščitne vrvi. Natezna sila v vrvi, ki jo upoštevamo kot akcijo na daljnovodni steber, je odvisna od lastne teže vrvi, obtežbe žleda, sile s katero se vrv napne (z njo se korigirajo povesi vrvi), obtežbe z vetrom in zunanje temperature. Sile v obesiščih vrvi, ki so posledica natezne sile v vrvi, določimo ločeno za dve ortogonalni smeri. Najprej izvedemo račun za sile v obesiščih vrvi, ki so posledica lastne teže vrvi ter obtežbe žleda na vrveh pri različnih temperaturah. Nato ločeno izvedemo še račun za sile v obesiščih vrvi, ki so posledica obtežbe z vetrom na vrveh.

### 4.1 Lastna teža konstrukcije

Za izračun lastne teže konstrukcije upoštevamo specifično težo jekla  $\gamma = 78,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$  in dimenzije izbranih profilov v modelu. Tako določeno obtežbo smo za 10% povečali. Na ta način smo približno upoštevali še težo zaradi priključnih pločevin ter vijakov. Masa dejanskega stebra skupaj s težo priključnih pločevin znaša 3,5 t. Obtežbo na konstrukcijo zaradi lastne teže program poda avtomatsko kot zvezno obtežbo na elemente.

### 4.2 Sile v obesiščih vrvi zaradi lastne teže in obtežbe žleda

#### 4.2.1 Obtežbe žleda na vrveh

Obtežbe žleda nastanejo zaradi obloge vrvi z ivjem, ledom ali mokrim snegom. Te delujejo v smeri gravitacije, zato se obtežbo žleda upošteva kot dodatna masa k masi vodnika oz. zaščitne vrvi ali konstrukcije. Dodatna obtežba žleda je obtežba, ki se na obravnavanem mestu pojavlja povprečno vsakih 5 let (SIST EN 50341-1:2002), vendar nikoli ni manjša kot:

$$g_D = f \cdot 1,8 \cdot \sqrt{d} \quad [\text{N/m}],$$

kjer je:

d... premer vodnika oz. zaščitne vrvi, v mm in

f... faktor, ki je odvisen od žledne cone.

Trasa Postojna – Pivka spada v 3.cono obtežbe žleda:  $f=5,0$ .

Za vodnike uporabimo tip vrvi Al/Fe 240/40 mm<sup>2</sup>, za zaščitno vrv pa AlMg1/Fe 95/55 mm<sup>2</sup>. Podatki o vrveh so zbrani v preglednici 4.

**Preglednica 4: Karakteristike vodnikov in zaščitne vrvi**

Vrv	Tip vrvi	S [mm <sup>2</sup> ]	d [mm]	E[kN/cm <sup>2</sup> ]	$\alpha$ [1/K]	$g_L$ [N/m]
Vodnik	Al/Fe 240/40	282,5	21,9	7700	0,0000189	9,87
Zaščitna vrv	AlMg1/Fe 95/55	152,8	16,0	10900	0,0000153	7,08

Kjer so:

S... prerez vrvi,

d... premer vrvi,

E... elastični modul vrvi,

$\alpha$ ... temperaturni razteznostni koeficient vrvi in

$g_L$ ... lastna teža vrvi.

VODNIK:  $g_D=5,0 \cdot 1,8 \cdot \sqrt{21,9}=42,1$  N/m

ZAŠČITNA VRV:  $g_D=5,0 \cdot 1,8 \cdot \sqrt{16,0}=36,0$  N/m

#### 4.2.2 Natezne napetosti v vrveh zaradi lastne teže in obtežbe žleda pri različnih temperaturah

Za največje obratovalne napetosti  $\sigma_0$  v vrveh so bile povzete vrednosti iz projektne dokumentacije obravnavanih stebrov (IBE, 2010). V vodniku je največja obratovalna napetost lahko 8 kN/cm<sup>2</sup>, v zaščitni vrvi pa 15 kN/cm<sup>2</sup>. Največje obratovalne napetosti so določene glede na maksimalne dovoljene povesi izbranih vrvi. V primeru, da bi maksimalni povesi prekoračili dovoljene vrednosti iz standarda SIST EN 50341-1, bi morali višino obravnavanega stebra povečati, ali izbrati nižje obratovalne napetosti. Kontrola povesov presega obseg te diplomske naloge.

Največja obratovalna (mehanska) napetost, t.j. izbrana računsko vrednost, ki jo vodoravna komponenta natezne napetosti doseže pri temperaturi -5°C z obtežbo žleda ali pri temperaturi -20°C brez obtežbe žleda, ne sme presegati vrednosti normalne dopustne napetosti vrvi (18.člen, Pravilnik o tehničnih normativih za graditev nadzemnih elektroenergetskih vodov z nazivno napetostjo od 1 kV do 400 kV, 1988).

Kontrola normalnih dopustnih napetosti:

$$\text{VODNIK:} \quad \sigma_0 = 8 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} < 13,0 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\text{ZAŠČITNA VRV:} \quad \sigma_0 = 15 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} < 22,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Vrednosti  $13,0 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$  in  $22,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$  sta normalni dopustni napetosti za izbrane vrvi. (20.člen, Pravilnik o tehničnih normativih za graditev nadzemnih elektroenergetskih vodov z nazivno napetostjo od 1 kV do 400 kV, 1988).

Ker se konstrukcija glede na žledno karto nahaja v 3.coni, kjer je predpisana največja obtežba z žledom, je bolj verjetno, da bo največja obratovalna napetost v vrveh dosežena pri temperaturi  $-5^\circ\text{C}$  z obtežbo žleda kot pri temperaturi  $-20^\circ\text{C}$  brez obtežbe žleda. Trditev dokažemo tako, da preverimo horizontalne napetosti v vrveh za vse kombinacije, ki so predpisane v SIST EN 50341-1.

Da lahko določimo horizontalne napetosti v vrveh pri temperaturah, ki jih zahtevajo še ostale obtežne kombinacije v SIST EN 50341-1, uporabimo klasično položajno enačbo vrvi (Zadnik, 2006):

$$\frac{g^2 \cdot L^2}{24 \cdot \sigma^2} - \frac{g_0^2 \cdot L^2}{24 \cdot \sigma_0^2} = \alpha(T - T_0) + \frac{\sigma - \sigma_0}{E \cdot S \cdot \cos \psi}$$

kjer je:

L... razdalja med stebroma,

T... temperatura,

g... teža vrvi na meter (z ali brez obtežbe žleda, odvisno od obtežne kombinacije),

$\sigma$  ... pripadajoča horizontalna napetost v vrvi,

E... elastični modul vrvi,

$\alpha$ ... temperaturni koeficient vrvi,

S... prerez vrvi,

$\psi$ ... kot zaradi višinske razlike obesišč vrvi (v našem primeru  $\psi=0$ ),

$T_0, g_0, \sigma_0$ ... parametri osnovnega stanja in

T, g,  $\sigma$ ... parametri iskanega stanja.

S klasično položajno enačbo izračunamo horizontalne natezne napetosti v vrveh kot posledico lastne teže vrvi in obtežbe žleda na vrveh pri različnih temperaturah. SIST EN 50341-1 predpisuje obtežne kombinacije pri temperaturah  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $-5^{\circ}\text{C}$  in  $5^{\circ}\text{C}$ . Za osnovno stanje privzamemo obtežni primer pri  $-5^{\circ}\text{C}$  z obtežbo žleda, pri katerem je dosežena največja obratovalna napetost. Na podlagi tega obtežnega primera izračunamo še napetosti pri  $-20^{\circ}\text{C}$  ter  $5^{\circ}\text{C}$ . Pri teh temperaturah se za določanje horizontalne komponente natezne napetosti upošteva samo lastno težo vrvi.

**Preglednica 5: Horizontalne natezne napetosti v vrveh pri različnih temperaturah**

T[°C]	Obtežba vrvi	$\sigma_h$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	
		Vodnik	Zaščitna vrv
-20	lastna teža	1,65	2,91
-5	lastna teža in žled	8	15
5	lastna teža	1,59	2,76

#### 4.2.3 Sile v obesiščih vrvi zaradi lastne teže vrvi in obtežbe žleda na vrveh

Vertikalno komponento sile v obesišču izračunamo po poenostavljeni enačbi:

$$G_V = g \cdot L_G,$$

kjer sta:

$g$ ... teža vrvi na meter (z ali brez obtežbe žleda, odvisno od obtežne kombinacije) in

$L_G$ ... razdalja med temenoma verižnice levo in desno od obravnavanega stebra;  $L_G = 2 \cdot 90 \text{ m} = 180 \text{ m}$ .

Horizontalna komponenta pa je:

$$G_H = \sigma_h [^{\circ}\text{C}] \cdot S,$$

kjer sta:

$\sigma_h [^{\circ}\text{C}]$ ... horizontalna komponenta natezne napetosti v vrvi in

$S$ ... prerez vrvi.

**Preglednica 6: Sile v obesiščih vrvi zaradi lastne teže vrvi in obtežbe žleda na vrveh**

T[°C]	Obtežba vrvi	$G_H$ [kN]		$G_V$ [kN]	
		Vodnik	Zaščitna vrv	Vodnik	Zaščitna vrv
-20	lastna teža	4,67	4,44	1,78	1,27
-5	lastna teža in žled	22,60	22,92	9,35	7,75
5	lastna teža	4,50	4,22	1,78	1,27



#### 4.2.4 Sile v obesiščih vrvi zaradi lastne teže izolatorjev in obtežbe žleda na izolatorje

Teža izolatorja:

$$G_{ins}=0,7 \text{ kN}$$

Teža izolatorja z dodatno obtežbo žleda:

Obtežbo povečamo za 20%.

$$G_{q,ins}=0,84 \text{ kN}$$

### 4.3 Obtežba zaradi pritiska vetra

#### 4.3.1 Obtežba vetra splošno

Obtežba vetra je odvisna od geografskega območja v katerem poteka nadzemni vod. Račun pritiskov vetra je v nacionalnih normativih standarda SIST EN 50341-1 (National Normative Aspect - NNA) povsem poenostavljen in je odvisen samo od lokacije objekta na vetrni karti. Predpostavljeno je, da se pritisk ne spreminja po višini konstrukcije.

Po vetrni karti je Trasa Postojna – Pivka v 3.coni. Za višine nadzemnih vodov od 0 do 40 m nad zemljo so v 3.coni predpisane vrednosti pritiskov med 1100 in 1300 N/m<sup>2</sup>. V tem diplomskem delu je bila uporabljena konservativna vrednost:

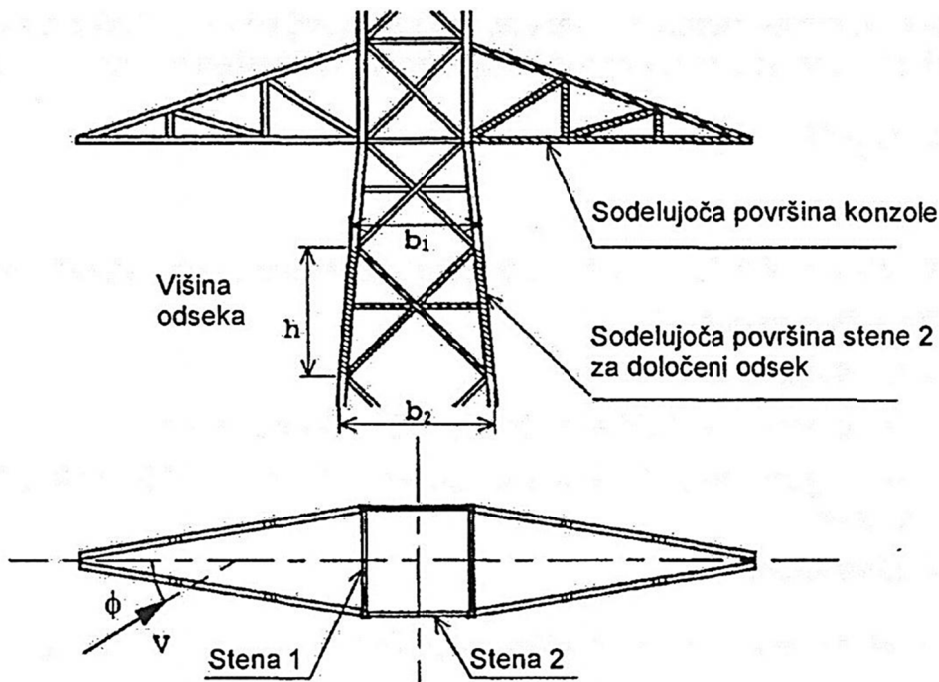
$$q_h=1300 \text{ N/m}^2.$$

Obtežba zaradi pritiska vetra deluje na steber na 2 načina:

- neposredno na samo konstrukcijo stebra
- posredno preko vodnikov, zaščitnih vrvi in izolatorjev (obesnega materiala)

#### 4.3.2 Obtežba vetra na konstrukcijo daljnovodnega stebra

V nacionalnih normativih je podan poenostavljen račun obtežbe vetra na trup stebra. Ta se lahko računa po posameznih odsekih stebra z upoštevanjem njihove višine od tal in ob predpostavki, da obtežbe delujejo v težišču vsakokratnega odseka stebra.



Slika 15: Vpliv vetra na odsek stene stebra oz. konzole (vir: SIST EN 50341-1:2002)

Za obtežne kombinacije predpisane v SIST EN 50341-1 potrebujem sile v posameznem odseku za tri smeri vetra:

$$Q_{wt}(\phi=0^\circ)=q_h \cdot C_x \cdot A_{t1},$$

$$Q_{wt}(\phi=90^\circ)=q_h \cdot C_x \cdot A_{t2},$$

$$Q_{wt}(\phi=45^\circ)=q_h \cdot C_x \cdot 0,6 \cdot (A_{t1}+A_{t2}),$$

kjer je:

$\phi$ ... vpadni kot glede na najneugodnejšo smer vetra (slika 15),

$q_h$ ... tlak vetra po preglednici oz. karti vetrnih con za Slovenijo,  $q_h=1300 \text{ N/m}^2$ ,

$C_x$ ... aerodinamični faktor delovanja vetra,  $C_x=1,6$  in

$A_{t1}, A_{t2}$ ... sodelujoča površina stene 1 oz. stene 2 za določeni odsek stebra (slika 15).

Za palične konzole je silo vetra mogoče oceniti po enačbi:

$$Q_{wt}=q_h \cdot C_x \cdot A_{tc} \cdot (\sin \phi + 0,4 \cdot \cos \phi),$$

kjer je:

$A_{tc}$ ... sodelujoča površina elementov stene palične konzole izpostavljena vetru (slika 15).

Konstrukcija je bila razdeljena na odseke s približno višino 5 m. Sile vetra v težišču posameznega odseka prikazuje preglednica 7.

**Preglednica 7: Sile vetra na posamezen odsek daljnovodnega stebra**

Odsek	1.	2.	3.	4.	5.	Konica	Spodnja konzola	Srednja konzola	Zgornja konzola
<b>Qwt(<math>\Phi=0^\circ</math>) [kN]</b>	5,23	3,43	3,47	2,92	2,59	0,65	0,26	0,34	0,26
<b>Qwt(<math>\Phi=90^\circ</math>) [kN]</b>	4,78	3,83	3,77	3,20	2,69	0,65	0,65	0,85	0,65
<b>Qwt(<math>\Phi=45^\circ</math>) [kN]</b>	6,00	4,36	4,35	3,67	3,17	0,78	0,64	0,84	0,64

#### 4.3.3 Sile v obesiščih vrvi zaradi obtežbe vetra na vrvi

Tlak vetra na vrvi povzroča sile prečno na smer daljnovoda in tudi povečane natezne sile v vrveh. Rezultirajoča sila vetra na nosilni steber, ki jo prenaša vsaka vrv, je vsota prispevkov vplivov iz obeh sosednjih razpetin in znaša:

$$Q_{wc} = q_h \cdot G_c \cdot C_c \cdot d \cdot \frac{L_1 + L_2}{2} \cdot \cos^2 \phi,$$

kjer so:

$q_h$ ... tlak vetra po preglednici oz. karti vetrnih con za Slovenijo,  $q_h = 1300 \text{ N/m}^2$ ,

$d$ ... premer vodnika oz. zaščitne vrvi, v mm,

$L_1, L_2$ ... dolžini obeh sosednjih razpetin,

$\phi$ ... vpadni kot glede na najneugodnejšo smer vetra (glej sliko 15),

$G_c$ ... faktor razpetine, ki je odvisen od dolžine razpetine; za razpetine do 200 m velja:  $G_c = 1,0$  in

$C_c$ ... faktor zračnega upora vodnika;  $C_c = 1,0$  za vodnike premera nad 15,8 mm

Pri računu sil vetra na vrvi moramo upoštevati dve kombinaciji:

- a.) Polna obtežba z vetrom na vrvi brez obtežbe žleda
- b.) 30% obtežba z vetrom na vrvi z obtežbo žleda

Vpliv žleda pri računu sil vetra zajamemo s povečanjem premera vodnikov in spremembo faktorja zračnega upora. V nacionalnih normativih je za faktor zračnega upora  $C_c$  pri sočasni obtežbi žleda predpostavljena nespremenjena vrednost 1,0. Račun povečanega premera zaradi žledne obloge  $D_1$  pa je v nacionalnih normativih določen z enačbo:

$$D_1 = \sqrt{d^2 + 0,00014 \cdot g_n},$$

kjer sta:

d... premer vodnika v m,

$g_n$ ... obtežba žleda v N/m.

**Preglednica 8: Obtežba v obesiščih vrvi zaradi obtežbe z vetrom na vrvi**

$Q_{WC}$ [kN]	h [m]	Polna obtežba z vetrom na vrvi brez obtežbe žleda			$D_1$ [mm]	30% obtežba z vetrom na vrvi z obtežbo žleda		
		$\phi=0^\circ$	$\phi=90^\circ$	$\phi=45^\circ$		$\phi=0^\circ$	$\phi=90^\circ$	$\phi=45^\circ$
Zaščitna vrv	31,5	3,08	0	2,18	27,6	1,59	0	1,13
Vodniki	27,9	4,21	0	2,98	32,7	1,89	0	1,33
	22,9	4,21	0	2,98		1,89	0	1,33
	17,9	4,21	0	2,98		1,89	0	1,33

Zaradi poenostavitve v nacionalnih normativih, da je tlak vetra konstanten ne glede na višino daljnovodnega stebra, so sile v obesiščih vseh konzol enake.

#### 4.3.4 Sile v obesiščih vrvi zaradi obtežbe vetra na izolatorje

Pritisk vetra na izolatorske sklope povzroči dodatne sile v obesiščih vrvi. Neposredna sila vetra deluje na obesišče v smeri vetra in je:

$$Q_{Wins} = q_h \cdot 1,2 \cdot A_{ins},$$

kjer sta:

$q_h$ ... tlak vetra po preglednici oz. karti vetrnih con za Slovenijo,  $q_h = 1300 \text{ N/m}^2$  in

$A_{ins}$ ... vetru izpostavljena površina izolatorja,  $A_{ins} \cong 0,25 \text{ m}^2$

$$Q_{Wins} = 1300 \cdot 1,2 \cdot 0,25 = 0,39 \text{ kN}$$

Vpliv žleda na izolator zajamemo tako, da povečamo njegovo površino za 50%.

$$Q_{Wins,I} = 1,5 \cdot 0,39 \text{ kN} = 0,59 \text{ kN}$$

#### 4.4 Montažne obtežbe

Obtežbe, ki nastopijo pri gradnji, montaži in vzdrževanju, imajo v standardu SIST EN 50341-1 skupno ime montažne obtežbe.

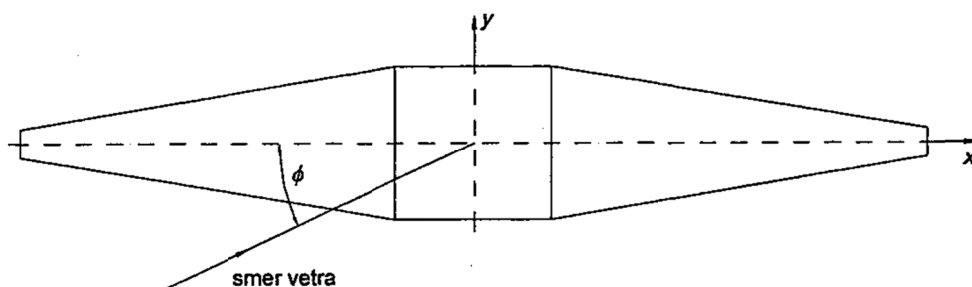
Na konzolah jeklenih paličnih nosilnih stebrov je potrebno predpostaviti navpične sile najmanj 1,0 kN, pri čemer mora biti upoštevano, da delujejo skupaj s trajnimi obtežbami. Določeno je, naj te sile delujejo v najbolj neugodnih vozliščih spodnjega pasu ene od sten konzole. V našem primeru je najbolj neugodna točka obesišče vodnika.

Pri vseh pohodnih elementih, ki so nagnjeni manj kot  $45^\circ$  proti vodoravnici, je treba upoštevati navpično silo v velikosti 1,0 kN v polovici elementa. Pri tem se zanemarijo vse ostale sile na element.

#### 4.5 Kombinacije obtežb in obtežna tabela

Za nosilne stebre, ki jih preverjamo po standardu SIST EN 50341-1, moramo upoštevati naslednje kombinacije obtežb:

- a.) Vremensko pogojene obtežbe z:
  - delovanjem vetra v treh glavnih smereh (primeri obtežb A, B, C)
  - delovanjem vetra v treh glavnih smereh ob sočasni žledni oblogi (primeri obtežb D, E, F)
- b.) Montažne obtežbe (primer obtežbe I)
- c.) Izredne obtežbe neenakomernega žleda ali zaradi neenakomernega odpada te obtežbe (primeri obtežb J in K)



Slika 16: Tloris stebra z oznako koordinatnih osi in smeri vetra (vir: SIST EN 50341-1:2002)

Kombinaciji G in H v standardu SIST EN 50341-1 nista merodajni za kontrolo našega nosilnega stebra. Kombinacijo G je namreč treba dodatno uporabiti le v primeru vzgonskih obtežb, kombinacija H pa velja za obtežbe razbremenilnih in kotnih razbremenilnih stebrov.

Preglednica 9: Opis obtežnih primerov za nosilne stebre po standardu SIST EN 50341-1

Obtežni primer	Opis
A	Stalne obtežbe in veter v smeri x, pripadajoče natezne sile v vodnikih in zaščitnih vrveh pri +5°C.
B	Stalne obtežbe in veter v smeri y, pripadajoče natezne sile v vodnikih in zaščitnih vrveh pri +5°C.
C	Stalne obtežbe in poševni veter (veter pod kotom 45° glede na vod), pripadajoče natezne sile v vodnikih in zaščitnih vrveh pri +5°C.
D	Stalne obtežbe, 30% obtežbe vetra v smeri x in obtežbe žleda; pripadajoče natezne sile v vodnikih in zaščitnih vrveh pri -5°C.
E	Stalne obtežbe, 30% obtežbe vetra v smeri y in obtežbe žleda; pripadajoče natezne sile v vodnikih in zaščitnih vrveh pri -5°C.
F	Stalne obtežbe, 30% obtežbe s poševnim vetrom (veter pod kotom 45° glede na vod) in obtežbe žleda; pripadajoče natezne sile v vodnikih in zaščitnih vrveh pri -5°C.
I	Stalne obtežbe in montažne obtežbe; pripadajoče natezne sile v vodnikih in zaščitnih vrveh pri +5°C.
J	<p>Stalne obtežbe in obtežbe žleda na vse vodnike pri -5°C.</p> <p>Pri stebrih, ki nosijo dva trifazna sistema, je treba predpostaviti, da deluje v odvisnosti od tipa stebra z ene strani zmanjšana horizontalna natezna sila enega vodnika oziroma zaščitne vrvi.</p> <p>Horizontalna natezna sila vrvi se enostransko zmanjša na naslednji način:</p> <p>pri enojnih vodnikih za 50%</p> <p>pri snopastih vodnikih za 25%</p> <p>pri zaščitnih vrveh za 50%</p>
K	<p>Stalne obtežbe in obtežbe žleda na vse vodnike pri -5°C.</p> <p>Horizontalno natezno silo za vse vodnike enostransko zmanjšamo:</p> <p>pri podpornih izolatorjih in izolatorskih verigah, dolgih do 2,5 m za 20%</p> <p>pri izolatorskih verigah, daljših od 2,5 m za 15%</p> <p>pri zaščitnih vrveh za 40%</p>

**Preglednica 10: Parcialni varnostni faktorji po SIST EN 50341-1**

Obtežni primeri	Parcialni varnostni faktorji	Vrsta vpliva
A - I	$\gamma_G = \gamma_W = \gamma_I = \gamma_C = 1,35$	Pri najneugodnejšem vplivu (vplivu, ki povečuje obtežbo)
A - F	$\gamma_G = \gamma_I = 1,0$	Pri ugodnejših (razbremenilnih) vplivih; nosilni stebri
J - K	$\gamma_G = \gamma_W = \gamma_I = \gamma_C = 1,0$	Izjemni obtežni primeri
I	$\gamma_p = 1,5$	Montažne obtežbe

Oznake v gornjih izrazih popisujejo delne varnostne faktorje za:

$\gamma_G$ ... za lastno težo,

$\gamma_W$ ... za obtežbe vetra,

$\gamma_I$ ... za obtežbe žleda,

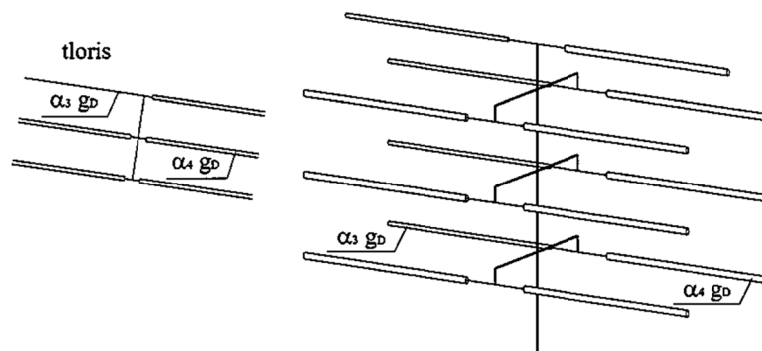
$\gamma_C$ ... za natezne sile v vodnikih in

$\gamma_p$ ... za montažne obtežbe.

Za primer kombinacije J je potrebno značilno obtežbo žleda na vodnikih v vseh obesiščih z ene strani stebra in v eni smeri daljnovoda pomnožiti s faktorjem zmanjšanja  $\alpha_3$ . Značilno obtežbo žleda na vseh drugih vodnikih pa je potrebno pomnožiti s faktorjem zmanjšanja  $\alpha_4$ , da se zagotovi največja torzijska obremenitev. Faktorji zmanjšanja so določeni v nacionalnih normativih (NNA):

$$\alpha_3 = 0,5 \text{ in}$$

$$\alpha_4 = 1,0$$

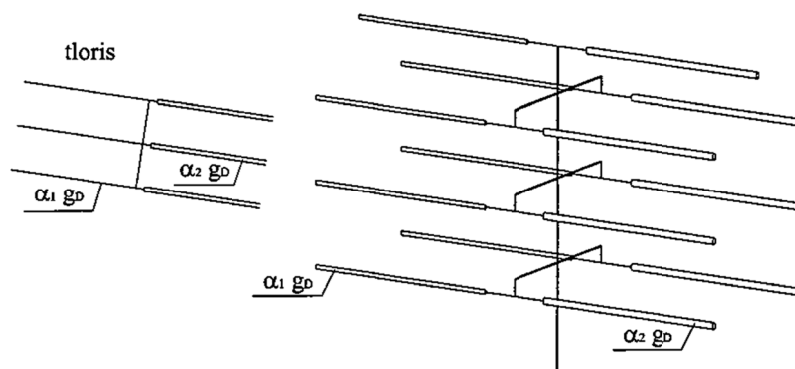


Slika 17: Obremenitev, ki povzroči torzijski zasuk stebra (vir: SIST EN 50341-1:2002)

Za kombinacijo K je potrebno značilno obtežbo žleda na vseh vodnikih v eni smeri daljnovoda pomnožiti s faktorjem zmanjšanja  $\alpha_1$ , na vseh vodnikih z druge smeri pa s faktorjem  $\alpha_2$ . Za določitev faktorjev je pomembna dolžina izolatorske verige, ki v naši konstrukciji znaša 1,25 m. V nacionalnih normativih so določeni naslednji faktorji:

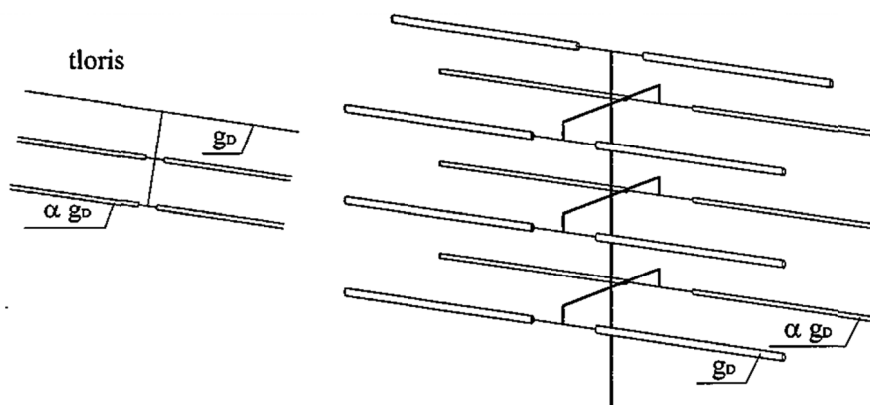
$\alpha_1=0,80$  (20% zmanjšanje za izolatorske verige krajše od 2,5 m)

$\alpha_2=1,0$ .



Slika 18: Obremenitev, ki povzroči upogib stebra vzdolž daljnovoda (vir: SIST EN 50341-1:2002)

Načeloma bi daljnovodni steber morali preveriti tudi na obtežno kombinacijo, ki povzroči upogib stebra prečno glede na smer daljnovoda. Taka kombinacija lahko nastopi pri pretrgu ene od več izolatorskih verig v izolatorskem sklopu. Vpliv tega obtežnega primera je merodajen le za konzolo in ni zajet v nacionalnih normativih.



Slika 19: Obremenitev, ki povzroči upogib stebra prečno glede na smer daljnovoda (vir: SIST EN 50341-1:2002)

V preglednici 11 ter preglednici 12 smo prikazali posamezne vplive za zaščitne vrvi ter vodnike pomnožene s parcialnimi varnostnimi faktorji. Enako obtežbo smo vnesli v program za analizo konstrukcij.



Preglednica 11: Obtežna tabela za vodnike, pomnožena s parcialnimi varnostnimi faktorji

Obtežna tabela: vodniki Al/Fe 240/40								
Obtežna komb.	Teža, napenjanje [kN]		Veter [kN]		Montaža [kN]	Vx [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]
	y	z	x	y	z			
A	0	3,35	6,21	0	0	6,21	0	3,35
B	0	3,35	0	0,53	0	0	0,53	3,35
C	0	3,35	4,39	0,37	0	4,39	0,37	3,35
D	0	13,76	2,72	0	0	2,72	0	13,76
E	0	13,76	0	0,24	0	0	0,24	13,76
F	0	13,76	1,97	0,56	0	1,97	0,56	13,76
I	0	3,35	0	0	1,50	0	0	4,85
J-levo	11,30	10,19	0	0	0	0	11,30	10,19
J-desno	0	10,19	0	0	0	0	0	10,19
K-levo	4,52	10,19	0	0	0	0	4,52	10,19
K-desno	0	10,19	0	0	0	0	0	10,19

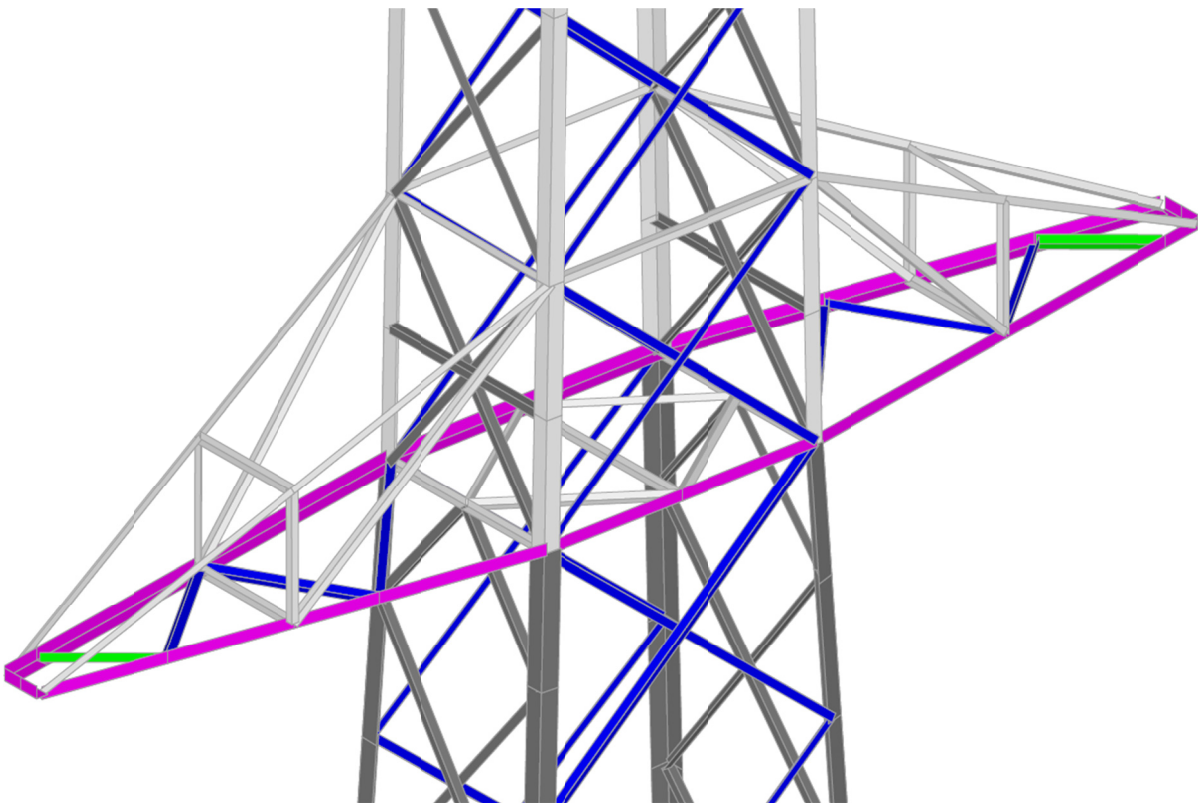
Preglednica 12: Obtežna tabela za zaščitno vrv, pomnožena s parcialnimi varnostnimi faktorji

Obtežna tabela: zaščitna vrv AlMg1/Fe 95/55								
Obtežna komb.	Teža, napenjanje [kN]		Veter [kN]		Montaža [kN]	Vx [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]
	y	z	x	y	z			
A	0	1,71	4,16	0	0	4,16	0	1,71
B	0	1,71	0	0	0	0	0	1,71
C	0	1,71	2,94	0	0	2,94	0	1,71
D	0	10,46	2,15	0	0	2,15	0	10,46
E	0	10,46	0	0	0	0	0	10,46
F	0	10,46	1,52	0	0	1,52	0	10,46
I	0	1,71	0	0	1,50	4,16	0	3,21
J	0	7,75	0	0	0	0	0	7,75
K	9,17	7,75	0	0	0	0	9,17	7,75

## 5 IZRAČUN NOTRANJIH SIL IN DIMENZIONIRANJE

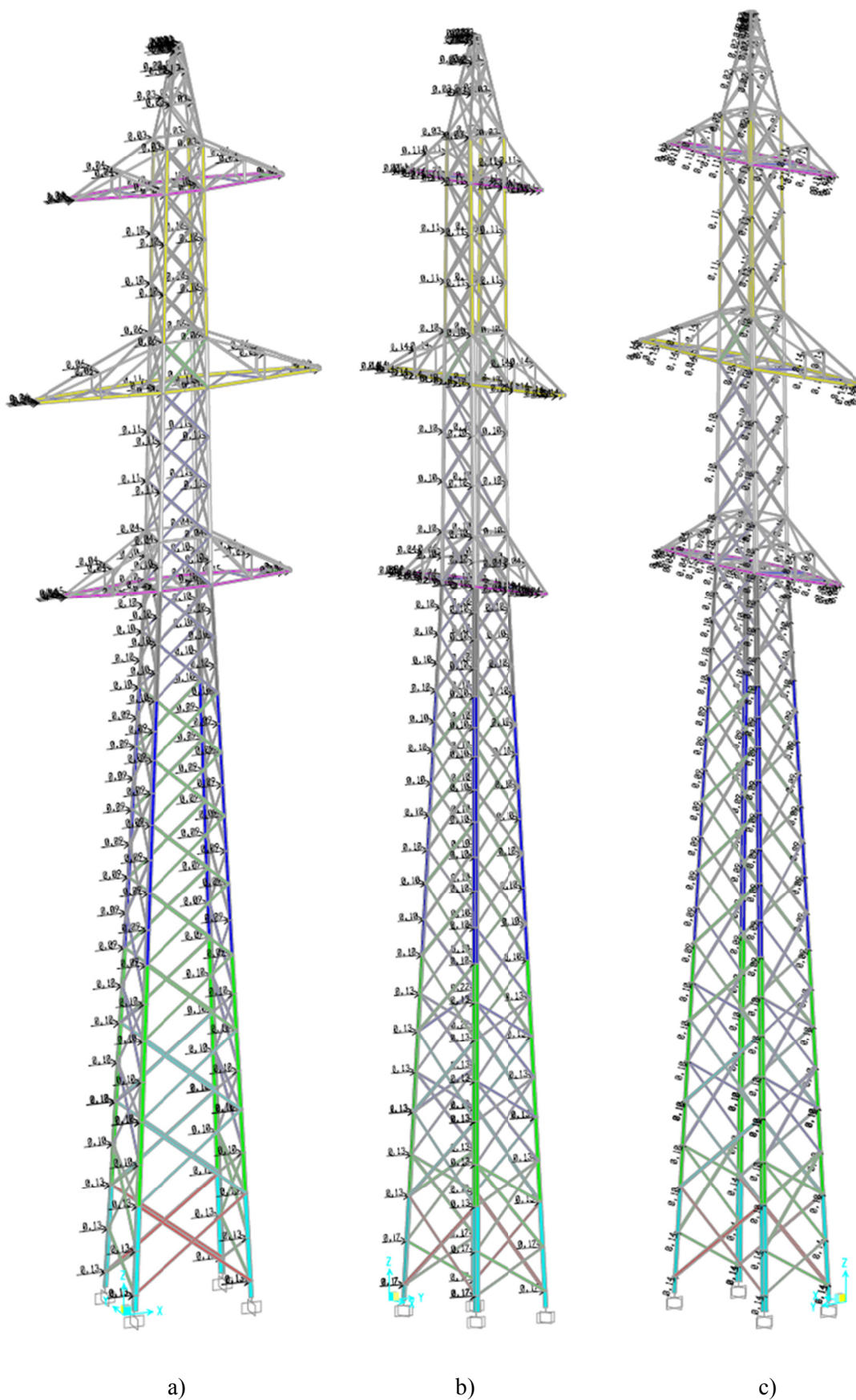
### 5.1 Opis numeričnega modela

Numerični model za konstrukcijo je bil narejen s programom SAP2000 14.2.4 (CSI, 2010). S programom AutoCAD 2011 smo izdelali 3D model konstrukcije ter ga uvozili v program za analizo SAP2000, ki je avtomatično generiral elemente. Ker gre za prostorsko palično konstrukcijo, je bilo potrebno spremeniti načine stikovanja elementov. Predpostavili smo členkasto pritrjevanje za vse diagonalne elemente ter elemente konzol, ki se pritrjujejo na osnovno konstrukcijo stebra. Med vogalnimi elementi je bila ohranjena toga povezava. Steber je togo podprt v temeljna tla. Globalna analiza stebra je bila izvedena po teoriji prvega reda brez upoštevanja globalnih in lokalnih nepopolnosti.



Slika 20: Spodnja konzola v programu SAP2000 v.14.2.4. Različni profili so označeni z barvami.

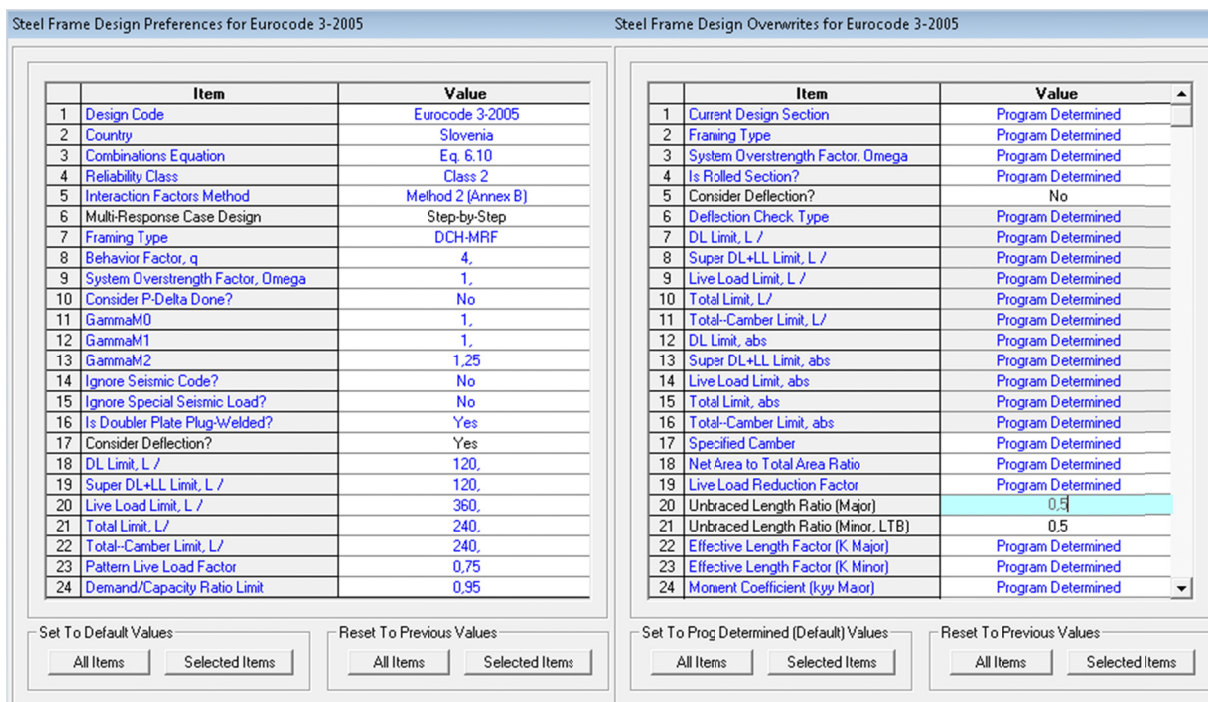
Vso obtežbo, razen lastne teže, ki jo program upošteva avtomatsko, smo podajali kot točkovne sile v vozliščih konstrukcije. V modelu je bila upoštevana predpostavka, da sile, ki so posledica obtežbe vodnikov, delujejo v obesiščih na konzoli, čeprav se obtežba v realnosti prenaša preko izolatorskih verig, na katerih so pritrjeni vodniki. Sile zaradi vetra na konstrukcijo stebra, ki smo jih izračunali glede na posamezne odseke, smo razdelili enakomerno glede na število vozlišč v posameznem odseku in jih podali točkovno na vsa vozlišča v tem odseku. Računski model v programu SAP 2000 in podajanje sil sta prikazana na sliki 21.



Slika 21: Računski model in obtežba vetra v a) x-smeri, b) y-smeri in c) pod kotom 45°. Točkovne sile znašajo od 0.02 do 2 kN.

## 5.2 Parametri za dimenzioniranje jeklenih konstrukcij v programu SAP 2000

Nosilnost elementov smo preverili s programom, saj le-ta omogoča dimenzioniranje po standardu SIST EN 1993-1-1:2005. Pred samim začetkom dimenzioniranja je potrebno najprej preveriti in popraviti osnovne nastavitve, ki jih program privzame za vse elemente konstrukcije pod točko »Design Preferences«. Nastavitve veljajo za celotno konstrukcijo, lahko pa se spreminjajo lastnosti posameznih elementov, in sicer tako, da element, ki mu želimo pripisati drugačne parametre, označimo ter nato pod točko »Design Overwrites« popravimo želene vrednosti (Wallner, 2012).



a)

b)

Slika 22: Parametri dimenzioniranja jeklenih konstrukcij v programu SAP2000 v.14.2.4 a) na nivoju konstrukcije in b) na nivoju elementa.

Za nastavitve dimenzioniranja na nivoju konstrukcije so najpomembnejši parametri z vrha razpredelnice na sliki 22 a. Izberemo lahko standard, po katerem dimenzioniramo konstrukcijo, in državo, s katero definiramo nacionalni dodatek, ki pripada izbranemu standardu. Ostalih nastavitvev za naš primer ni bilo potrebno spreminjati.

Na sliki 22 b so prikazane lastnosti, ki jih lahko določimo posameznim elementom. Za večino lastnosti smo uporabili privzete vrednosti, spremeniti pa je bilo potrebno uklonske dolžine:

- razmerje med dolžino elementa in razdaljo med podporami za primer uklona okoli močne osi (Unbraced Length Ratio Major) in
- razmerje med dolžino elementa in razdaljo med podporami za primer uklona okoli šibke osi (Unbraced Length Ratio Minor).

## 5.2.1 Uklonska dolžina elementov

Za določitev pravih uklonskih dolžin elementov uporabimo določila standarda SIST EN 50341-1. Ker je bila globalna analiza izvedena brez upoštevanja globalnih in lokalnih nepopolnosti, moramo upoštevati dejanske uklonske dolžine elementov.

### 5.2.1.1 Vogalniki in prečke

V splošnem je potrebno obravnavati različne uklonske dolžine glede na obliko paličja, kar prikazuje slika 23. Privzeti je treba naslednje vitkosti:

za vogalnike s simetričnim podpiranjem (a) (b)

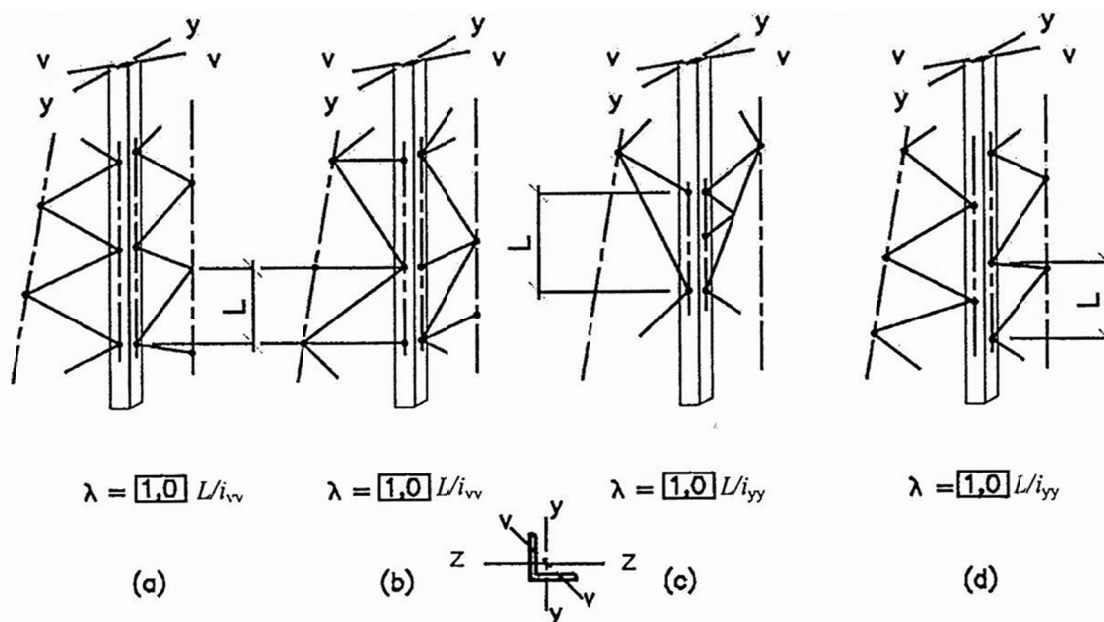
$$\lambda = 1,0 \cdot \frac{L}{i_{vv}}$$

za vogalnike z vmesnimi prečnimi podporami (c)

$$\lambda = 1,0 \cdot \frac{L}{i_{yy}}$$

za vogalnike z izmenično zamaknjnim podpiranjem (d)

$$\lambda = 1,0 \cdot \frac{L}{i_{yy}}$$

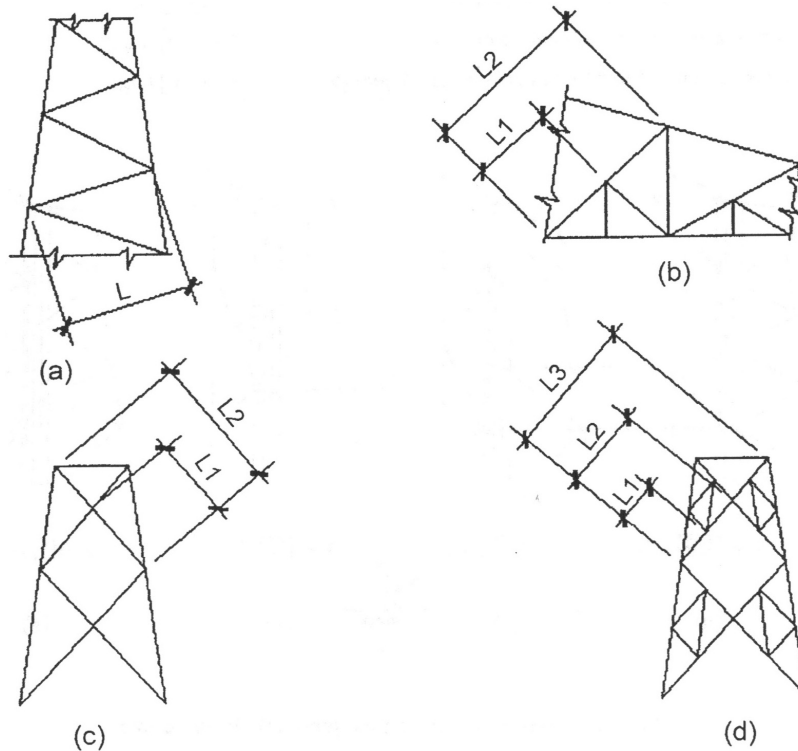


Slika 23: Uklonske dolžine za vogalnike simetričnega in zamaknjnega paličja (vir: SIST EN 50341-1:2002)

V naši konstrukciji moramo v delu med temelji in spodnjo konzolo upoštevati izmenično zamaknjeno podpiranje, v delih konstrukcije višje od spodnje konzole pa moramo upoštevati simetrično podpiranje. To pomeni, da moramo v programu za vogalnike v spodnjem delu konstrukcije nastaviti uklonske dolžine, kot je prikazano na primeru d, ter upoštevati uklon okoli y-osi. Za vogalnike nad spodnjo konzolo pa upoštevamo uklonske dolžine kot na sliki a in uklon okoli glavne šibke osi v. Pri spodnjih pasovih konzol se za prečke uporabi analogen pristop.

### 5.2.1.2 Križne diagonale

Ob predpostavki, da sta obe palici neprekinjeni in med seboj povezani z vsaj enim vijakom, se lahko njuno sečišče obravnava kot fiksna točka v ravnini diagonal. Uklonska dolžina diagonal v ravnini je zato  $1,0 \cdot L_1$  in vitkost  $\lambda_1 = 1,0 \cdot \frac{L_1}{i_{vv}}$ . Uklonsko dolžino  $L_1$  za primer našega stebra prikazuje slika 18 c.



Slika 24: Značilne oblike palicij in oznake dolžin križnih diagonal (vir: SIST EN 50341-1:2002)

Podpiranje prečno na ravnino diagonal je odvisno od razmerja  $|S_d|/|N_d|$ ,

kjer sta:

$S_d$ ... sila v podporni palici (nateg ali tlak) in

$N_d$ ... sila v tlačni palici.

Dodatno je treba upoštevati vitkost  $\lambda_2$ :

$$S_d = \text{natezna sila in } \frac{|S_d|}{|N_d|} \geq \frac{2}{3} \quad \lambda_2 = \lambda_1 = 1,0 \cdot \frac{L_1}{i_{vv}} \text{ (polna vpetost)}$$

$$S_d = \text{natezna sila in } \frac{|S_d|}{|N_d|} < \frac{2}{3} \quad \lambda_2 = 1,0 \cdot \frac{L_1}{i_{yy}} \sqrt{2 - 1,5 |S_d|/|N_d|}$$

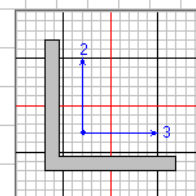
$$S_d = \text{tlačna sila in } |S_d| < |N_d| \quad \lambda_2 = 1,0 \cdot \frac{L_1}{i_{yy}} \sqrt{2 + 2 |S_d|/|N_d|}, \text{ z } \lambda_2 \leq \frac{L_2}{i_{yy}}$$

Pri pregledu osnih sil v križnih diagonalah modela stebra je bilo ugotovljeno, da se vedno pojavijo natezne sile v podporni palici. Vrednost natezne sile pa se skoraj ujema s silo v tlačni palici, zato smo pri določevanju uklonskih dolžin spajanih diagonal predpostavili, da natezna diagonala omogoča zadostno podporo tlačni diagonali (polna vpetost). Kot sistemska dolžina je bila zato vzeta dolžina  $L_1$  tako okoli šibke kot okoli močne osi profila.

### 5.3 Postopek računa nosilnosti elementov

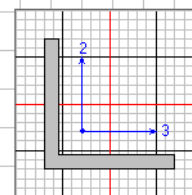
Podroben postopek računa nosilnosti elementov s programom SAP 2000 je prikazan v priročniku Eurocode 3-1:2005 with Eurocode 8:2004 Steel Frame Design Manual for SAP2000 (CSI, 2010). V diplomski nalogi smo prikazali podrobnosti računa samo za en element. Program naredi enake kontrole za vse elemente v konstrukciji.

Eurocode 3-2005 STEEL SECTION CHECK (Flexural Details for Combo and Station)						
Units : KN, cm, C						
Frame : 812	X Mid: 193,453	Combo: K0MB.J	Design Type: Brace			
Length: 271,048	Y Mid: 55,276	Shape: L45X5	Frame Type: DCH-MRF			
Loc : 135,524	Z Mid: 1125,000	Class: Class 3	Rolled : Yes			
Country=Slovenia	Combination=Eq. 6.10	Reliability=Class 2				
Interaction=Method 2 (Annex B)	MultiResponse=Envelopes	P-Delta Done? No				
GammaM0=1,00	GammaM1=1,00	GammaM2=1,25				
An/Ag=1,00	RLLF=1,000	PLLF=0,750	D/C Lin=0,950			
A=4,303	Iyy=7,840	iy=1,350	W <sub>e1,yy</sub> =2,434	Av,z=2,250		
It=0,354	Izz=7,840	izz=1,350	W <sub>e1,zz</sub> =2,434	Av,y=2,250		
Iw=0,000	Iyz=-4,764	h=4,500	W <sub>p1,yy</sub> =4,559			
E=21000,000	Fy=23,500	Fu=36,000	W <sub>p1,zz</sub> =4,559			
Rot= 45 deg	I <sub>max</sub> =12,604	I <sub>min</sub> =3,076	i <sub>max</sub> =1,711	i <sub>min</sub> =0,846		
<b>STRESS CHECK FORCES &amp; MOMENTS</b>						
Location	Ned	Med,yy	Med,zz	Ued,z	Ued,y	Ted
135,524	-23,955	0,000	-2,905	0,000	0,000	0,007
<b>PMH DEMAND/CAPACITY RATIO</b>						
Governing Equation (6.62)	Total Ratio	N Ratio	MMajor Ratio	MMinor Ratio	Ratio Limit	Status Check
	0,935	= 0,858	+ 0,000	+ 0,077	0,950	OK
<b>BASIC FACTORS</b>						
Buckling Mode	K Factor	L Factor	KL/r			
Major (y-y)	1,000	0,500	100,402			
Minor (z-z)	1,000	0,500	160,280			
<b>AXIAL FORCE DESIGN</b>						
	Ned Force	Nc,Rd Capacity	Nt,Rd Capacity	Nbyy,Rd Major	Nbzz,Rd Minor	
Axial	-23,955	101,120	101,120	56,011	27,930	
	Np1,Rd	Nu,Rd	Ncr,T	An/Ag		
	101,120	111,534	785,091	1,000		
Major (y-y)	Curve b	Alpha	Ncr	LambdaBar	Phi	Chi
Minor (z-z)	b	0,340	88,472	1,069	1,219	0,554
		0,340	34,716	1,707	2,213	0,276
						Nb,Rd
						56,011
<b>MOMENT DESIGN</b>						
	Med Moment	Mc,Rd Capacity	Mu,Rd Capacity	Mb,Rd Capacity		
Major (y-y)	0,000	57,200	57,200	51,250		
Minor (z-z)	-2,905	57,200	57,200			
Compactness	Section Class 3	Flange Class 3	Web Class 3	Epsilon	Alpha	Psi
				1,000	0,727	-0,526
LTB	Curve d	AlphaLT	LambdaBarLT	PhiLT	ChiLT	C1
		0,760	0,337	0,609	0,896	1,000
						Mcr
						503,094
Factors	Cmy	Cmz	CmLT	kyy	kyz	kzy
	1,000	1,000	1,000	1,257	1,515	0,943
						kzz
						1,515



Slika 25: Podrobnosti računa projektne uklonske nosilnosti elementov v programu SAP 2000

Steel Stress Check Data Eurocode 3-2005							
File							
Eurocode 3-2005 STEEL SECTION CHECK (Summary for Combo and Station)							
Units : kN, cm, C							
Frame : 812	X Mid: 193,453	Combo: KOMB.J	Design Type: Brace				
Length: 271,048	Y Mid: 55,276	Shape: L45X5	Frame Type: DCH-MRF				
Loc : 135,524	Z Mid: 1125,000	Class: Class 3	Rolled : Yes				
Country=Slovenia		Combination=Eq. 6.10		Reliability=Class 2			
Interaction=Method 2 (Annex B)		MultiResponse=Envelopes		P-Delta Done? No			
GammaM0=1,00	GammaM1=1,00	GammaM2=1,25	D/C Lim=0,950				
An/Ag=1,00	RLLF=1,000	PLLF=0,750					
A=4,303	Iyy=7,840	iy=1,350	We1,yy=2,434	Av,z=2,250			
It=0,354	Izz=7,840	izz=1,350	We1,zz=2,434	Av,y=2,250			
Iw=0,000	Iyz=-4,764	h=4,500	Wp1,yy=4,559				
E=21000,000	fyt=23,500	Fu=36,000	Wp1,zz=4,559				
Rot= 45 deg	Imax=12,604	Imin=3,076	imax=1,711	imin=0,846			
STRESS CHECK FORCES & MOMENTS							
Location	Ned	Med,yy	Med,zz	Ued,z	Ued,y	Ted	
135,524	-23,955	0,000	-2,905	0,000	0,000	0,007	
PHM DEMAND/CAPACITY RATIO							
Governing Equation (6.62)	Total Ratio	N Ratio	MMajor Ratio	MMinor Ratio	Ratio Limit	Status Check	
	0,935	= 0,858	+ 0,000	+ 0,077	0,950	OK	
AXIAL FORCE DESIGN							
	Ned Force	Nc,Rd Capacity	Nt,Rd Capacity	Nbyy,Rd Major	Nbzz,Rd Minor		
Axial	-23,955	101,120	101,120	56,011	27,930		
	Np1,Rd	Nu,Rd	Ncr,T	An/Ag			
	101,120	111,534	785,091	1,000			
	Curve	Alpha	Ncr	LambdaBar	Phi	Chi	Nb,Rd
Major (y-y)	b	0,340	88,472	1,069	1,219	0,554	56,011
Minor (z-z)	b	0,340	34,716	1,707	2,213	0,276	27,930
MOMENT DESIGN							
	Med Moment	Mc,Rd Capacity	Mu,Rd Capacity	Mb,Rd Capacity			
Major (y-y)	0,000	57,200	57,200	51,250			
Minor (z-z)	-2,905	57,200	57,200				
	Curve	AlphaLT	LambdaBarLT	PhiLT	ChiLT	C1	Mcr
LTB	d	0,760	0,337	0,609	0,896	1,000	503,094
	Factors	kyy	kyy	kzy	kzz		
		1,257	1,515	0,943	1,515		
SHEAR DESIGN							
	Ued Force	Uc,Rd Capacity	Stress Ratio	Status Check	Ted Torsion		
Major (z)	0,000	30,527	0,000	OK	0,007		
Minor (y)	0,000	30,527	0,000	OK	0,007		
	Upl,Rd	Eta	LambdaW				
Reduction	30,527	1,200	0,000				



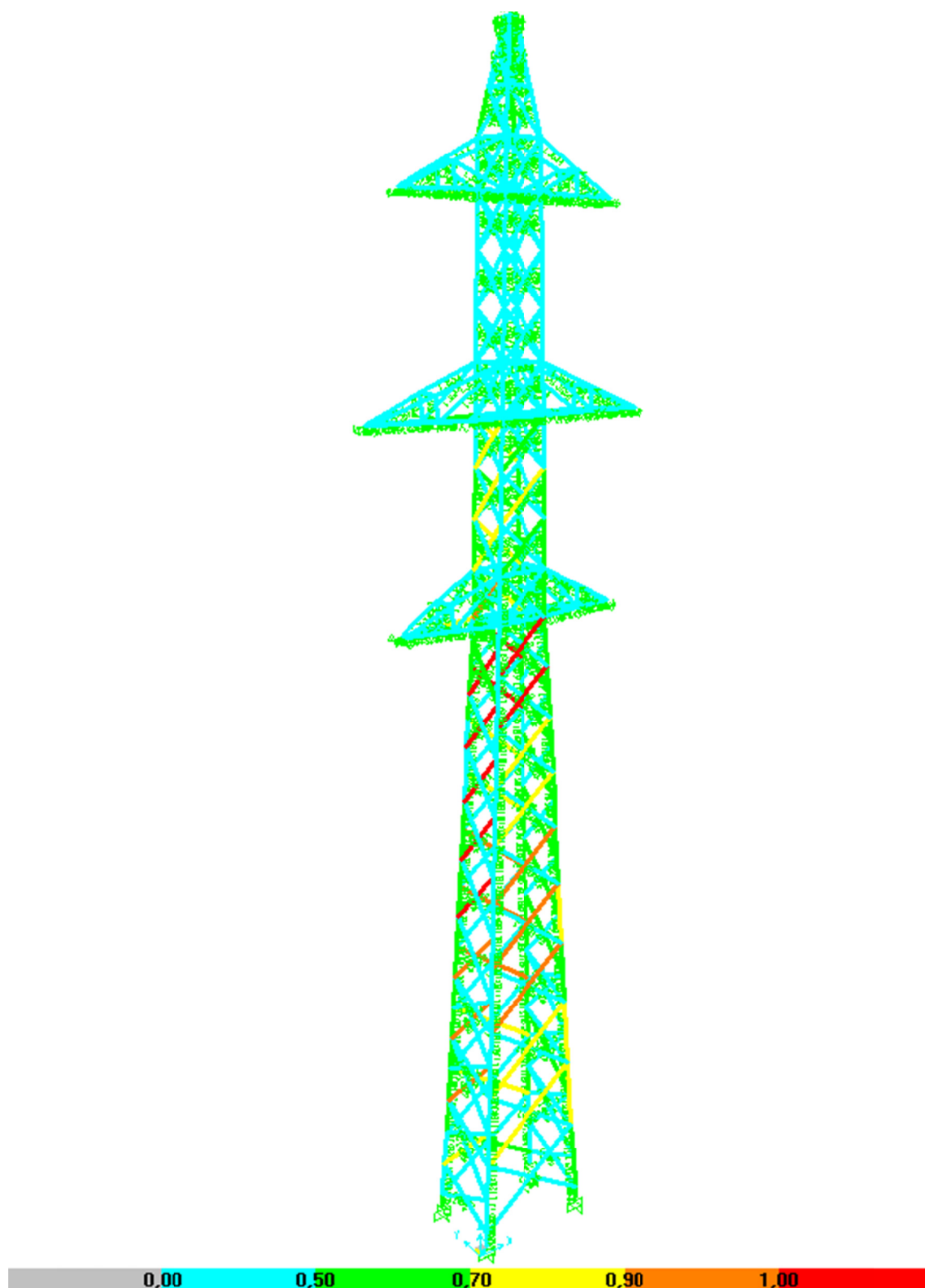
Slika 26: Interakcijska enačba med uklonom okoli močne osi in upogibnimi momenti

Na sliki 25 je bolj podrobno opisana določitev uklonske krivulje in uklonske nosilnosti za element DI\_C17 (oznake elementov so prikazane v prilogi A), na sliki 26 pa je prikazana interakcijska enačba moment – osna sila za določitev nosilnosti. Ker je bila konstrukcija modelirana kot paličje, so prikazani momenti posledica lastne teže elementov. Projektne vrednosti upogibnih momentov so zelo majhne, zato lahko prispevek momentov zanemarimo. Program kljub temu računa odpornost elementov na bočno zvrnitev, vendar ta kontrola v našem primeru ni merodajna. V nadaljevanju je izpisana samo izkoriščenost nosilnosti za osno silo. Kontrola izračuna uklonske nosilnosti s programom za element DI\_C17 je prikazana v poglavju 6.3.1.



## 5.4 Rezultati dimenzioniranja za elemente

Za ovojnico kombinacij od A do J program izriše za vsak element izkoriščenost nosilnosti. Tako so jasno vidni kotniki s prekoračeno nosilnostjo, ki so na sliki 27 prikazani z rdečo barvo, in bi jih bilo potrebno zamenjati.



Slika 27: Izkoriščenost profilov

### 5.4.1 Dimenzioniranje vogalnikov in prečk

Kot je vidno na sliki 27 vsi elementi razen nekaterih diagonal ustrezajo kontrolam nosilnosti. Tabelarično so prikazane le kontrole za najbolj izkoriščene kotnike. Oznake elementov so prikazane v prilogi A. Vrednosti, ki jih izračuna program so sledeče (glej poglavje 6.3.1):

$N_{ed}$  ... projektna osna sila,

$N_{b,Rd}$  ... projektna uklonska nosilnost in

$N_{pl,Rd}$  ... projektna nosilnost bruto prereza v nategu.

**Preglednica 13: Izkoriščenost nosilnosti za najbolj obremenjene vogalnike**

Element	Profil	L [cm]	Kritična komb.	$N_{ed}$ [kN]	$N_{b,Rd}$ [kN]	$N_{pl,Rd}$ [kN]	v-izkoriščenost [%]
Vog22	L120X11	219,9	KOMB.C	-328,1	486,7	596,2	67,4
Vog21	L110X10	210,4	KOMB.C	-314,1	397,9	497,0	78,9
Vog20	L100X10	180,3	KOMB.C	-268,8	370,8	450,0	72,5
Vog14	L90X9	140,2	KOMB.C	-198,8	315,4	364,7	63,0
Vog11	L80X8	124,9	KOMB.C	-122,5	196,0	288,3	62,5
Vog7	L70X7	125,1	KOMB.K	-52,2	132,0	220,9	39,6

Največje obremenitve na vogalnike se za skoraj vse elemente pojavijo pri kombinaciji C, t.j. kombinacija pri +5°C z vetrom pod kotom 45° glede na x-os. Tega obtežnega primera v prejšnjem pravilniku ni bilo potrebno upoštevati. Konstrukcija je sestavljena tako, da so največji kotniki uporabljeni za vogalnike na dnu, ki jih potem zmanjšujemo proti vrhu. To je zaradi zmanjševanja osnih sil proti vrhu, ki se pojavijo zaradi vplivov v kombinaciji C. S tem dobimo podobno izkoriščenost vogalnikov po višini konstrukcije. Konstrukcijo bi lahko še bolj optimizirali kot je sedaj tako, da bi izbrali še manjše kotnike. Res pa je, da razen v kotnikih L70X7, ki so zadnji po višini pred konico, dobimo dobre izkoriščenosti elementov, ki znašajo od 60 do 80%.

**Preglednica 14: Izkoriščenost nosilnosti za najbolj obremenjene prečke**

Element	Profil	L [cm]	Kritična komb.	$N_{ed}$ [kN]	$N_{b,Rd}$ [kN]	$N_{pl,Rd}$ [kN]	v-izkoriščenost [%]
K3_PH_2	L35X4	100,0	KOMB.J	-19,0	45,3	62,7	42,0
K2_DS_4	L40X5	95,7	KOMB.J	-11,4	35,9	89,1	31,6
K3_DS_4	L45X5	51,9	KOMB.J	10,0	81,8	101,1	9,9
K1_BS_1	L60X6	120,5	KOMB.J	-35,8	84,4	162,4	42,4
K2_BS_1	L70X7	165,0	KOMB.J	-48,5	92,4	220,9	52,5

Kotnik K3\_PH\_2 v preglednici 14 je horizontalni element v konstrukciji stebra, ostali zapisani elementi pa so na konzoli daljnovodnega stebra (glej prilogo A). Pri vseh elementih pride do največje obremenitve pri kombinaciji J, kar je tudi smiselno, saj je to kombinacija z neenakomernim žledom. Pri tej kombinaciji dobimo največje horizontalne sile na konzolo in zato večje osne sile v prečkah. Izkoriščenosti prečk so manjše kot pri vogalnikih. To je nekako smiselno, saj so v taki palični konstrukciji primarno nosilni vogalniki ter diagonale.

#### 5.4.2 Dimenzioniranje križnih diagonal

**Preglednica 15: Križne diagonale s prekoračeno nosilnostjo**

Element	Profil	L [cm]	Kritična komb.	$N_{ed}$ [kN]	$N_{b,Rd}$ [kN]	$N_{pl,Rd}$ [kN]	v-izkoriščenost [%]
DI_C13	L40X5	199,4	KOMB.J	-35,2	33,8	89,1	104,1
DI_C14	L40X5	216,1	KOMB.J	-33,5	29,7	89,1	112,7
DI_B14	L40X4	175,3	KOMB.J	-37,8	33,0	72,4	114,3
DI_B15	L40X4	186,1	KOMB.J	-34,0	30,3	72,4	112,1
DI_B16	L40X4	199,5	KOMB.J	-32,0	27,3	72,4	117,4
DI_B17	L40X4	213,3	KOMB.J	-28,8	24,5	72,4	117,2

Diagonale v preglednici 15 (oznake elementov so prikazane v prilogi A) imajo vse prekoračeno nosilnost pri kombinaciji J z neenakomernim žledom. Pri vseh diagonalah je kritična nosilnost na uklon. Neustrezne diagonale bi bilo potrebno zamenjati z močnejšimi kotniki. Zamenjati moramo seveda tako tlačno kot pripadajočo natezno diagonalo.

**Preglednica 16: Izkoriščenost nosilnosti za predhodno neustrezne diagonale z zamenjanimi kotniki**

Element	Profil	L [cm]	Kritična komb.	$N_{ed}$ [kN]	$N_{b,Rd}$ [kN]	$N_{pl,Rd}$ [kN]	v-izkoriščenost [%]
DI_C13	L45X5	199,4	KOMB.J	-35,0	45,4	101,1	77,1
DI_C14	L45X5	216,1	KOMB.J	-33,4	40,3	101,1	82,9
DI_B14	L40X5	175,3	KOMB.J	-37,9	40,8	89,1	92,8
DI_B15	L40X5	186,1	KOMB.J	-34,2	37,5	89,1	91,3
DI_B16	L40X5	199,5	KOMB.J	-31,8	33,7	89,1	94,2
DI_B17	L40X5	213,3	KOMB.J	-29,3	30,3	89,1	96,7

Po zamenjavi neustreznih diagonal z močnejšimi kotniki vidimo, da nosilnost sedaj ustreza, prav tako pa dobimo dobre izkoriščenosti elementov.

**Preglednica 17: Izkoriščenost nosilnosti za najbolj obremenjene križne diagonale po zamenjavi kotnikov**

Element	Profil	L [cm]	Kritična komb.	$N_{ed}$ [kN]	$N_{b,Rd}$ [kN]	$N_{pl,Rd}$ [kN]	v-izkoriščenost [%]
K2_D_3	L35X4	176,3	KOMB.E	21,3	24,5	62,8	34,0
DI_B12	L40X4	160,1	KOMB.J	-33,8	37,3	72,4	90,4
DI_B18	L40X5	242,1	KOMB.J	-24,5	24,6	89,1	99,7
DI_C19	L45X5	311,7	KOMB.J	-21,4	21,9	101,1	97,7
DI_C21	L50X5	356,0	KOMB.J	-18,4	23,6	112,8	78,2
DI_C22	L55X6	378,7	KOMB.J	-18,2	32,7	148,3	55,7

Diagonala K2\_D\_3 je element na konzoli (glej prilogo A) in ima največjo izkoriščenost v nategu, medtem ko so preostale diagonale elementi v čelni oz. bočni steni stebra in imajo največjo izkoriščenost nosilnosti v tlaku pri kombinaciji J z neenakomernim žledom. Tak rezultat je pričakovan, saj obtežba z neenakomernim žledom pomeni torzijski zasuk stebra in s tem največje osne sile na diagonale stebra.

### 5.5 Primer dimenzioniranja spojev

Program omogoča kontrole nosilnosti samo na nivoju elementov, zato moramo posebej narediti še kontrole nosilnosti za spoje. V sklopu diplomske naloge so bili preverjeni samo členkasti spoji med diagonalami in vogalniki. Račun za členkaste spoje je najbolj enostaven, ker so diagonale stikovane na vogalnike samo z enim vijakom. Nosilnost je bila preverjena samo za najbolj obremenjene spoje iste vrste, saj je s tem nosilnost zadostna tudi za ostale spoje z manjšo obremenitvijo.

### 5.5.1 Računska nosilnost vijakov pri pritrjevanju kotnikov

Formule za izračun strižne nosilnosti vijakov in nosilnosti vijaka na bočni pritisk so podane v SIST EN 50341-1.

#### 5.5.1.1 Strižna nosilnost strižne ploskve

1. Če strižna ploskev poteka skozi vrat

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}}$$

kjer so:

A... bruto prerez stebila vijaka,

$f_{ub}$ ... projektna vrednost natezne trdnosti vijaka in

$\gamma_{M2}$ ... delni faktor odpornosti za nosilnost vijakov v nategu in prestrigu ter za nosilnost na bočni pritisk;  $\gamma_{M2}=1,25$ .

2. Če strižna ploskev poteka skozi del vijaka z navojem

- duktilni vijaki 4.6, 5.6, 8.8

- neduktilni vijaki 4.8, 5.8, 6.8, 10.9

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{v,Rd} = \frac{0,5 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$$

kjer je:

$A_s$ ... računski prerez skozi del stebila vijaka z navojem.

#### 5.5.1.2 Nosilnost na bočni pritisk

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$$

kjer so:

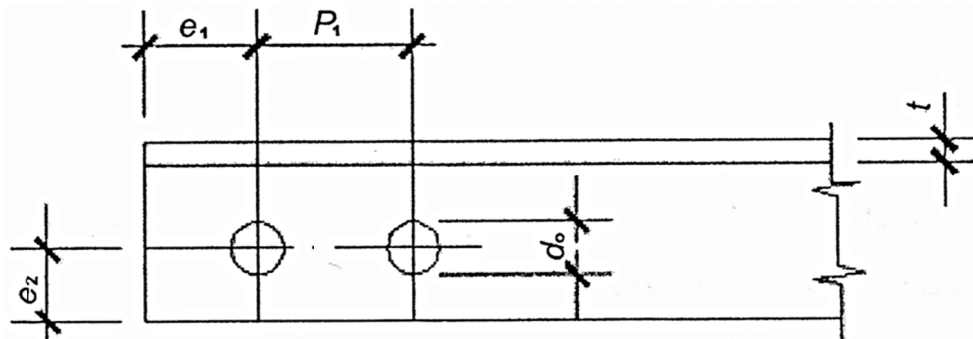
$$\alpha_b = \min\left(\frac{e_1}{3d_0}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0\right),$$

$$t = \min(2t_1; t_2),$$

d... premer vijaka,

$d_0$ ... premer luknje in

$$k_1 = \min \left( 2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7 \leq 2,5; 1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7 \leq 2,5 \right).$$



Slika 28: Lega vijakov v kotniku z enim priključenim krakom (vir: SIST EN 50341-1:2002)

### 5.5.2 Kontrola členkastih spojev med diagonalami in vogalniki

Prav vse diagonale v konstrukciji so na vogalnike priključene z vijaki M12 trdnostnega razreda 5.6.

Preglednica 18: Značilnosti vijaka M12 5.6 in razpored lukenj za vijake

M12	$f_{yb}$ [ $\frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$ ]	$f_{ub}$ [ $\frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$ ]	d[cm]	$d_0$ [cm]	A[cm <sup>2</sup> ]	$A_s$ [cm <sup>2</sup> ]	$e_1$ [cm]	$e_2$ [cm]	$p_1$ [cm]	$p_2$ [cm]
5.6	30	50	1,2	1,3	1,13	0,843	2,6	1,95	3,9	3,9

Preglednica 19: Strižna nosilnost vijakov M12 5.6 in nosilnost vijakov na bočni pritisk

Oznaka diagonale	Vrsta kotnika	t[cm]	$N_{Ed}$ [kN]	$F_{v,Rd}$ [kN]	$F_{b,Rd}$ [kN]	izkorišč. $F_{v,Rd}$ [%]	izkorišč. $F_{b,Rd}$ [%]
DI_B13	L40X4	0,4	38,8	27,1	79,5	134,1	48,8
DI_B14	L40X5	0,5	37,9	27,1	99,4	139,8	38,1
DI_C13	L45X5	0,5	39,0	27,1	99,4	143,9	39,2
DI_C20	L50X5	0,5	20,0	27,1	99,4	73,8	20,1
DI_C22	L55X6	0,6	18,2	27,1	119,2	66,8	15,2

V preglednici 19 so prikazane najbolj obremenjene diagonale za isto vrsto kotnika. Nosilnost vijakov na bočni pritisk je zadostna za vse vrste kotnikov diagonal, medtem ko je skoraj v vseh primerih prekoračena strižna nosilnost vijakov. Upoštevali smo, da strižna ravnina poteka v stebelu vijaka. Strižna nosilnost je zadostna le pri kotnikih L50x5 in L55x6, saj se tam pojavijo razmeroma majhne

osne sile. Pri vseh ostalih kotnikih je strižna nosilnost vijaka močno prekoračena. Vijake bi bilo potrebno zamenjati z vijaki močnejšega trdnostnega razreda ali z vijaki z večjim premerom.

**Preglednica 20: Značilnosti vijaka M12 8.8 in razpored lukenj za vijake**

<b>M12 8.8</b>	$f_{yb} [\frac{kN}{cm^2}]$	$f_{ub} [\frac{kN}{cm^2}]$	d[cm]	d <sub>0</sub> [cm]	A[cm <sup>2</sup> ]	A <sub>s</sub> [cm <sup>2</sup> ]	e <sub>1</sub> [cm]	e <sub>2</sub> [cm]	p <sub>1</sub> [cm]	p <sub>2</sub> [cm]
	64	80	1,2	1,3	1,13	0,843	2,6	1,95	3,9	3,9

**Preglednica 21: Strižna nosilnost vijakov M12 8.8 in nosilnost vijakov na bočni pritisk**

<b>Oznaka diagonale</b>	<b>Vrsta kotnika</b>	<b>t[cm]</b>	<b>N<sub>Ed</sub>[kN]</b>	<b>F<sub>v,Rd</sub> [kN]</b>	<b>F<sub>b,Rd</sub> [kN]</b>	<b>izkorišč. F<sub>v,Rd</sub> [%]</b>	<b>izkorišč. F<sub>b,Rd</sub> [%]</b>
DI_B13	L40X4	0,4	38,8	43,4	79,5	89,6	48,8
DI_B14	L40X5	0,5	37,9	43,4	99,4	87,5	38,1
DI_C13	L45X5	0,5	39,0	43,4	99,4	90,0	39,2
DI_C20	L50X5	0,5	20,0	43,4	99,4	46,2	20,1
DI_C22	L55X6	0,6	18,1	43,4	119,2	41,8	15,2

V preglednici 21 je prikazana nosilnost pri zamenjavi vijakov iz trdnostnega razreda 5.6 v 8.8. S tem je zadoščeno nosilnosti na strig v vseh primerih. Povečanje premera vijakov ne bi bil primeren ukrep za vse kotnike, saj so dovoljene robne oddaljenosti e<sub>2</sub> pri manjših kotnikih presežene. Odločitev o izbiri vijakov pa je v praksi dostikrat pogojena tudi s tem, kateri vijaki so bolj dostopni na trgu in s tem cenejši. Pomembno je, da pri projektiranju poenotimo čim več spojev, ker se s tem tudi izognemo napakam pri montaži konstrukcij.

## 6 MODELIRANJE NEELASTIČNEGA ODZIVA

Z linearno-elastično analizo v prvem delu smo določili notranje sile v konstrukciji na podlagi katerih smo dimenzionirali elemente in spoje. Izkazalo se je, da sta za obravnavani steber najbolj kritični kombinaciji z neenakomernim žledom. Prav zaradi tega v nadaljevanju izvedemo nelinearno statično oz. potisno analizo za kombinacije z žledom iz pravilnika SIST EN 50341-1. Na ta način dodatno preučimo odpornost stebra za najbolj kritične kombinacije.

### 6.1 Modeliranje konstrukcije

Model konstrukcije je enak kot pri elastični analizi, le da so pri nelinearni statični analizi upoštevani še plastični členki (nelinearnost materiala). Analiza je bila izvedena s pomočjo programske opreme SAP 2000. Program ima že izdelano programsko kodo za izvajanje nelinearne statične (potisne) analize, potrebno je le še podati parametre za analizo – material, plastične členke, »obtežbo za potisno analizo« in parametre, s katerimi vplivamo na numeričen račun.

### 6.2 Material

Za material smo izbrali konstrukcijsko jeklo najnižje možne kakovosti – S235 JR, kot je bilo predpostavljeno pri projektiranju, pri čemer je bila za mejo plastičnega tečenja izbrana kar nominalna (karakteristična) vrednost. V realnosti temu ni tako, saj je povprečna meja tečenja jekla kar precej višja od deklarirane oz. nominalne vrednosti. Rezultati analize so zato nekoliko na varni strani, ker smo upoštevali konservativne vrednosti materialnih karakteristik. Za bolj natančno analizo bi bilo potrebno upoštevati dejansko kvaliteto materiala posameznih elementov oz. dejanske vrednosti meje plastičnega tečenja. Če gre za obstoječe daljnovodne stebre, bi morali za določitev dejanskih karakteristik materiala uporabiti eno izmed metod za ugotavljanje deformacijskih in napetostnih lastnosti jekla (npr. natezni preizkus). V primeru novozgrajenih daljnovodnih stebrov pa za določitev dejanskih lastnosti uporabimo a-testno dokumentacijo, ki jo mora izvajalec predložiti in iz katere so razvidne tudi mehanske lastnosti uporabljenega materiala.

Uporabljene karakteristike:

$$\text{meja tečenja } f_y = 23,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2},$$

$$\text{trdnost } f_U = 36,0 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2},$$

$$\text{elastični modul } E = 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \text{ ter}$$

$$\text{specifična teža } \gamma = 78,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}.$$

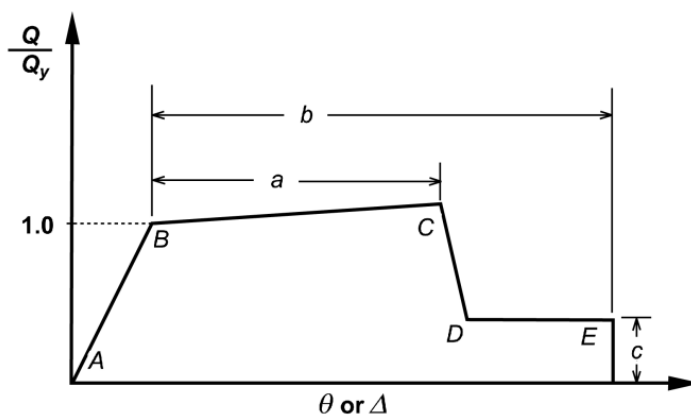


### 6.3 Plastični členki

Materialno nelinearnost modela opišemo s plastičnimi členki, ki jih definiramo na mestu plastifikacije elementov. Definiramo jih z odnosom moment-zasuk elementa pri upogibnih elementih, osna sila - pomik pri osno obremenjenih elementih, strižna sila - pomik ter s kombinacijo naštetih. Uporaba določenega odnosa je odvisna od geometrije nosilnega sistema in ocene, katera izmed notranjih statičnih količin je prevladujoča. Pri jeklenih elementih so odnosi med notranjo statično količino in pomikom oz. zasukom izrazito bilinearni. Ker gre za paličje, kjer so prevladujoče osne sile, nelinearnost na nivoju plastičnih členkov definiramo le za odnos osna sila – pomik.

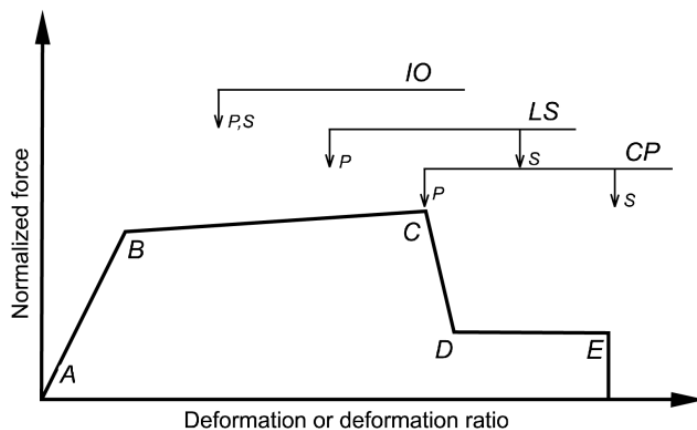
Priporočila za izračun plastičnih členkov podaja ameriški predstandard FEMA 356 (FEMA, 2000). Standard podaja diagram, ki je prikazan na sliki 29, kjer vertikalna os predstavlja normiran moment (osna sila), horizontalna os pa normiran zasuk (pomik). Normiran zasuk (pomik) je količnik med zasukom (pomikom) elementa in zasukom (pomikom) na meji tečenja sistema. Podobno velja za normiran moment (osno silo).

Odnos moment – zasuk ( $M/\theta$ ) oz. sila – pomik ( $N/\Delta$ ) je odvisen od kvalitete uporabljenega materiala ter od geometrijskih karakteristik elementa – dolžina elementa in karakteristike prereza. Za določitev diagrama potrebujemo zasuk (pomik) na meji plastičnega tečenja ter koeficiente a, b, in c, ki jih podaja FEMA.



Slika 29: Odnos normiran zasuk (pomik)/moment (sila) (FEMA, 2000)

Ko izvedemo potisno analizo, lahko preverimo tudi stanje plastičnega členka. FEMA določa točke na odnosu  $M/\theta$  oz.  $N/\Delta$ , na osnovi katerih lahko določimo nosilnost oz. poškodovanost linijskega elementa. Te točke imajo oznake IO (angl. »Immediate Occupancy«), LS (angl. »Life safety«) in CP (angl. »Collapse Prevention«).



Slika 30: Točke IO, LS in CP (FEMA, 2000)

Program SAP2000 ima že vgrajen algoritem, po katerem plastične členke izračuna avtomatsko. Pri tem »sledi« navodilom, ki jih podaja FEMA 356 in so bile opisane zgoraj. FEMA 356 pa ne podaja značilnosti diagrama za enojne kotnike, zato smo morali plastične členke definirati ročno. Za faktorje a, b, c so bile uporabljene vrednosti za jeklene dvojne kotnike, ki so prikazane v preglednici 22. Za točke IO, LS in CP pa vrednosti iz preglednice 23. V preglednicah sta uporabljena sledeča parametra:

$\Delta_c$ ... predviden pomik pri uklonski sili in

$\Delta_t$ ... pomik na meji tečenja.

Preglednica 22: Vrednosti parametrov a, b, in c za povezja iz jeklenih dvojnih kotnikov po standardu FEMA 356

Tlačeno povezje		a	b	c
1.	Nevarnost uklona v ravnini povezja	$0,5 \Delta_c$	$9 \Delta_c$	0,2
2.	Nevarnost uklona iz ravnine povezja	$0,5 \Delta_c$	$8 \Delta_c$	0,2
Natezno povezje		a	b	c
1.	Za vse jeklene profile	$11 \Delta_t$	$14 \Delta_t$	0,8

Preglednica 23: Vrednosti parametrov IO, LS in CP iz jeklenih dvojnih kotnikov po FEMA 356

Tlačeno povezje		IO	LS	CP
1.	Nevarnost uklona v ravnini povezja	$0,25 \Delta_c$	$5 \Delta_c$	$7 \Delta_c$
2.	Nevarnost uklona iz ravnine povezja	$0,25 \Delta_c$	$4 \Delta_c$	$6 \Delta_c$
Natezno povezje		IO	LS	CP
1.	Za vse jeklene profile	$0,25 \Delta_t$	$7 \Delta_t$	$9 \Delta_t$

Za podajanje osnih členkov moramo izračunati projektno nosilnost bruto prereza v nategu, projektno uklonsko nosilnost, pomik pri uklonski sili in vrednost pomika na meji tečenja. Enačbe za izračun so podane v SIST EN 1993-1-1:2005:

- projektna nosilnost bruto prereza v nategu  $N_{pl,Rd}$ :

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}},$$

kjer je:

A... površina prečnega prereza in

$\gamma_{M0}=1,0$ ... delni varnostni faktor odpornosti za določanje projektne nosilnosti prečnih prerezov.

- vrednost pomika na meji tečenja  $\Delta_t$ :

$$\Delta_t = \frac{N_{pl,Rd} \cdot l}{A \cdot E},$$

kjer je:

l... dolžina elementa.

- projektna uklonska nosilnost  $N_{b,Rd}$

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1},$$

kjer je:

$\gamma_{M1}=1,0$ ... delni varnostni faktor odpornosti pri kontroli stabilnosti (uklon, bočna zvrnitev, interakcija upogiba in tlaka),

$\chi(\bar{\lambda}, \alpha)$ ... redukcijski faktor upogibnega uklona (uklonska krivulja),

$\chi=1,0$  pri  $\bar{\lambda} \leq 0,2$ ,

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \text{ pri } \bar{\lambda} > 0,2,$$

$$\Phi = 0,5 \cdot (1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2),$$

$$\bar{\lambda} = \frac{l_u}{i \cdot \lambda_1},$$

$i = \sqrt{\frac{I}{A}}$  (vztrajnostni radij) in

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

kjer je:

$\bar{\lambda}$ ... relativna vitkost,

$\alpha$ ... faktor nepopolnosti,

$l_u$ ... uklonska dolžina elementa,

$I$ ... vztrajnostni moment prereza.

- vrednost pomika pri uklonski sili  $\Delta_c$ :

$$\Delta_c = \frac{N_{b,Rd} \cdot l}{A \cdot E}$$

### 6.3.1 Primer podajanja plastičnega členka v programu SAP 2000

Vrednosti navedene v poglavju 6.3 smo izračunali za vse elemente konstrukcije. S temi parametri smo definirali plastične členke, ki smo jih nato priredili posameznim elementom. Izračun parametrov in podajanje plastičnega členka smo prikazali za element DI\_C17. Obenem lahko izračun uporabimo za kontrolo računa uklonske nosilnosti, ki jo je izvedel SAP 2000 in smo jo uporabili pri dimenzioniranju elementov. Na enak način smo podali plastične členke za vse elemente.

Preglednica 24: Karakteristike elementa DI\_C17

Kotnik	$l$ [m]	$l_u$ [m]	$A$ [cm <sup>2</sup> ]	$I_{min}$ [cm <sup>4</sup> ]	$i_{min}$ [cm]	$\alpha$
L45x5	2,71	1,35	4,30	3,08	0,846	0,34

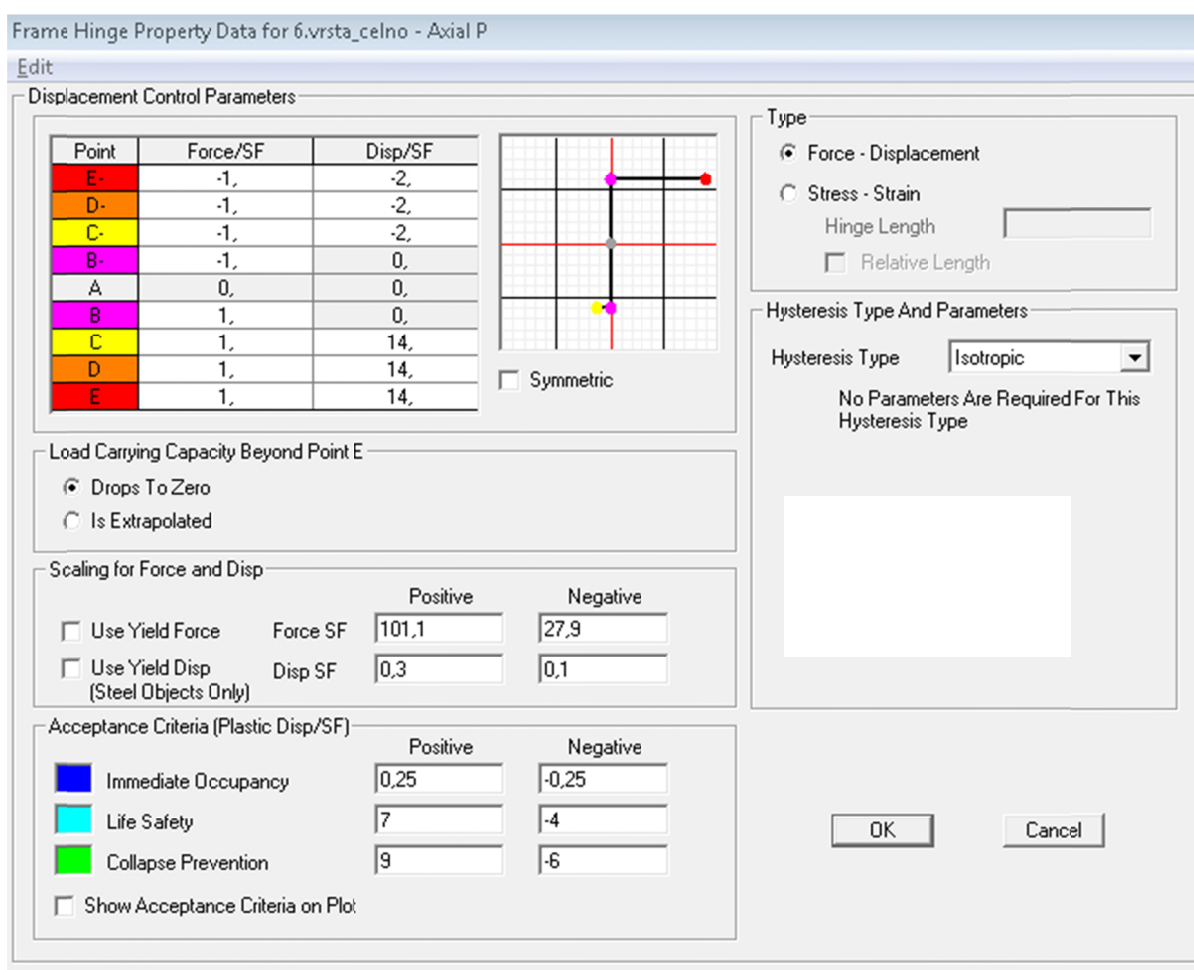
Preglednica 25: Vrednosti parametrov elementa DI\_C17 za potisno analizo

	$\bar{\lambda}$	$\Phi$	$\chi$	$N_{pl,Rd}$ [kN]	$N_{b,Rd}$ [kN]	$\Delta_t$ [cm]	$\Delta_c$ [cm]
»peš račun«	1,706	2,211	0,276	101,1	27,9	0,3	0,1
SAP 2000	1,707	2,213	0,276	101,1	27,9	/	/

Vrednosti v preglednici 25 za element DI\_C17 prikazujejo primerjavo med »peš računom« in vrednostmi iz programa SAP 2000, katerih izračun je prikazan na sliki 25 in sliki 26. Izračunane vrednosti s »peš računom« so skoraj identične tistim iz programa.

SAP zahteva podajanje normiranega deleža pomika oz. normiranega deleža osne sile. Graf odnosa med pomikom in osno silo ima zato nekoliko drugačno obliko, kot jo prikazuje slika 29. Primer podajanja osnega členka v programu je prikazan na sliki 31.

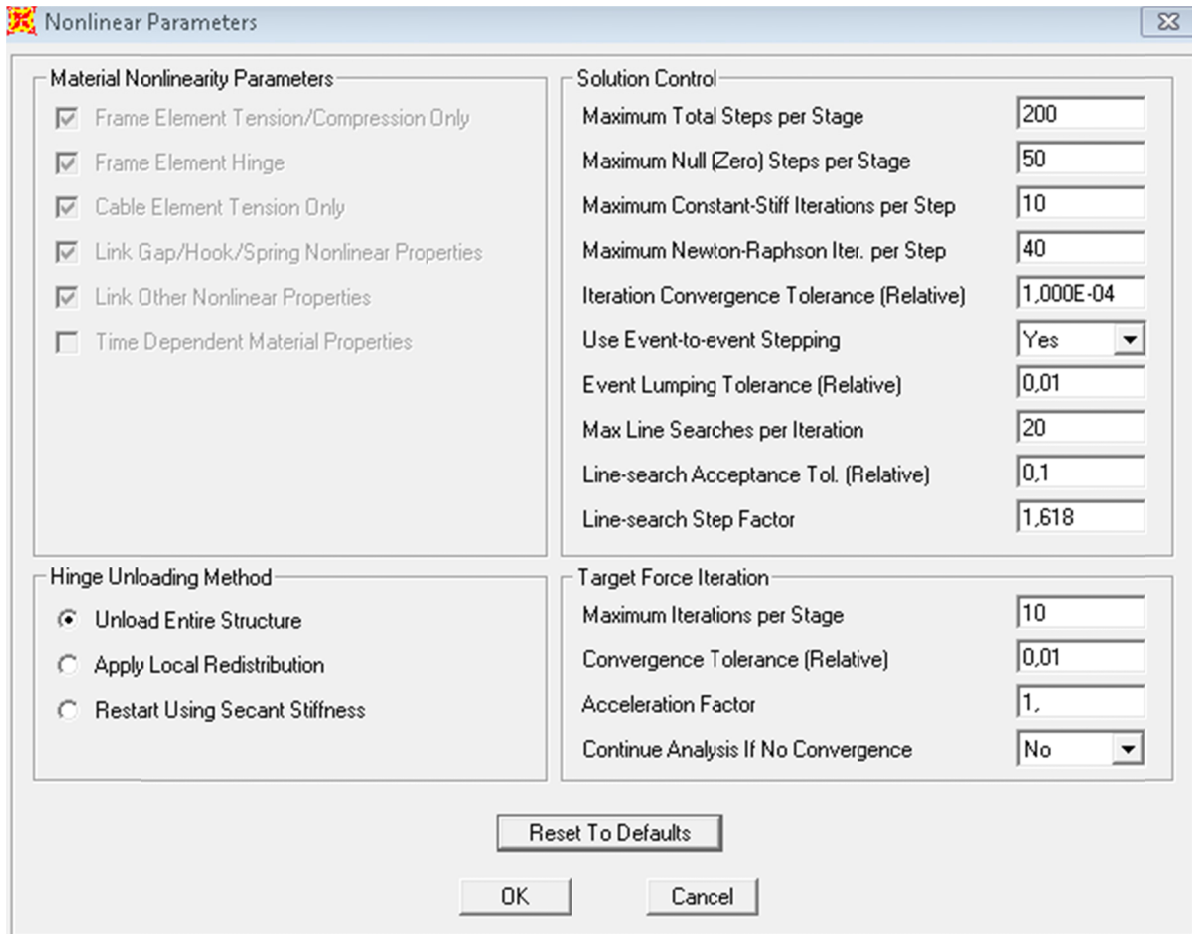
Na primeru plastičnega členka iz slike 31 je vidna vrednost projektne uklonske nosilnosti elementa (27,9 kN), vrednost pomika pri uklonski sili (0,1 cm), projektna natezna nosilnost elementa (101,1 kN), pomik na meji tečenja (0,42 cm) ter vrednosti pomikov členka v stanjih IO, LS in CP. Oblika diagrama v modelu se razlikuje od diagrama, ki ga predpostavlja FEMA 356. Po tem ko je dosežena duktilnost, ki jo zahteva FEMA za tak tip profilov, je predpostavljen takojšen padec nosilnosti. Poenostavljen diagram je bil uporabljen zato, da program ni imel težav s konvergenco.



Slika 31: Primer podajanja plastičnega osnega členka v programu SAP 2000

## 6.4 Določitev parametrov analize

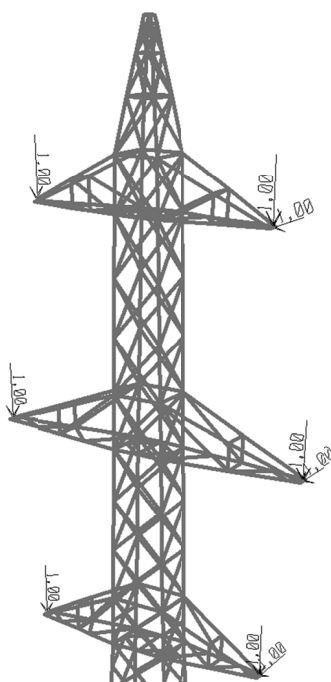
Potisna analiza temelji na numerični analizi, zaradi česar je potrebno definirati parametre s katerimi npr. določimo največje število iteracij za določen korak, dopustne tolerance pri iteracijah in podobno. Parametri analize so izredno pomembni, saj lahko že manjša sprememba parametrov povzroči večje spremembe v rezultatih. Zaradi tega je izredno težko oceniti pravilnost rezultatov. Slika 32 prikazuje parametre, ki so bili uporabljeni pri potisni analizi obravnavanega stebra.



Slika 32: Parametri numerične analize

## 6.5 Potisna analiza za obtežno kombinacijo J

Pri linearni analizi se je izkazalo, da ima daljnovodni steber najbolj izkoriščeno nosilnost pri kombinaciji J z neenakomernim žledom. S potisno analizo je bilo preverjeno, kakšna je »dejanska« nosilnost dalnovodnega stebra v primeru take obtežbe. Nelinearno analizo smo izvedli tako, da smo steber najprej obremenili s projektno obtežbo za kombinacijo J, nato pa je bila izvedena potisna analiza z obliko sil kot pri projektni obtežbi (slika 33). Analizo smo izvedeli s kontroliranjem horizontalnega pomika U2 v točki 405. To je točka na krajišču zgornje konzole.



Slika 33: Oblika obtežbe za potisno analizo, ki povzroči torzijski zasuk stebra

Rezultat potisne analize je krivulja, ki prikazuje sovisnost med horizontalnim pomikom v točki 405, kjer smo kontrolirali pomik in obtežbo za potisno analizo. Oblika krivulje, ki jo dobimo za torzijsko obtežbo je precej nenavadna. S tem mislimo predvsem na vrednosti pomikov, ki jih program izračuna v delu krivulje, kjer nosilnost pada. Pomiki oz. deformacije stebra v tem delu krivulje verjetno niso pravi opis dogajanja pri poružitvi, še vedno pa lahko rezultate analize uporabimo za določitev maksimalne nosilnosti in oblike poružitve stebra.

Maksimalna vrednost prečne sile ob vpetju na daljnovodni steber, ki jo določimo s potisno analizo, znaša:

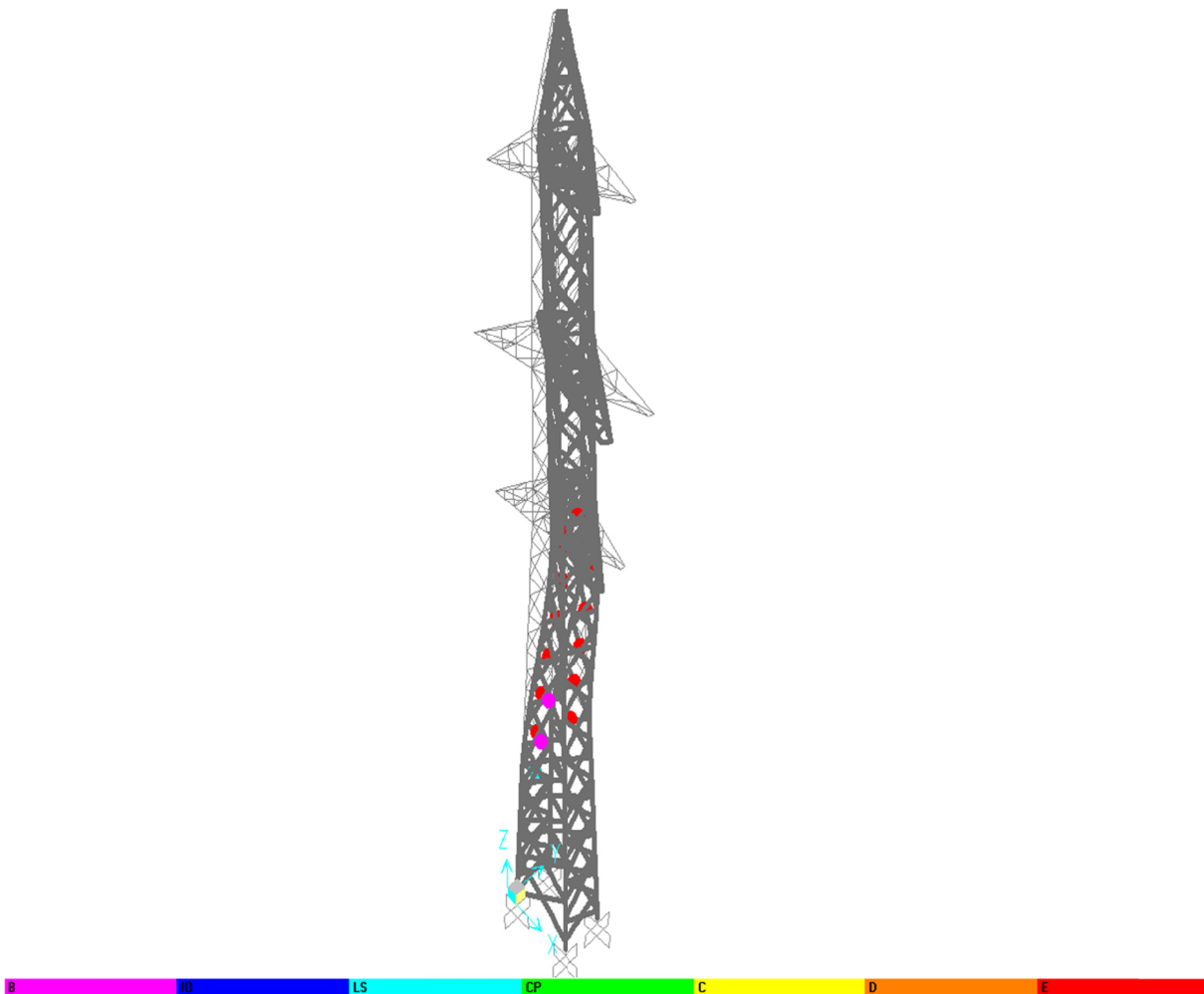
$$F_Y=36,2 \text{ kN}$$

$F_Y$  v tem primeru pomeni vsoto horizontalnih sil na konzolah, ki je potrebna za porušitev. Silo lahko primerjamo s projektno obtežbo na konzole, ki za kombinacijo J znaša 11,3 kN (preglednica 11) in

izračunamo dodatno varnost, ki jo ima daljnovodni steber zaradi upoštevanja materialnih nelinearnih lastnosti elementov. Najbolj preprosta primerjava je, če določimo prečno silo ob vpetju še za projektno obtežbo kombinacije J in jo primerjamo z maksimalno vrednostjo prečne sile ob vpetju pri porušitvi.

$$F = \frac{36,2 \text{ kN}}{3 \cdot 11,3 \text{ kN}} = 1,068$$

Vidimo, da je dodatna varnost v tem primeru razmeroma majhna. V tej varnosti je zajet vpliv neizkoriščenosti prereza in vpliv prerazporeditve obtežbe, medtem ko varnost zaradi boljše kvalitete materiala tu ni določena. Projektne horizontalne sile na konzoli lahko prekoračimo le za 6,8%. Ocenjujemo, da je v tem primeru prekoračitev projektne obtežbe zelo neugodna, saj je dodatna varnost zelo majhna, hkrati pa je neugoden tudi porušni mehanizem.



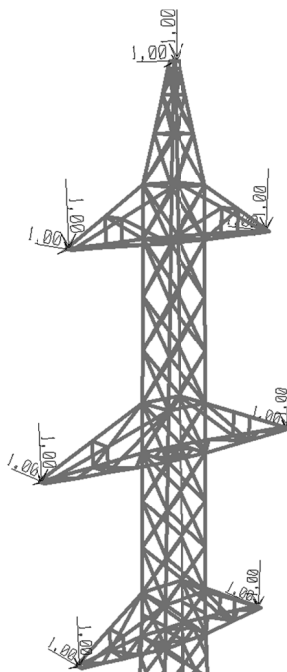
Slika 34: Nastanek plastičnih členkov pri torzijskem zasuku stebra

Oblika porušitve stebra za torzijsko obtežbo na sliki 34 je pričakovana. Najprej se uklonijo diagonale, ki so najbolj izkoriščene že pri linearno-elastični analizi. Nato se obtežba prerazporedi na ostale diagonale, ki začnejo vse po vrsti odpovedovati in tako dobimo nastanek kinematične verige.



## 6.6 Potisna analiza za obtežno kombinacijo K

Steber je bil obremenjen na projektno obtežbo za kombinacijo K. Nato je bila izvedena potisna analiza z obliko sil kot na sliki 35. Kontroliramo horizontalni pomik U2 v točki 405, to je točka na krajišču zgornje konzole.



Slika 35: Oblika obtežbe za potisno analizo, ki povzroči upogib stebra vzdolž daljnovoda

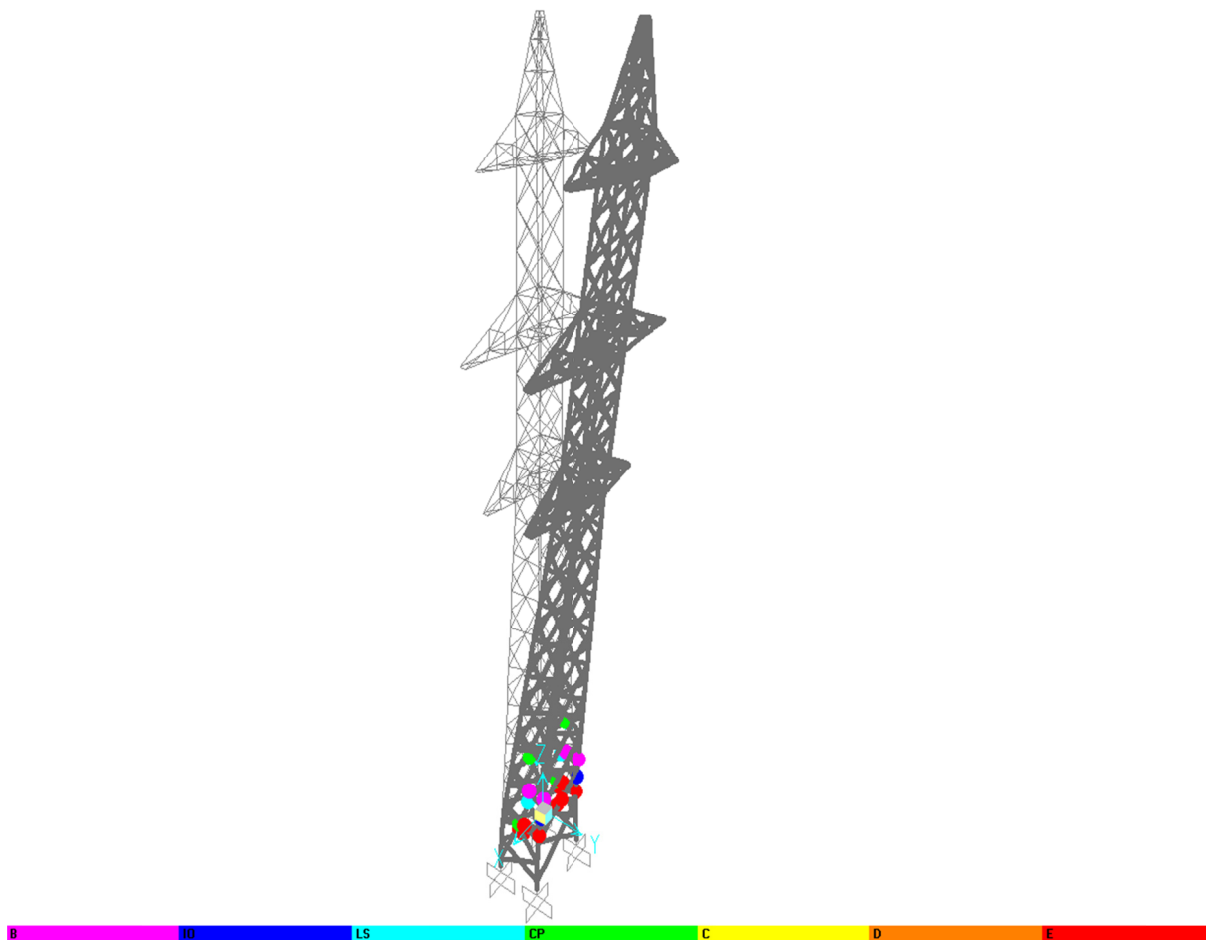
Tudi v tem primeru uporabimo rezultate analize samo za določitev nosilnosti in obliko porušitve. Maksimalna vrednost prečne sile ob vpetju konstrukcije znaša:

$$F_Y=66,0 \text{ kN}$$

Za izračun faktorja dodatne varnosti  $F$  moramo določiti vrednost prečne sile ob vpetju pri projektni obtežbi kombinacije K. Uporabimo projektno horizontalno silo na konzolo, ki znaša 4,52 kN in projektno horizontalno silo na konico zaradi zaščitne vrvi, ki znaša 9,17 kN (preglednica 11 in preglednica 12).

$$F = \frac{66,0 \text{ kN}}{(6 \cdot 4,52 + 9,17) \text{ kN}} = 1,82$$

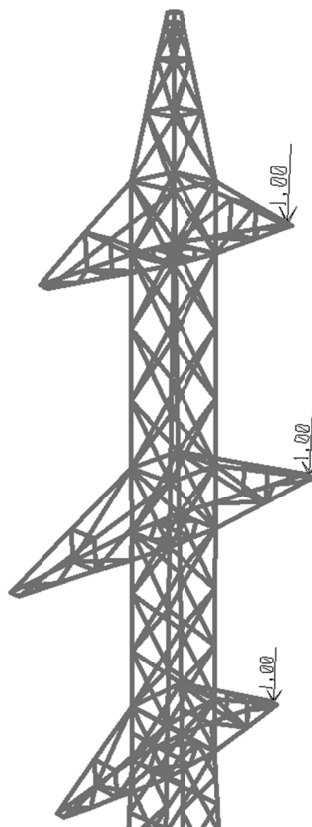
V tem primeru je dodatna varnost zelo velika. Na sliki 36 vidimo, da so plastični členki skoncentrirani na spodnjem delu stebra, kjer pride do uklona vertikalnih elementov in diagonal.



Slika 36: Nastanek plastičnih členkov pri upogibu stebra vzdolž daljnovoda

### 6.7 Potisna analiza za upogib stebra prečno glede na smer daljnovoda

Kot je že bilo povedano v prvem delu diplome, se v nacionalnih normativih standarda SIST EN 50341-1 kombinacije, ki bi povzročila upogib stebra prečno glede na smer daljnovoda, ne upošteva. Taka obtežna kombinacija lahko nastopi pri pretrgu ene od več izolatorskih verig ali pri neenakomernem nabiranju žleda na vsaki strani. Takšno situacijo prikazuje slika 19. V tem poglavju smo preverili kakšen tip porušitve in kakšno varnost lahko ocenimo pri takem obremenjevanju. Konstrukcijo smo najprej obremenili na projektno stanje, ki odgovarja kombinaciji D. To je kombinacija z maksimalno obtežbo žleda na vodnikih in zmanjšano obtežbo vetra. Nato je bila izvedena potisna analiza z obliko obtežbe, ki jo prikazuje slika 37. Kontrolirali smo vertikalni pomik U3 na krajišču srednje konzole v točki 408.



Slika 37: Oblika obtežbe za potisno analizo, ki povzroči upogib stebra prečno glede na smer daljnovoda

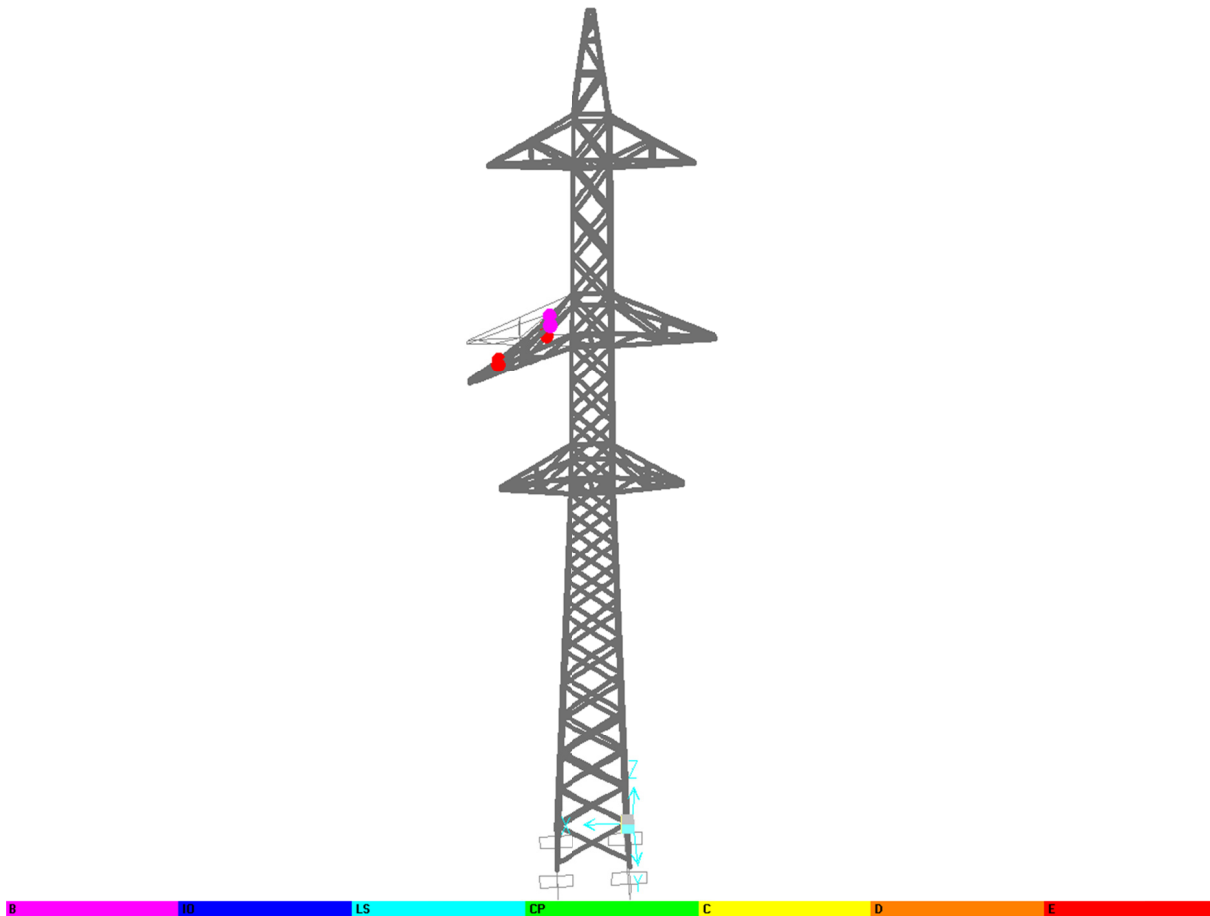
Slika 38 prikazuje način porušitve, ki potrjuje, da ta obtežni primer ni merodajen za celoten stebel, ampak le lokalno za konzolo. Pričakovano odpovejo natezno obremenjeni elementi na konzoli. Faktor varnosti glede na projektno obtežbo je v tem primeru težko določiti, ker standard ne zahteva preverjanja na to kombinacijo pri linearno-elastični analizi. Ker dobimo lokalno porušitev konzole, lahko za oceno varnosti uporabimo maksimalno vertikalno silo na konzolo, ki jo dobimo pri kombinaciji D. Vertikalno silo pri porušitvi pa dobimo iz vsote reakcij v vertikalni smeri pri potisni analizi:

$$F_Z = 49,6 \text{ kN},$$

$F_Z$  v tem primeru pomeni vertikalno silo na srednji konzoli pri porušitvi. Za določitev faktorja varnosti uporabimo projektno vertikalno silo v obesiščih vodnikov za kombinacijo D, ki znaša 13,7 kN (preglednica 11):

$$F = \frac{49,6 \text{ kN}}{13,7 \text{ kN}} = 3,62$$

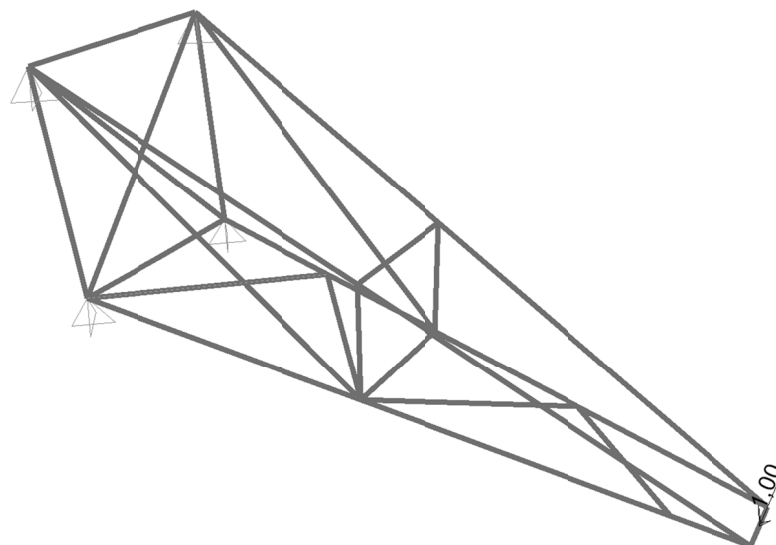
Vidimo, da je dodatna varnost v primeru povečevanja vertikalne obtežbe v obesišču konzole zelo velika.



Slika 38: Nastanek plastičnih členkov pri upogibu stebra prečno na smer daljnovoda

### 6.8 Potisna analiza konzole za horizontalno obtežbo

V tem poglavju smo preverjali odpornost konzole na horizontalno obtežbo. Model je bil izveden tako, da smo modelirali samo konzolo, brez trupa stebra. Na mestih, kjer se konzola vpne v steber so bile modelirane členkaste podpore. Modelirana je bila srednja konzola za katero iz linearno-elastične analize vemo, da ima najbolj izkoriščene elemente in je zato pričakovati, da se bo prej porušila kot zgornja oz. spodnja konzola. Ponovno je bila konzola najprej obremenjena do projektno obtežbe pri kombinaciji J, ki odgovarja maksimalni horizontalni projektni obtežbi. Nato pa je bila izvedena potisna analiza tako, da smo vsiljevali horizontalni pomik  $U_2$  na krajišču konzole. Oblika obtežbe za potisno analizo je prikazana na sliki 39. Načeloma bi poleg horizontalne sile za potisno obtežbo morali upoštevati še vertikalno silo, vendar pri analizi konzole oblika obtežbe nima bistvenega vpliva na rezultat.



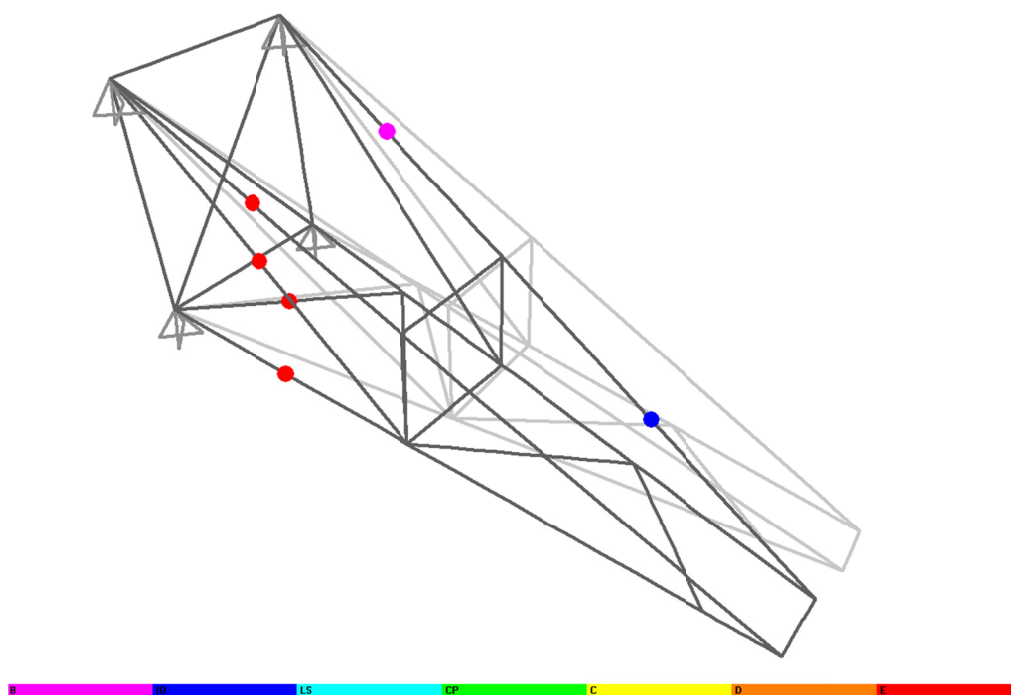
Slika 39: Model konzole in oblika obtežbe za potisno analizo

Vrednost prečne sile ob vpetju  $F_Y$ :

$$F_Y = 25,9 \text{ kN}$$

$F_Y$  v tem primeru pomeni horizontalno silo v obesišču konzole pri porušitvi. Faktor varnosti določimo kot kvocient med silo  $F_Y$  in maksimalno projektno horizontalno obtežbo, ki je dosežena pri kombinaciji J:

$$F = \frac{25,9 \text{ kN}}{11,3 \text{ kN}} = 2,29$$



Slika 40: Nastanek plastičnih členkov za potisno analizo konzole na horizontalno obtežbo

## 6.9 Primerjava rezultatov in nevarnost rušitve stebrov

Rezultate nelinearnih analiz med seboj težko primerjamo, saj gre pri vsaki analizi za povsem drugačen obtežni primer za katerega nismo ocenili kakšna je verjetnost njenega nastopa. Varnosti, ki smo jih izračunali bi bile primerljive, če bi bila verjetnost nastopa obtežbe, ki povzroči porušitev enaka. Z dobljenimi rezultati torej lahko ugotovimo, kako veliko dodatno varnost ima steber v primeru pojava izredne situacije, težko pa ocenimo kateri izmed primerov je najbolj nevaren za rušitev.

**Preglednica 26: Primerjava rezultatov nelinearnih statičnih analiz**

ANALIZA	VZROK PORUŠITVE	VARNOST
Torzijski zasuk stebra	Uklon diagonal pod spodnjo konzolo v čelni in bočni steni stebra	1,07
Upogib stebra vzdolž daljnovoda	Uklon vogalnih elementov in diagonal v spodnjem delu stebra	1,82
Upogib stebra prečno na smer daljnovoda	Porušitev konzole, natezno deformiranje diagonal	3,62
Konzole za horizontalno obtežbo	Uklon in natezna porušitev prečk v spodnjem pasu konzole	2,29

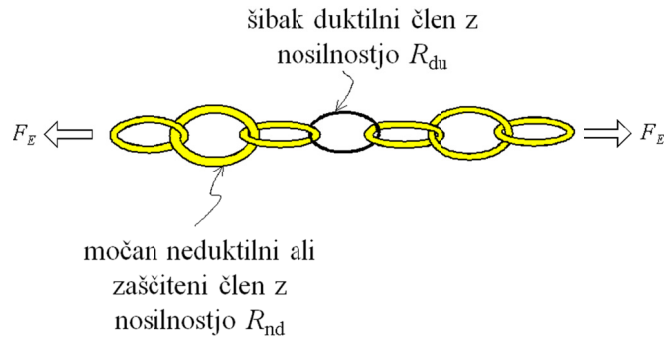
- Od vseh obravnavanih primerov dobimo najmanjšo dodatno varnost v primeru torzijskega zasuka stebra, hkrati pa je tudi porušitev zelo neugodna, saj bi morali zamenjati cel steber.
- Pri upogibu stebra vzdolž daljnovoda dobimo sicer neugodno porušitev, vendar je dodatna varnost v primerjavi s projektno obtežbo zelo velika.
- Pri upogibu stebra prečno na smer daljnovoda dobimo ugodno porušitev po konzoli. Izmed vseh porušitev, je takšna porušitev najbolj ugodna, saj bi s tem osnovna konstrukcija stebra ostala nepoškodovana. Prav tako pa v tem primeru dobimo veliko dodatno varnost v primerjavi s projektno vertikalno obtežbo na konzolo. Tak obtežni primer torej ni problematičen, saj ima veliko dodatno varnost, poleg tega pa rekonstrukcija stebra ne bi bila zahtevna, saj bi bilo potrebno zamenjati le konzolo. Verjetno je prav zaradi tega v nacionalnih normativih določeno, da stebra na to obtežno kombinacijo ni potrebno preverjati.
- Potisno analizo konzole smo izvedli zato, da vidimo, kakšno nosilnost na horizontalno obtežbo ima sama konzola v primerjavi s celo konstrukcijo stebra. V preostalih analizah, kjer smo modelirali celotni steber, smo konzole na horizontalno obtežbo obremenjevali v primeru torzijskega zasuka in upogiba stebra vzdolžno na daljnovod. V obeh primerih je prej prišlo do deformiranja elementov na samem stebru kot do porušitve elementov na konzoli, zato je pričakovati, da konzola prenese veliko večje horizontalne sile, kot so potrebne za porušitev

stebra. To trditev potrjuje velik faktor varnosti konzole, ki smo ga določili glede na največjo projektno horizontalno silo.

## 7 UPORABA METODE NAČRTOVANJA NOSILNOSTI ZA DALJNOVODNE STEBRE

### 7.1 Opis metode

Princip metode načrtovanja nosilnosti (angl. »capacity design«) lahko razložimo, če si konstrukcijo zamislimo kot verigo z duktilnim šibkim členom (slika 41) kot je predlagal Paulay (Fajfar, Fischinger, Beg, 8.poglavje priročnika Projektiranje gradbenih konstrukcij po Evrokod standardih, 2009).



**Slika 41: Analogija med konstrukcijo in verigo z duktilnim šibkim členom (vir: Fajfar, Fischinger, Beg, 8.poglavje priročnika Projektiranje gradbenih konstrukcij po Evrokod standardih, 2009)**

Sila v verigi  $F_E$  ne more preseči vrednosti, ki je določena z dejansko nosilnostjo šibkega člena  $R_{act,du}$ :

$$F_E \leq R_{act,du}$$

Če je nosilnost na meji plastičnosti za vse močnejše člene  $R_{CD,nd}$  večja od dejanske nosilnosti šibkega člena  $R_{act,du}$  (indeks »CD« označuje »capacity design«):

$$R_{CD,nd} > R_{act,du}$$

bodo neelastične deformacije (poškodbe) omejene samo na šibki člen, ki deluje kot varovalka. Šibkemu členu pa moramo zagotoviti duktilnost.

Obravnavani princip očitno ne bi deloval pri statični (dolgotrajni) obtežbi, saj bi ta kmalu porušila šibki člen. Pri kratkem pulzu obtežbe (npr. potres) pa so deformacije omejene in dovolj duktilen člen lahko preživi.

Pri takem načinu projektiranja moramo upoštevati dejansko (angl. »actual«) in ne projektno (angl. »design«) vrednost nosilnosti šibkega člena. Dejanska velikost nosilnosti je namreč praviloma večja od računsko potrebne iz različnih vzrokov, npr. zaradi večje trdnosti materiala od predpisanih projektnih vrednosti, večjih dimenzij, ki jih morebiti zahtevajo še druge obtežbe ali pa tipizacije prerezov in armature:

$$R_{act,du} = \gamma_{Rd} \cdot R_{d,du}; \gamma_{Rd} > 1,0$$



Očitno je, da je predimenzioniranje šibkega člena, izraženo z velikim faktorjem dejanske oziroma povečane nosilnosti  $\gamma_{Rd}$  za konstrukcijo celo škodljivo (podobno kot predimenzioniranje varovalke v električnem krogu). Zato pri računu nosilnosti niso dopustne nekatere predpostavke in poenostavitve, ki so pri dimenzioniranju na varni strani (Fajfar, Fischinger, Beg, 8.poglavje priročnika Projektiranje gradbenih konstrukcij po Evrokod standardih, 2009).

## 7.2 Uporaba metode za horizontalno obtežbo v obesiščih konzol

Nosilni daljnovodni stebri se praviloma postavljajo samo v premočrtni trasi. Pri njih je mehanska napetost vodnikov ali zaščitnih vrvi v obeh razpetinah na vsaki strani stebra enaka. Primarno so taki stebri nosilni le na vertikalno obtežbo. Horizontalno obtežbo dobimo le v primeru nastanka neenakomerne obtežbe z žledom. Nastanek take obtežbe pa je zelo nepredvidljiv pojav, zato je tudi težko oceniti pričakovane horizontalne sile na konstrukcijo. Ocenjujemo, da bi bil princip načrtovanja nosilnosti uporaben predvsem v primeru prekoračitve projektnih horizontalnih sil v obesiščih konzol. Slednjo trditev lahko utemeljimo z izvedenimi nelinearnimi analizami, s katerimi smo dodatno preučili odpornost konstrukcije za obtežbo z žledom. Potrebo po uporabi metode načrtovanja nosilnosti (MNN) smo ocenjevali na podlagi porušnega mehanizma in faktorja varnosti glede na projektno obtežbo, ki ga ima steber za določen tip obtežbe.

- V poglavju 6.9 je bilo pokazano za kateri tip obtežbe z žledom je konstrukcija najbolj občutljiva. Vidimo, da ima steber veliko varnost v primeru povečevanja vertikalne obtežbe v obesiščih vodnikov. Pri morebitni prekoračitvi pa se lokalno poruši le konzola. Kot je že bilo povedano si takšno porušitev želimo, ker tako ostane trup stebra nepoškodovan. V tem primeru načrtovanja nosilnosti ne potrebujemo, ker je šibek člen za tak način obremenjevanja že sama konzola.
- Steber ima najmanjšo dodatno varnost glede na projektno obtežbo v primeru torzijske obtežbe. Za ta obtežni primer so primarno nosilne diagonale, ki so dobro izkoriščene že v linearno-elastični analizi. Faktor dodatne varnosti, ki smo ga določili glede na projektno obtežbo znaša 1,07. Uklon prvega elementa oz. nastanek prvega plastičnega členka se zgodi že v prvem koraku potisne analize. Dodatno varnost, ki jo ima konstrukcija zaradi sposobnosti prerazporejanja obtežbe, določimo s kvocientom med maksimalno vrednostjo prečne sile ob vpetju pri poružitvi in vrednostjo pri prvi plastifikaciji:

$$F_v = \frac{36,1 \text{ kN}}{35,2 \text{ kN}} = 1,025$$

Dodatna varnost, ki izhaja iz naslova statične nedoločenosti konstrukcije, znaša samo 1,03. Zaradi zelo velike izkoriščenosti diagonal v linearno-elastični analizi ni velike razlike med varnostjo  $F_v$  zaradi sposobnosti prerazporejanja obtežbe in skupno varnostjo  $F$ , ki smo jo določili glede na projektno obtežbo. Princip načrtovanja nosilnosti bi bil dobra rešitev za

torzijsko obtežbo tako zaradi majhne dodatne varnosti kot tudi neugodnega porušnega mehanizma.

- V primeru potisne analize za obtežno kombinacijo K, ki povzroči upogib stebra vzdolžno na daljnovod, je določena velika varnost pred poružitvijo glede na projektno obtežbo. Ocenjujemo, da je velika varnost predvsem posledica razmeroma slabe izkoriščenosti elementov za kombinacijo K. Element Vog21, ki se prvi ukloni pri potisni analizi je v linearni analizi le 59,4% izkoriščen. Pri potisni analizi so vsi elementi v elastičnem stanju vse do 7. koraka obteževanja. Vrednost prečne sile ob vpetju v tem koraku znaša 63,9 kN, medtem ko je maksimalna vrednost pri poružitvi 66,0 kN. Vrednost prečne sile ob vpetju za projektno stanje kombinacije K pa znaša le 36,3 kN. Za oceno dodatne varnosti, ki jo ima konstrukcija zaradi sposobnosti prerazporejanja obtežbe, lahko uporabimo kvocient med vrednostjo prečne sile pri poružitvi in vrednostjo prečne sile pri prvi plastifikaciji:

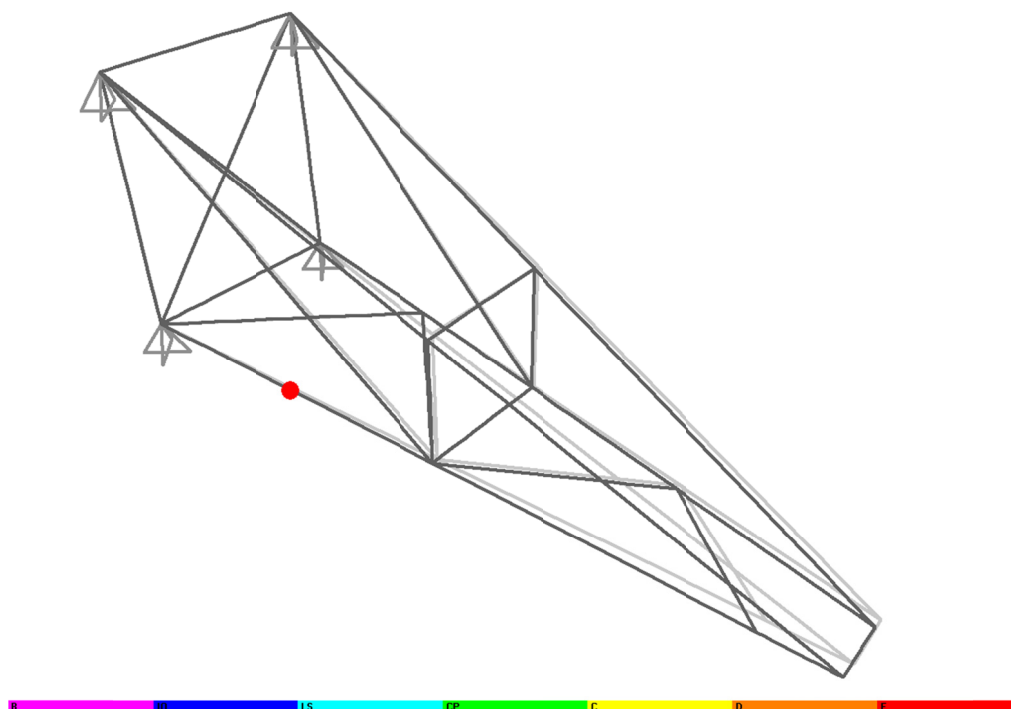
$$F_v = \frac{66,0 \text{ kN}}{63,9 \text{ kN}} = 1,032$$

Faktor dodatne varnosti  $F_v$ , ki ga ima konstrukcija zaradi sposobnosti prerazporejanja obremenitve za tak način obremenjevanja znaša le 1,03. Za tako konstrukcijo je torej značilna razmeroma krhka poružitve. Če bi bili elementi v elastičnem stanju bolj izkoriščeni, bi že majhna prekoračitev projektnega vpliva pomenila katastrofalno poružitve. Oblika poružitve za tak način obteževanja, ki je prikazana na sliki 36 pomeni poružitve celotnega stebra. Neugodno je predvsem, ker se steber poruši v spodnjem delu trupa. To pomeni, da je potrebno zamenjati praktično vse elemente. Čeprav ima obravnavani steber veliko dodatno varnost glede na projektno obtežbo v primeru upogiba vzdolžno glede na daljnovod, pa bi bilo z vidika porušnega mehanizma dobro razviti šibki člen, ki bi razbremenil obtežbo na vertikalne elemente stebra.

### 7.2.1 Izbira šibkega člena

Kot je napisano v poglavju 7.1 si pri načrtovanju nosilnosti v procesu projektiranja postavimo omejitve, katere elemente konstrukcije želimo obvarovati in katerim elementom so dopuščene poškodbe. V primeru povečevanja vertikalne obtežbe v obesiščih konzol dobimo ugodno poružitve po konzoli, medtem ko osnovna konstrukcija stebra ostane nepoškodovana. Takšno situacijo želimo doseči tudi v primeru povečevanja horizontalne obtežbe. Z nelinearnimi analizami je bilo prikazano, da je konzola veliko bolj nosilna kot elementi stebra, ko gre za povečevanje horizontalne obtežbe. Če želimo, da bo prej prišlo do deformacije konzole, moramo v procesu projektiranja z metodo načrtovanja nosilnosti zagotoviti, da bodo elementi na konzoli manj nosilni kot elementi stebra.

Pri izbiri šibkega člena uporabimo mehanizem poružitve, ki smo ga dobili pri nelinearni analizi konzole za horizontalno obtežbo. Mehanizem poružitve konzole je pričakovan, saj se najprej uklonijo horizontalni elementi oz. prečke, ki so najbolj izkoriščene že pri linearno-elastični analizi.



**Slika 42: Nastanek prvega plastičnega členka pri potisni analizi konzole**

Za šibek člen na konzoli izberemo prečko, ki se prva ukloni pri potisni analizi. V preglednici 27 smo prikazali izkoriščenost tega elementa pri linearno-elastični analizi. Vidimo, da ima največjo izkoriščenost za kombinaciji J in K. Kljub temu pa je njegova izkoriščenost razmeroma majhna. Kot je bilo zapisano v poglavju 7.1, je z vidika projektiranja po metodi načrtovanja nosilnosti predimenzioniranje šibkega člena zelo neugodno. Zaradi tega bi bilo v nadaljevanju dobro, če bi element na konzoli oslabili. Oslabitev lahko izvedemo na več načinov. Npr. tako da oslabimo spoj s katerim je element priključen, ali pa oslabimo kotnik. Odločimo se za oslabitev kotnika z zmanjšanjem profila.

**Preglednica 27: Izkoriščenost izbranega šibkega člena pri linearno-elastični analizi**

Element	Kotnik	Izkoriščenost pri kombinaciji [%]								
		A	B	C	D	E	F	I	J	K
K2_BS_1	L70x7	8,9	11,5	20,8	21,3	23,5	26,3	21,3	53,4	30,1

V preglednici 28 je prikazana izkoriščenost nosilnosti za vse kombinacije pri zmanjšanem profilu. Vidimo, da nosilnost šibkega člena, kljub zmanjšanju prereza, ustreza vsem kombinacijam.

**Preglednica 28: Izkoriščenost šibkega člena pri zmanjšanju kotnika**

Element	Kotnik	Izkoriščenost pri kombinaciji [%]								
		A	B	C	D	E	F	I	J	K
K2_BS_1	L60x6	15,1	19,6	35,5	36,5	40,2	44,8	36,3	91,2	52,3

### 7.2.2 Projektiranje varovanih delov

Za izbiro varovanih delov so nam v pomoč rezultati nelinearnih analiz. Za obtežno kombinacijo J želimo varovati diagonale stebra, ki so najbolj obremenjene zaradi torzijskega obteževanja, in se prve uklonijo pri potisni analizi. Za kombinacijo K, ki povzroči upogib vzdolžno na daljnovod, pa želimo varovati vertikalne elemente stebra, ki se za tak način obremenjevanja najprej uklonijo.

**Preglednica 29: Najbolj izkoriščen vertikalni element in diagonala pri linearno-elastični analizi za primer osnovne konstrukcije**

Element	Kotnik	Izkoriščenost pri kombinaciji [%]								
		A	B	C	D	E	F	I	J	K
Vog21	L110x10	49,7	33,4	78,5	27,8	38,5	33,9	10,8	46,6	59,4
DI_B19	L40x5	0,4	18,4	7,2	0	6,5	2,7	0	99,7	20,9

Element Vog21 v preglednici 29 je vogalnik, ki se prvi ukloni pri potisni analizi. Element DI\_B19 pa najbolj izkoriščena diagonala za kombinacijo J, ki se prva ukloni pri potisni analizi za torzijsko obtežbo. Dobra izkoriščenost varovanih elementov prav tako ni ugodna za projektiranje po metodi načrtovanja nosilnosti, saj moramo doseči, da bodo varovani elementi ostali nepoškodovani. Varovane elemente projektiramo analogno kot pri projektiranju potresno odpornih konstrukcij po metodi načrtovanja nosilnosti. Pri potresno odpornih konstrukcijah je potrebno dele konstrukcije, ki ne sipajo energije zavarovati pred preobremenitvijo, ki bi lahko nastopila zaradi polne plastifikacije elementov, ki sipajo energijo. Podoben razmislek uporabimo tudi tukaj. Zagotoviti moramo, da bo deformacija šibkega člena nastopila pred preobremenitvijo varovanih delov. Pri tem je potrebno upoštevati ocenjeno dejansko plastično nosilnost in ne nominalne. To se doseže z upoštevanjem faktorja dodatne nosilnosti  $\gamma_{ov}$  in faktorja dodatne nosilnosti prečnega prereza  $\Omega$ . Projektne vrednosti notranjih sil se v teh elementih izračunajo na naslednji način:

$$N_{Ed} = N_{Ed,G} + 1,1 \cdot \gamma_{ov} \cdot \Omega \cdot N_{Ed,E}$$

kjer so:

$N_{Ed,G}$ ,  $M_{Ed,G}$ ,  $V_{Ed,G}$ ... notranje sile v varovanem elementu zaradi gravitacijskih vplivov vključenih v obtežno kombinacijo zaradi neenakomernega žleda,

$N_{Ed,E}$ ,  $M_{Ed,E}$ ,  $V_{Ed,E}$ ... notranje sile v varovanem elementu zaradi vplivov žleda, vključenih v kombinacijo z neenakomernim žledom,

$\gamma_{ov}$ ... faktor dodatne nosilnosti

Za faktor dodatne nosilnosti uporabimo konservativen način, kjer je  $\gamma_{ov}=1,25$  in  $f_{y,nom}=f_y$  ter

$\Omega$ ... faktor dodatne nosilnosti prereza

$$\Omega = \min(N_{Rd,i} / N_{Ed,i}).$$

Faktor dodatne nosilnosti izračunamo kot razmerje med nosilnostjo in projektno obremenitvijo v šibkem členu.

**Preglednica 30: Faktor dodatne nosilnosti za šibek člen na konzoli**

Element	$\Omega$	
	KOMB. J	KOMB. K
K2_BS_1	1,10	1,91

Po metodi načrtovanja nosilnosti bi morali določiti notranje sile za vse varovane elemente. Prikažemo le račun za najbolj izkoriščena varovana elementa Vog21 in DI\_B19.

Projektne vrednosti notranjih sil po MNN za element Vog21:

$$N_{Ed} = -7,0 - 1,0 - 15,8 - 1,1 \cdot 1,25 \cdot 1,91 \cdot 213,1 = -526,1 \text{ kN}$$

Projektne vrednosti notranjih sil po MNN za element DI\_B19:

$$N_{Ed} = -0,1 - 1,1 \cdot 1,25 \cdot 1,1 \cdot 24,4 = -37,0 \text{ kN}$$

**Preglednica 31: Primerjava notranjih sil po MNN in linearno-elastični analizi**

Element	$N_{Ed}$ [kN]	
	Linearno-elastična analiza	Metoda načrtovanja nosilnosti
Vog21	-237,8	-583,6
DI_B19	-24,5	-37,0

Varovane elemente sedaj dimenzioniramo na projektne vrednosti notranjih sil po MNN. Vidimo, da dobimo precej povečane obremenitve po takem načinu projektiranja. V primerjavi z linearno analizo se osna sila v elementu Vog21 poveča kar za 145%, osna sila v elementu DI\_B19 pa za 51%, zato je potrebna zamenjava kotnikov.

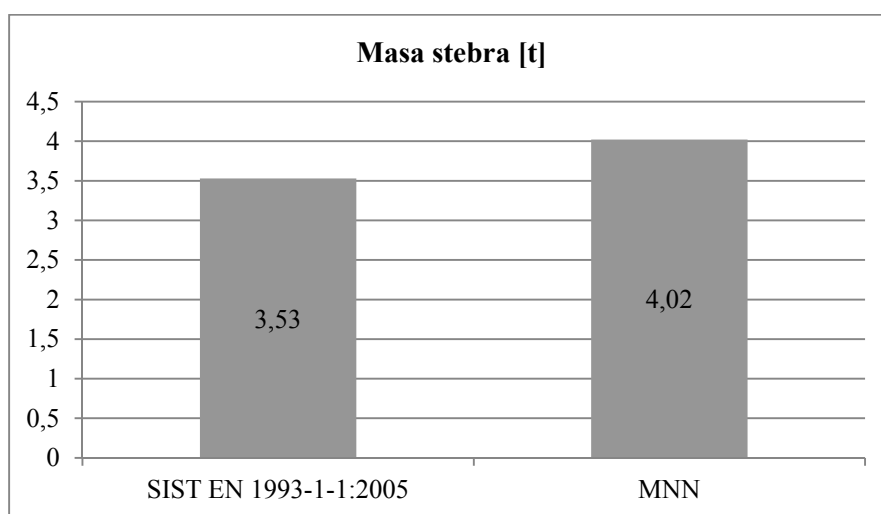
**Preglednica 32: Izkoriščenost nosilnosti varovanih elementov po zamenjavi kotnikov**

Element	Kotnik	Izkoriščenost pri kombinaciji [%]								
		A	B	C	D	E	F	I	J	K
Vog21	L130x12	29,2	19,7	46,2	16,3	10,9	22,6	6,4	27,5	85,8
DI_B19	L50x5	0,2	9,9	3,9	0,0	3,5	1,5	0	78,2	11,2

V preglednici 32 je prikazana izkoriščenost nosilnosti za zamenjane kotnike. Pri kombinacijah za katere nismo upoštevali metode načrtovanja nosilnosti, so uporabljene vrednosti notranjih sil iz linearno-elastične analize.

### 7.3 Ocena primernosti uporabe metode

V primeru elementov Vog21 in DI\_B19, za katera smo prikazali račun notranjih sil po MNN, smo morali izbrati za 2 razreda močnejše kotnike, kot so bili določeni z dimenzioniranjem na sile po linearno-elastični teoriji. Dimenzioniranje je prikazano samo za dva elementa, seveda pa moramo tako projektirati vse vertikalne elemente in diagonale. Prav tako pa bi morali poleg oslabitve srednje konzole, enako oslabiti še spodnjo in zgornjo konzolo, saj se horizontalna obtežba pojavi na vseh treh konzolah. Zato smo na enak način, kot je bilo prikazano v poglavju 7.2.2, izračunali notranje sile v vseh diagonalah in vogalnih elementih. Na te notranje sile smo elemente dimenzionirali. Za večino elementov je bilo potrebno zamenjati kotnike. Na sliki 43 smo primerjali maso konstrukcije, ki je bila določena za profile dimenzionirane po SIST EN 1993-1-1:2005 in maso, ki je bila določena za profile dimenzionirane po MNN. Prirastek mase po MNN znaša 14%.

**Slika 43: Primerjava mase stebrov**

Metoda, ki smo jo predstavili, je bila uporabljena le na idejni ravni. Z njeno uporabo smo skušali preprečiti pojav porušnih mehanizmov, ki pomenijo popolno porušitev stebra. Steber smo pred

popolno porušitvijo skušali varovati z utrditvijo trupa stebra, tako da smo povečali dimenzije kotnikov za diagonale in vogalnike, hkrati pa smo oslabili najbolj izkoriščen element na konzoli in s tem povečali verjetnost, da bo najprej odpovedal ta element. S takim ukrepom smo povečali varnost konstrukcije proti porušitvi, vendar še vedno ne moremo z zagotovostjo trditi, da bo prej prišlo do porušitve konzole. Pri pojavu izredne obtežbe na steber, ki pomeni porušitev, je prisotnih še veliko drugih dejavnikov, ki jih pri tej analizi nismo upoštevali, zato bi bilo potrebno projektirani steber ponovno preveriti z bolj detajlnejšo analizo, da bi videli »dejansko« obnašanje konstrukcije. Eden izmed pomembnih dejavnikov, ki ga nismo upoštevali pri analizi, so dejanske karakteristike materiala. Poleg tega je zelo težko trditi, da se bo obtežba na konstrukcijo v realnosti pojavila v taki obliki, kot smo jo nanegli v nelinearnem modelu. Vprašljiva je smer delovanja sile na konzole, razmerje med vertikalno in horizontalno silo, pomemben pa je tudi dinamičen vpliv nihanja vodnikov, ki nastane pri odpadu žleda z vodnikov, ki ga pri analizi nismo upoštevali.

Uporaba metode v takšni obliki za obstoječe stebre verjetno ne bi bila smiselna, saj bi bilo potrebno zamenjati skoraj vse elemente, kar pa je z vidika izvedbe zelo zahteven projekt. Za novozgrajene daljnovodne stebre pa bi bilo smiselno izvesti analizo verjetnosti nastopa izredne obremenitve. Na podlagi tega bi lahko določili okvirne stroške, ki nastanejo upravljavcem zaradi pojava takšnih izrednih situacij v življenjski dobi konstrukcije. Nato bi bilo potrebno izvesti stroškovno analizo, s katero bi potrdili ali ovrgli ekonomsko upravičenost postavitve daljnovodnih stebrov projektiranih po MNN. Morali bi torej ugotoviti, ali se sploh izplača postaviti tako projektirane daljnovodne stebre, ki imajo zaradi omenjenega povečanja mase konstrukcije višjo ceno, kot stebri projektirani na podlagi linearno-elastične analize.

## 8 ZAKLJUČKI

V splošnem delu diplome so bili predstavljeni vzroki za porušitev daljnovodnih stebrov. Najpogostejši vzroki porušitev so povečani vplivi glede na projektno stanje zaradi pojava izrednih klimatskih razmer (žled, veter). Precej porušitev pa je bilo v preteklosti tudi zaradi napak pri projektiranju, napak pri izdelavi konstrukcij in slabega rednega vzdrževanja. Največkrat do porušitve pride zaradi kombinacije večih negativnih vzrokov. Obstaja več pristopov za varovanje daljnovodnih stebrov pred poružitvijo zaradi obtežbe z žledom. Veliko število opisanih metod zaščite pred rušitvami stebrov zaradi žleda kaže na to, da je zaledenitev vodnikov velik problem za upravljavce daljnovodov, ki skušajo s temi metodami omiliti poškodbe in zmanjšati stroške rekonstrukcije.

V praktičnem delu smo statično preverili obstoječ nosilni daljnovodni steber NC74 glede na nov predpis SIST EN 50341-1. Poudariti moramo, da novi predpisi določajo nekatere obtežne kombinacije, ki določijo večje obremenitve na steber glede na jugoslovanski pravilnik, kar posledično pomeni tudi večje osne sile v elementih. Prirastek osnih sil se pojavi zaradi:

- večje obtežbe z vetrom in žledom kot v jugoslovanskem pravilniku
- nove kombinacije C z obtežbo vetra pod kotom  $45^\circ$
- nove kombinacije K z neenakomernim žledom, ki povzroči upogib stebra vzdolž daljnovoda

Ugotovljeno je bilo, da nekatere diagonale na obravnavanem stebru ne ustrezajo nosilnosti. Neustrezne diagonale smo zamenjali z močnejšimi kotniki. Preverjeni so bili členkasti spoji med diagonalami in vogalniki. Strižna nosilnost nekaterih vijakov, ki so uporabljeni v obravnavani konstrukciji je bila prekoračena. Potrebno bi bilo uporabiti vijake višjega trdnostnega razreda.

Izvedli smo več nelinearnih analiz do porušitve, s katerimi smo ugotovili varnost proti poružitvi glede na projektno obtežbo za kombinacije z žledom in določili porušni mehanizem. Za primer torzijske obremenitve smo ugotovili, da je dodatna nosilnost zaradi prerazporejanja obremenitve minimalna. Od prve plastifikacije do porušitve stebra je potrebna majhna sila. Dosežena varnost glede na projektno obtežbo je zato v veliki meri posledica rezerve nosilnosti elementov v elastičnem projektne stanju. Pri izvedbi nelinearnih analiz je bilo upoštevano veliko predpostavk, zaradi česar lahko rezultate uporabimo le kot oceno »dejanske« nosilnosti stebrov. Faktorji, ki najbolj vplivajo na rezultat analize, so pomanjkanje pravil glede modeliranja materialne nelinearnosti, neupoštevanje togosti in nosilnosti spojev, upoštevanje nominalnih karakteristik materiala in numerično nestabilen račun potisne analize. Na obnašanje konstrukcije pa ima velik vpliv tudi nihanje vodnikov, ki se pojavi zaradi odpadanja žleda. Za bolj natančen opis obnašanja konstrukcije ob izredni obtežbi z žledom, bi morali izvesti nelinearno dinamično analizo. Kljub temu pa so rezultati relativno zgovorni in pričajo o tem, da lahko prekoračitev projektne obtežbe z žledom pomeni hipno porušitev stebra.



Metoda načrtovanja nosilnosti je bila izvedena na idejni ravni. Uporabili smo enak pristop kot v primeru načrtovanja potresnoodpornih konstrukcij. Z nelinearnimi analizami smo pokazali, da so konzole na obstoječem stebru na horizontalno obtežbo veliko bolj nosilne kot trup stebra. Zaradi tega preprojektiranje obstoječe konstrukcije z uporabo MNN precej težko izvedljivo, saj moramo elemente na konzoli oslabiti, elemente na trupu stebra pa utrditi. Izkazalo se je namreč, da so projektne notranje sile v varovanih elementih z računom po MNN bistveno večje kot v primeru konvencionalnega projektiranja takšnih konstrukcij. V primeru izbranega vogalnika se notranje sile povečajo kar za 145% v primerjavi s projektno obtežbo v skladu z obstoječim standardom, v primeru diagonale pa za 51%. V obeh elementih smo morali izbrati za 2 razreda močnejše kotnike kot so bili določeni po obstoječem standardu. Zaradi uporabe MNN smo morali povečati dimenzije praktično vseh elementov. S takim projektiranjem se je masa konstrukcije povečala za 14%.

Z metodo načrtovanja nosilnosti smo dosegli, da se v primeru pojava ekstremne horizontalne obtežbe zaradi žleda poruši konzola, palični steber pa ostane nepoškodovan. Tako se konstrukcija poruši le lokalno, kar bistveno zmanjša stroške vzpostavitve obratovanja daljnovoda. Za obstoječe daljnovodne stebre uporaba MNN verjetno ne bi bila primerna zaradi težav z izvedbo, saj bi bila zamenjava profilov na obstoječem stebru zahteven projekt. Za uporabo metode na novozgrajenih stebrih pa bi bilo potrebno predhodno izvesti stroškovno analizo, s katero bi potrdili ali ovrgli ekonomsko upravičenost postavitve tako projektiranih stebrov. Z uvedbo takega principa smo skušali spodbuditi, da bi se v prihodnosti več pozornosti posvetilo optimizaciji konstrukcije na ta način, da bi bilo tveganje za izgube zaradi potencialnih vplivov iz okolja čim manjše.

**VIRI**

Allaire, M.A., Laforte, J.L., Laflamme, J. 1998. State-of-the-art on power line de-icing. Atmospheric Research 46, 1-2: 143-158.

Baer, W., Bettge D., Häcker, R., Klingbeil, D., Klinger, C., Mehdiانpour, M. 2011. Failure analysis on collapsed towers of overhead electrical lines in the region Münsterland (Germany) 2005. Engineering failure analysis 18, 7: 1873-1883.

Basin Electric. 2010. Ice and wind take a toll on Basin Electric transmission lines  
<http://basinelectric.wordpress.com/2010/01/25/ice-and-wind-take-a-toll-on-basin-electric-transmission-lines/> (Pridobljeno 18.3.2012.)

Beg, D. (ur.), Pogačnik, A. (ur.). 2009. Projektiranje gradbenih konstrukcij po Evrokod standardih. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije: 1077 str.

Bonča, M. 2010. Ocena potresnega tveganja za izbrane jeklene stavbe. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Bonča): 94 f.

CIGRE. 2007. State of the art of conductor galloping.  
<http://www.docstoc.com/docs/22826507/State-of-the-art-of-conductor-galloping> (Pridobljeno 25.2.2012.)

CSI. 2010. Eurocode 3-1:2005 with Eurocode 8:2004 Steel Frame Design Manual for SAP 2000. Berkeley, Computers & Structures: 83 str.

Dolšek, M. 2004. Opis in primer nelinearne statične analize s programom SAP ali ETABS. Študijsko gradivo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FGG: 20 str.

Farzaneh, M. 2008. Atmospheric icing of power networks. Dordrecht, Springer: 180 str.

FEMA 356, 2000. Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings.

IBE. 2010. Dokumentacija za razpis JN2806/2010. Demontaža in rušenje obstoječega daljnovoda, gradbena dela in montaža jeklenih konstrukcij.

[http://nt-intp.eles.si/portal/page/portal/Eles\\_partnerji/Javna%20naro%20naro%20naro%20naro](http://nt-intp.eles.si/portal/page/portal/Eles_partnerji/Javna%20naro%20naro%20naro%20naro) (Pridobljeno 19.4.2012.)

Manitoba Hydro. 2012. Ice melting and ice-rolling.  
[http://www.hydro.mb.ca/safety\\_and\\_education/emergencies/ice\\_rolling.shtml](http://www.hydro.mb.ca/safety_and_education/emergencies/ice_rolling.shtml) (Pridobljeno 25.3.2012.)

Pravilnik o tehničnih normativih za graditev nadzemnih elektroenergetskih vodov z nazivno napetostjo od 1 kV do 400 kV. Uradni list SFRJ št. 65/88.

Rebolj, J. 2002. Zasnova 400 kV daljnovodnih stebrov v luči novih evropskih predpisov. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba J. Rebolj): 69 f.

Siemens. 2006. Pictures of the Future Spring 2006.

[http://www.siemens.com/innovation/en/publikationen/publications\\_pof/pof\\_spring\\_2006/infrastructures\\_articles/security.htm](http://www.siemens.com/innovation/en/publikationen/publications_pof/pof_spring_2006/infrastructures_articles/security.htm) (Pridobljeno 15.3.2012.)

SIST EN 1993-1-1:2005. Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe.

SIST EN 50341-1:2002. Nadzemni električni vodi za izmenične napetosti nad 45 kV – 1.del: Splošne zahteve – Skupna določila. Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo: 204 str.

SIST EN 50341-3-21:2009. Nadzemni električni vodi za izmenične napetosti nad 45 kV – 3-21.del: Nacionalno normativna določila (NNA) za državo Slovenijo (na podlagi SIST EN 50341-1:2002). Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo: 44 str.

Tian, L., Hongnan, L., Guohuan, L. 2010. Seismic response of power transmission tower-line system subjected to spatially varying ground motions. *Mathematical problems in engineering*: 1-20.  
doi:10.1155/2010/587317

Wallner, R. 2012. Uporaba programa SAP 2000 za projektiranje jeklenih okvirnih stavb po standardu Evrokod 8. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba R. Wallner): 83 f.

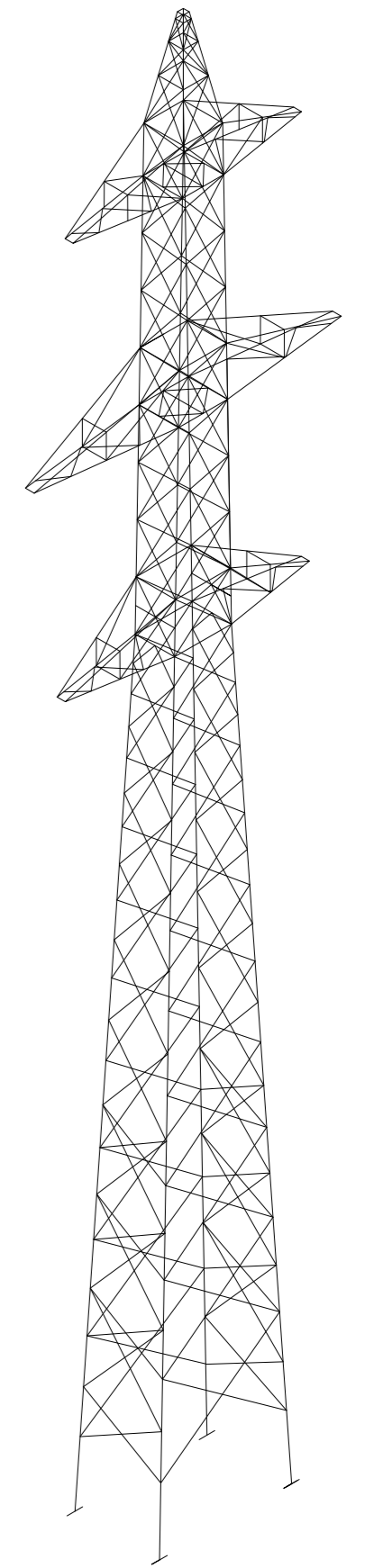
Zadnik, B. 2006. Fenomen žleda in njegov vpliv na objekte za prenos električne energije. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 55 str.



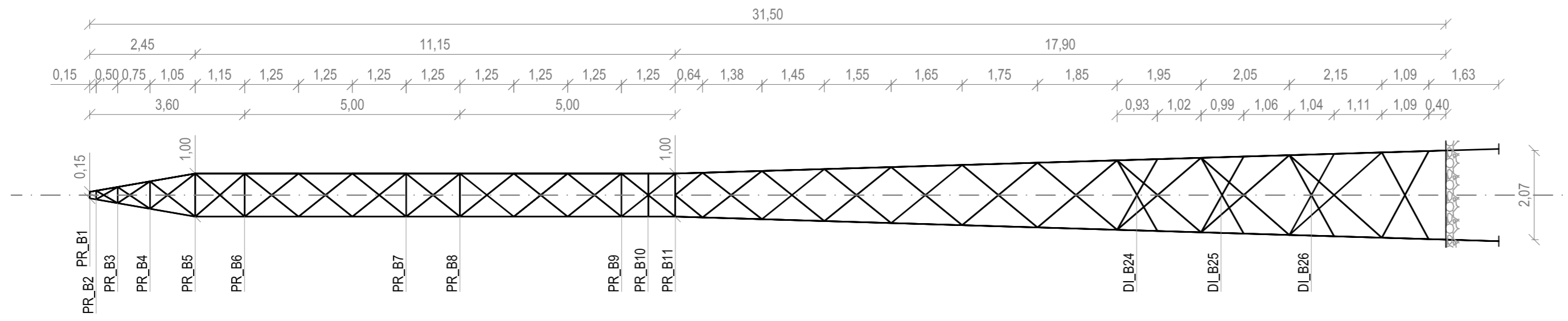
## **SEZNAM PRILOG**

<b>PRILOGA A: Načrt nosilnega daljnovodnega stebra NC74.....</b>	<b>A1</b>
------------------------------------------------------------------	-----------

## **PRILOGA A: Načrt nosilnega daljnovodnega stebra NC74 – statični model**

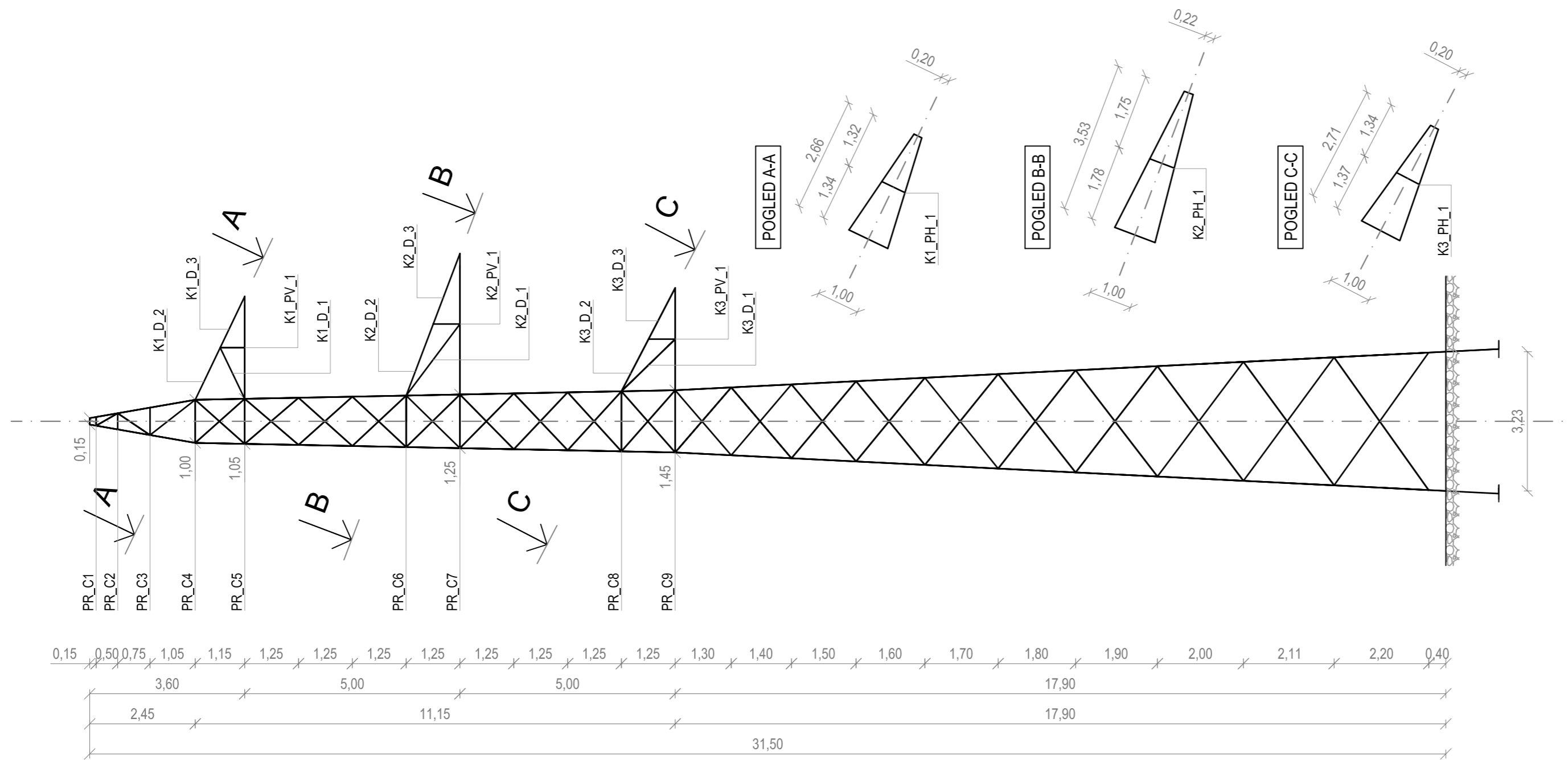


BOČNA STENA

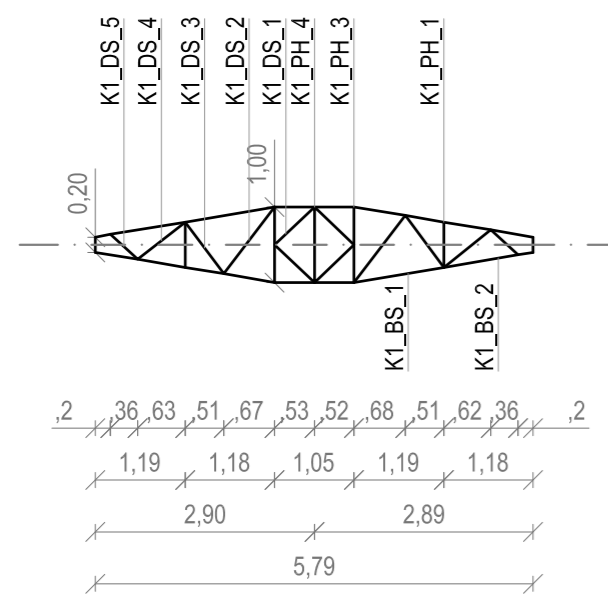


OZNAKE ELEMENTOV	DIAGONALE - bočna stena
DI_B1	Vog1
DI_B2	Vog2
DI_B3	Vog3
DI_B4	Vog4
DI_B5	Vog5
DI_B6	Vog6
DI_B7	Vog7
DI_B8	Vog8
DI_B9	Vog9
DI_B10	Vog10
DI_B11	Vog11
DI_B12	Vog12
DI_B13	Vog13
DI_B14	Vog14
DI_B15	Vog15
DI_B16	Vog16
DI_B17	Vog17
DI_B18	Vog18
DI_B19	Vog19
DI_B20	Vog20
DI_B21	Vog21
DI_B22	Vog22
DI_B23	
	DIAGONALE - čelna stena
DI_C1	
DI_C2	
DI_C3	
DI_C4	
DI_C5	
DI_C6	
DI_C7	
DI_C8	
DI_C9	
DI_C10	
DI_C11	
DI_C12	
DI_C13	
DI_C14	
DI_C15	
DI_C16	
DI_C17	
DI_C18	
DI_C19	
DI_C20	
DI_C21	
DI_C22	

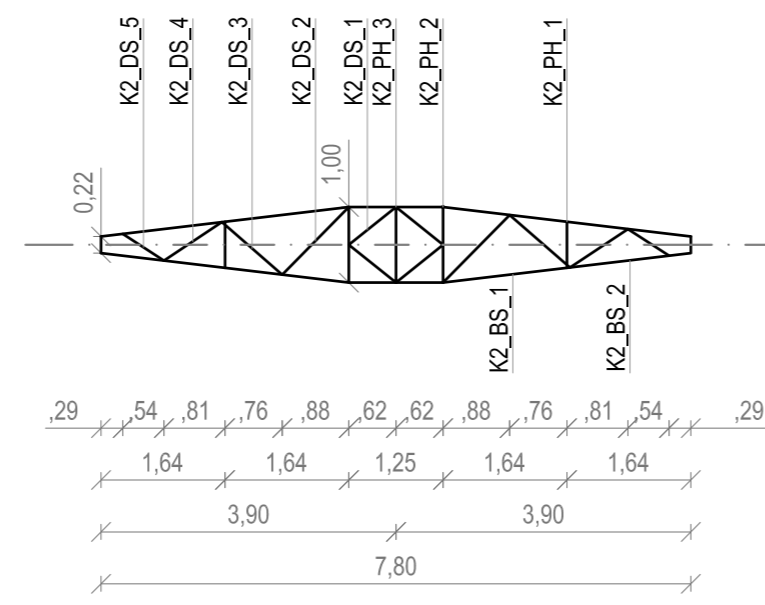
ČELNA STENA



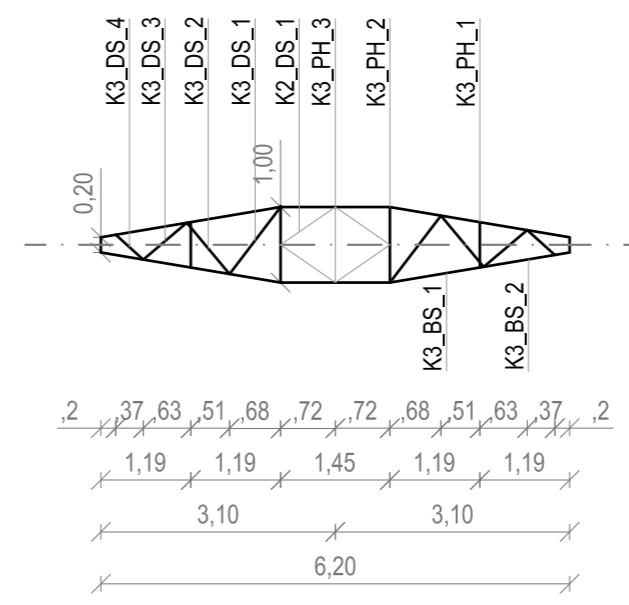
ZGORNJA KONZOLA



SREDNJA KONZOLA



SPODNJA KONZOLA



**FGG** Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo  
Ljubljana  
Slovenija

diplomant: Boris Azinovič  
vpisna številka: 26108492  
datum: september 2012

projekt: Diplomaska naloga

objekt: DALJNOVOD 2 x 110 kV  
vsebina: Nosilni steber NC74  
načrt: Statični model

merilo: 1:100

št. lista: **A1**