

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ**



**PROJEKTOVÁNÍ ELEKTRICKÉHO VEDENÍ
VYSOKÉHO NAPĚTÍ**

**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

MICHAL PAULOVÍČ

VEDOUCÍ PRÁCE: MGR. ING. VÍT KLEIN, PH.D.

2022



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Paulovič** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **492168**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Projektování elektrického vedení vysokého napětí

Název bakalářské práce anglicky:

Design of high voltage power lines

Pokyny pro vypracování:

- 1) Typy elektrických vedení vysokého napětí.
- 2) Dimenzování elektrického vedení vysokého napětí.
- 3) Návrh elektrického vedení vysokého napětí.
- 4) Rozpočet stavby elektrického vedení vysokého napětí.

Seznam doporučené literatury:

- 1) ČSN EN 50341-1. Elektrická venkovní vedení s napětím nad AC 1 kV – Část 1: Obecné požadavky – Společné specifikace. 2. vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013, 230 s.
- 2) MERTLOVÁ, Jiřina a Lucie NOHÁČOVÁ. Elektrické stanice a vedení. V Plzni: Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická, 2008. ISBN 978-80-7043-724-7
- 3) ORSÁGOVÁ, Jaroslava. Elektrické stanice a vedení. Brno: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně, 2013, 145 s.
- 4) TLUSTÝ, Josef a kol. Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04939-6.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D. katedra elektroenergetiky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **08.02.2022** Termín odevzdání bakalářské práce: **20.05.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2023**

Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval panu Mgr. Ing. Vítu Kleinovi, Ph.D., za vstřícný přístup a velmi cenné rady. Následně bych rád poděkoval panu Ing. Tomáši Poulouvi ze společnosti ČEZ Distribuce, a.s. a mému otci Michalu Paulovičovi za cenné technické rady v oblasti projektování na vysokých i nízkých napětích. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své ženě Nicole Paulovičové za nepolevující podporu v průběhu psaní této práce.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 14. května 2022

.....

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá projektováním elektrického vedení vysokého napětí. Je rozdělena na čtyři kapitoly: První dvě jsou teoretické a poslední dvě praktické. Teoretické kapitoly se zabývají typy elektrických vedení vysokého napětí a jejich následných dimenzování. V praktické části byly následně provedeny výpočty spojeny s návrhem elektrického vedení vysokého napětí a rozpočtem stavby elektrického vedení vysokého napětí.

Klíčová slova:

Vedení vysokého napětí, návrh vedení vysokého napětí

ABSTRACT

My Bachelor thesis is about projecting high-voltage grid. This thesis is divided to four main chapters. First two chapters are theoretical and last two chapters are practical. My theoretical chapters are about different types of high-voltage grids and about proper electrical conductor sizing. My practical chapters are about calculations attached to projecting high-voltage grid. These calculations are mainly electrical, mechanical and economic.

Key words:

High-voltage grid, projecting high-voltage grid

OBSAH

Úvod.....	1
Kapitola 1: Typy Elektrických vedení vysokého napětí	2
1.1 Linky vysokého napětí	2
1.2 Podpěrné body	2
1.2.1 Dřevěné sloupy.....	2
1.2.2 Betonové sloupy.....	3
1.2.3 Příhradové stožáry.....	3
1.2.3.1 Dělení příhradových stožárů podle provedení konstrukce	3
1.2.3.2 Obvyklé parametry příhradových stožárů	4
1.3 Vodiče pro vedení vysokého napětí	4
1.3.1 Vodiče pro venkovní vedení	4
1.4 Konzole pro vedení vysokého napětí	5
Kapitola 2: Dimenzování elektrického vedení vysokého napětí	7
2.1 Výpočet řetězovky	7
2.2 Výpočet průhybů vodičů vedení.....	8
2.3 Výpočet namáhání vodičů v závěsném bodě	10
2.4 Výpočet vnějších tahů působících na podpěrný bod.....	11
2.5 Výpočet tahů vodičů působících na podpěrný bod	13
2.6 Dimenzování vodiče vedení vysokého napětí z elektrického hlediska.....	16
2.6.1 Maximální dovolená teplota.....	16
2.6.2 Maximální dovolené úbytky napětí.....	17
2.6.3 Hospodárnost průřezu.....	18
Kapitola 3: návrh elektrického vedení vysokého napětí	20
3.1 Zadání pro návrh elektrického vedení vysokého napětí	20
3.2 Nejkratší povolené vzdálenosti vodičů.....	22
3.2.1 Nejkratší vnitřní povolené vzdálenosti vodičů	22
3.2.2 Nejkratší vnější povolené vzdálenosti vodičů.....	23
3.3 Návrh umístění vodičů na příhradové stožáry	23
Kapitola 4: Rozpočet stavby elektrického vedení vysokého napětí.....	28
Závěr	29
Seznam použité literatury	31
Příloha1	18

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Schéma znázorňující typy linek	2
Obr. 2: Možná provedení VN stožárů	3
Obr. 3: Příčný průřez AIFe lana	5
Obr. 4: Konzole často užívané na betonových sloupech	5
Obr. 5: Vybrané typy konzolí pro příhradové stožáry	6
Obr. 6: Znázornění řetězovky a jejích parametrů	7
Obr. 7 Schéma podpěrných bodů s převýšením h	9
Obr. 8: Znázornění hlavních os stožáru X-X a Y-Y při pohledu ze shora	14
Obr. 9: Půdorys projektované tras	20
Obr. 10: Mapa námrazových oblastí	20
Obr. 11: Ilustrační obrázek prováděných výpočtů	26

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Parametry příhradových stožárů ²	4
Tabulka 2: Parametry vodiče vybraného k návrhu.....	21
Tabulka 3: Tabulkové hodnoty nejkratších vnitřních vzdáleností.....	23
Tabulka 4: Tabulkové hodnoty nejkratších vnějších vzdáleností.....	23
Tabulka 5: Nejkratší vnější povolené vzdálenosti pro vybrané situace.....	23
Tabulka 6: Seznam možných položek rozpočtu s cenami.....	28

ÚVOD

Elektrické vedení vysokého napětí je v dnešní době jedním z důležitých pilířů distribuce elektrické energie. Elektrické vedení vysokého napětí je možné vést na místech, kde by již instalace velmi vysokého napětí nebyla bezpečná, ale zároveň je možné udržovat nízké ztráty na vedení. Z tohoto důvodu je dle mého názoru vhodné toto téma hlouběji rozebrat.

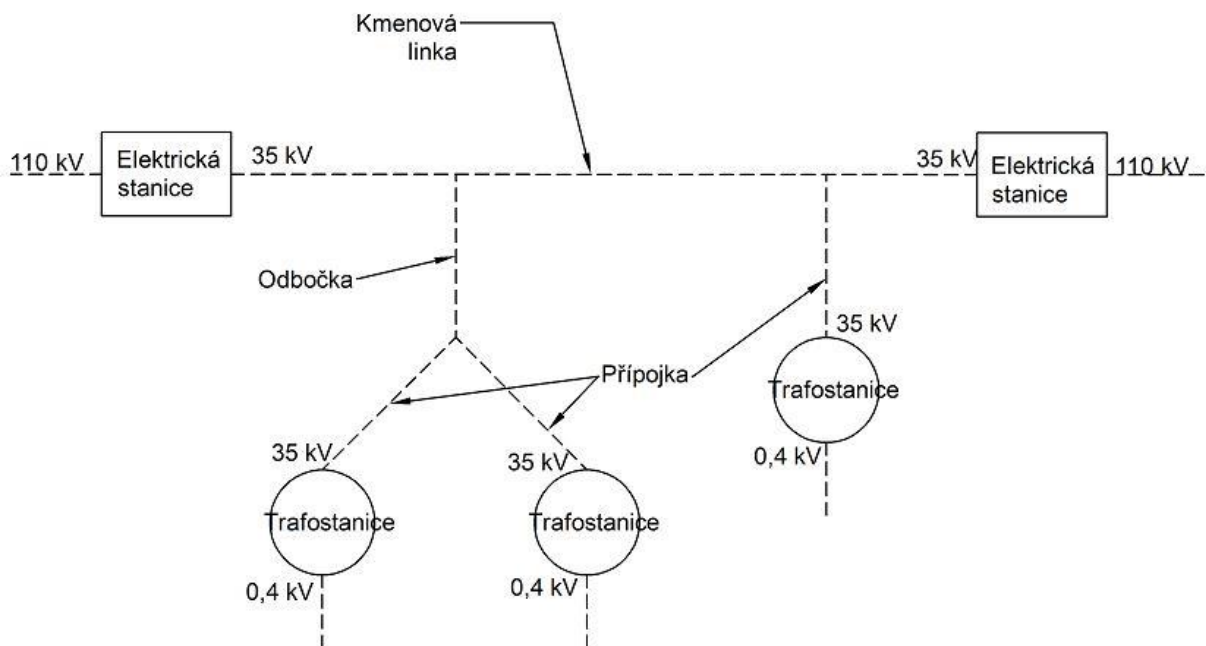
V mé bakalářské práci se budu zabývat samotným návrhem elektrického vedení vysokého napětí na lince spojující města Týniště nad Orlicí a Třebechovice pod Orebem v Královehradeckém kraji. Je potřebné zmínit, že vedení nejen v Královehradeckém kraji jsou vedena na jmenovitých napětích 35 kV. Z tohoto důvodu je možné projektovat linky na delší vzdálenosti než v případě vedení s napětím 22 kV. Vedení je v určeném úseku jednoduché a ve zbytku úseku zdvojené. Stávající vedení na této trase bylo realizováno v padesátých letech minulého století, a tudíž by mělo dojít k plné rekonstrukci vedení a stožárů.

KAPITOLA 1: TYPY ELEKTRICKÝCH VEDENÍ VYSOKÉHO NAPĚTÍ

1.1 Linky vysokého napětí

Vedení vysokého napětí bývají vedeny v tzv. linkách, které následně vytváří samotnou energetickou síť. Linky je možné dělit například podle násobnosti N , kde za násobnost N označují počet trojfázových vedení na projektované trase. Linka vysokého napětí tedy může být jednonásobná i vícenásobná, avšak v praxi se nejčastěji používají násobnosti $1 \leq N \leq 4$.

Dalším z možných dělení linky je dělení podle typu linky na kmenové linky, odbočky a přípojky. Kmenové linky jsou páteřní linky mezi elektrickými stanicemi, v mém případě se jednalo o linku mezi transformovny 110/35 kV Všestary a 110/35 kV Rychnov nad Kněžnou. Odbočky jsou vyvedené linky z kmenových linek nebo dalších odboček, zpravidla nejsou zakončeny pouze jednou trafostanicí. Z odboček jsou vyvedeny přípojky, kde každá přípojka vede pouze do jedné trafostanice.



Obr. 1: Schéma znázorňující typy linek

1.2 Podpěrné body

Podpěrné body jsou velice důležité při řešení nadzemního vedení vysokého napětí. Podpěrné body je možné dělit podle způsobu provedení na dřevěné sloupy, betonové sloupy a příhradové stožáry.

1.2.1 Dřevěné sloupy

Dřevěné sloupy jsou používány pouze ve vzácných případech, kdy jsou používány zejména z důvodu nepřístupného terénu pro těžkou techniku v realizované oblasti. Zároveň je možné použít dřevěné sloupy jako provizorní řešení do doby, kdy jsou nahrazeny dalším z typů podpěrných bodů. Dřevěné sloupy jsou obvykle vyráběny z jehličnatých dřevin, zejména ze smrku, jedle nebo borovice.¹

¹PNE 34 8210 *Dřevěné sloupy a dřevěné sloupy na patkách pro elektrická venkovní vedení do 45 kV*. Praha: České sdružení regulovaných elektroenergetických společností, 2004.

1.2.2 Betonové sloupy

Betonové sloupy se oproti tomu vyskytují výrazně častěji než sloupy dřevěné. Používají se zejména při projektování jednonásobných linek. Betonový sloup je kuželovitého tvaru, silnější část je nazývána patou sloupu a užší část je nazývána vrcholem sloupu. Betonové sloupy jsou obecně levnější než příhradové stožáry, ale jsou limitovány výškou a maximálním tahem. Pokud by bylo nutné dosáhnout větších výšek a namáhání podpěrného bodu, je nutné použít příhradové stožáry, kterým jsem se rozhodl věnovat detailněji, protože příhradové stožáry budou následně použity v samotném návrhu elektrického vedení vysokého napětí.

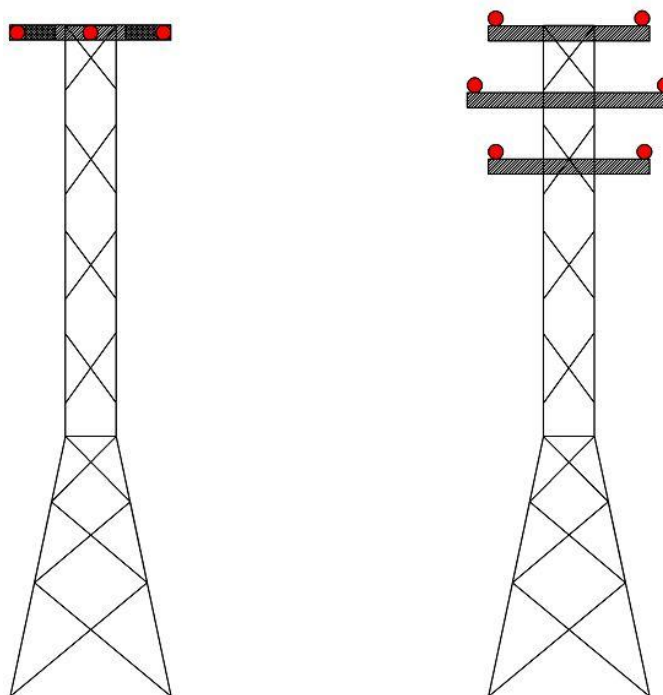
1.2.3 Příhradové stožáry

Příhradové stožáry jsou ve vedeních vysokého napětí čteně zastoupeny. Mohou být použity ve vícenásobných linkách, samotné konstrukce mohou dosahovat větších výšek a s tím spojených i větších namáhání.

1.2.3.1 Dělení příhradových stožárů podle provedení konstrukce

Konzole se na příhradové stožáry umísťují přišroubováním na příslušný stožár. Vhodná volba umístění konzole je součástí dimenzování a touto problematikou se budu zabývat ve druhé kapitole. V této kapitole se zaměřím na výčet typů stožárů, na které jsou určitým způsobem umísťovány konzole.

Pro vysoké napětí se při jednonásobném vedení používají zejména konzole ve vodorovné, nebo trojúhelníkové konfiguraci. U vícenásobných umístění je nejpoužívanějším umístěním typ soudek. Na Obr. 2 lze vidět možná provedení stožárů vysokého napětí. Na stožáru vpravo je znázorněna vodorovná konfigurace konzoly a na stožáru vpravo je znázorněno umístění typu soudek. V oblasti červeně zvýrazněných bodů se obvykle umísťují vodiče.



Obr. 2: Možná provedení VN stožárů

1.2.3.2 Obvyklé parametry příhradových stožárů

Příhradové stožáry se rozlišují podle hodnoty charakteristického zatížení vyvolaného vrcholovou silou a celkové délky².

Typová síla F [kN]	Typová délka příhradového stožáru l [m]						
12,0	12,0	13,5	15,0	16,5	18,0	21,0	24,0
20,0							
30,0							
40,0							
50,0							
60,0							
70,0							
80,0							

Tabulka 1: Parametry příhradových stožárů²

Z výpočtů zatížení vyvolaných vrcholovou silou a z výpočtů průhybů vodiče je možné zjistit vhodný stožár pro použití v projektované trase. Zároveň jsou na zvolených parametrech stožáru závislé další parametry potřebné při realizaci, které jsou například hloubka výkopu nebo volba vhodného betonového základu.

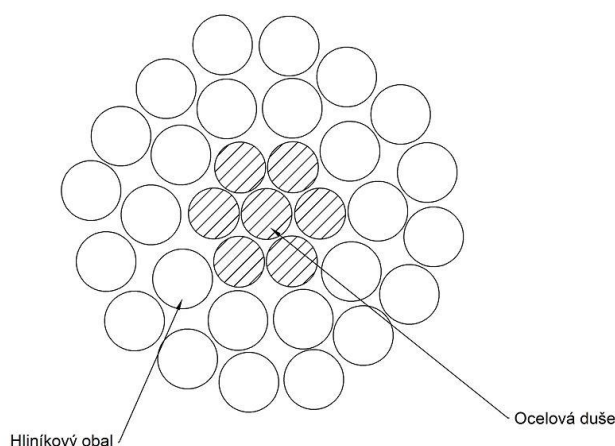
1.3 Vodiče pro vedení vysokého napětí

Vedení vysokého napětí je možné dělit podle typu použitých vodičů na kabelová vedení a venkovní vedení. V dnešní době je trendem používání kabelových vedení, protože jsou kabelová vedení méně závislá na okolních podmínkách. Použití kabelových vedení je také rozumnější volbou při vedení linky vysokého napětí hustě osídlenou oblastí, avšak navzdory těmto výhodám, oproti venkovním vedením mají kabelová vedení určité nevýhody. Kabelovými vedeními protékají vyšší kapacitní proudy, z tohoto důvodu se mohou používat pouze v místech, která mají ve své relativní blízkosti elektrickou stanici. V mém návrhu se bude vyskytovat pouze venkovní vedení v provedení AlFe lana typu 110-AL1/22ST1A. Z tohoto důvodu se v následující podkapitole budu zabývat vodiči pro venkovní vedení.

1.3.1 Vodiče pro venkovní vedení

Vodiče pro venkovní vedení bývají zpravidla konstruovány jako sláněná kruhová lana AlFe. Toto lano je vytvořeno ze dvou materiálů, oceli a hliníku. Ocelová část lana je umístěna ve středu vodiče a je označována jako duše, její hlavní funkcí je zejména plnění mechanických požadavků. Hliníková část lana je smotávána okolo duše ve formě menších hliníkových vodičů, které mají za úkol plnit zejména elektrické požadavky. Příčný průřez lana je možné vidět na Obr. 3

² PNE 34 8240 *Příhradové stožáry pro elektrická venkovní vedení do 45 kV*. Praha: České sdružení regulovaných elektroenergetických společností, 1994

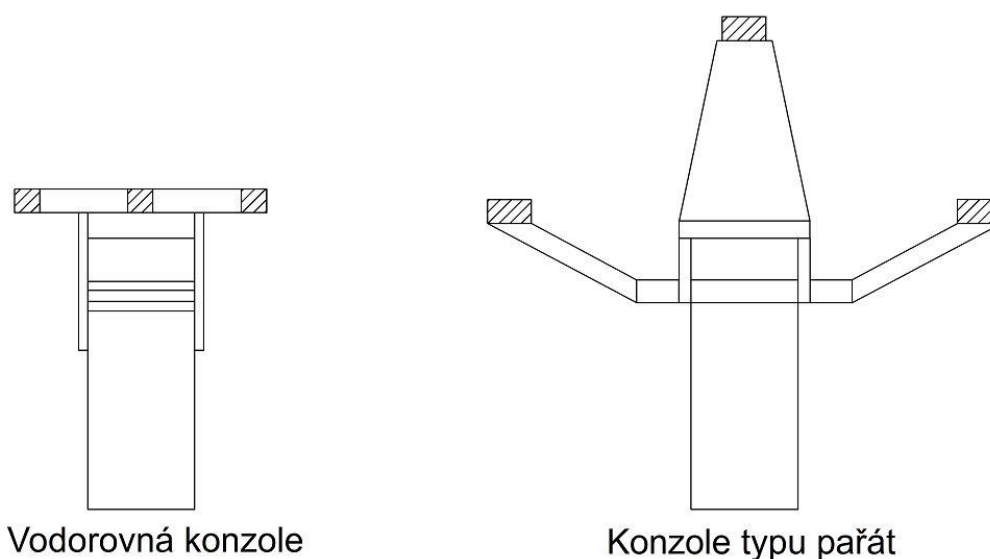


Obr. 3: Příčný průřez AlFe lana

V mém návrhu se bude vyskytovat pouze vodič typu 110-AL1/22ST1A. Číselnými označeními se rozumí matematické průřezy jednotlivých částí lana. V mém případě je matematický průřez hliníkového obalu $S_{AL} = 110 \text{ mm}^2$ a matematický průřez ocelové duše $S_{ST} = 22 \text{ mm}^2$. Poměr matematického průřezu hliníkového obalu vůči matematickému průřezu ocelové duše je roven pěti. Podle tohoto poměru lze toto lano přiřadit do skupiny lan AlFe 5. Vyrábějí se i lana jiných poměrů, značně častými poměry jsou lana typu AlFe 3, AlFe 4 a AlFe 6. Čím je poměr těchto ploch menší, tím je lano pevnější, je tedy vhodnější volbou v případech, kdy se vodič nachází ve vysoce námrazové oblasti nebo pokud jsou mezi stožáry pozorovány výrazně větší rozpětí. Jedinou nevýhodou těchto lan s nižším poměrem je vysoká náchylnost na chvění a kmitání. Tato kmitání způsobuje nárazový vítr, který rozkmitává lano. Vlivem kmitání může dojít k únavě materiálu. Míra kmitání se dá omezit instalací tlumičů vybrací.

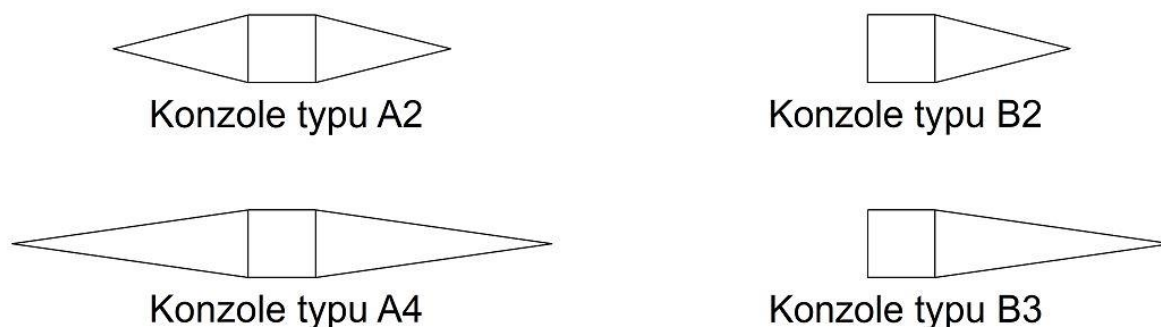
1.4 Konzole pro vedení vysokého napětí

Konzole slouží k upevnění jednoduchých vodičů, závěsných kabelů, kabelových svodů nebo optických kabelů¹. Konzole je možné umísťovat na podpěrné body nebo stěny budov. Zároveň se konstrukce konzoly často mění v závislosti na typu podpěrného bodu. Například nejčastějšími konstrukcemi konzol používaných na betonových sloupech jsou vodorovné konzole nebo konzole typu pařát.



Obr. 4: Konzole často užívané na betonových sloupech

Na rozdíl od betonových sloupů lze na příhradových stožárech umísťovat konzole i mimo vrchol. Díky tomu lze libovolně měnit vzdálenosti mezi jednotlivými vodiči nebo mezi vodičem a stožárem s použitím pouze jednoho typu konzole. Na vrchol stožáru je stále možné umístit vodorovnou konzoli, avšak konzola pařát je v případě příhradových stožárů nahrazena konzolemi s konstrukcí podobnou samotnému příhradovému stožáru. Bokorys těchto konzolí je možné vidět na Obr. 2, půdorys těchto konzolí i s typologií je možné vidět na Obr. 5.



Obr. 5: Vybrané typy konzolí pro příhradové stožáry³

Konzole pro příhradové stožáry mohou být jednostranné (typy B1, B2, B3), oboustranné (typy A1, A2, A3, A4) nebo vrcholové (typ B0). Každý z těchto typů má specifickou délku ramen. Na stožár se následně umísťují konzole minimálně dvou rozdílných typů s rozdílnými délkami ramen, aby nemohla nastat situace, při které by vodiče byly přímo pod sebou a riziko přeskočení mezi těmito vodiči by bylo výrazně vyšší. Konzole se ke stožárům montují přišroubováním, nebo přivařením. Pokud je konzole montována přišroubováním, je nutné stožár předpřipravit navrtáním děr v předepsaných místech, které jsou navrženy projektantem.

³ PNE 34 8240 *Příhradové stožáry pro elektrická venkovní vedení do 45 kV*. Praha: České sdružení regulovaných elektroenergetických společností, 1994

KAPITOLA 2: DIMENZOVÁNÍ ELEKTRICKÉHO VEDENÍ VYSOKÉHO NAPĚTÍ

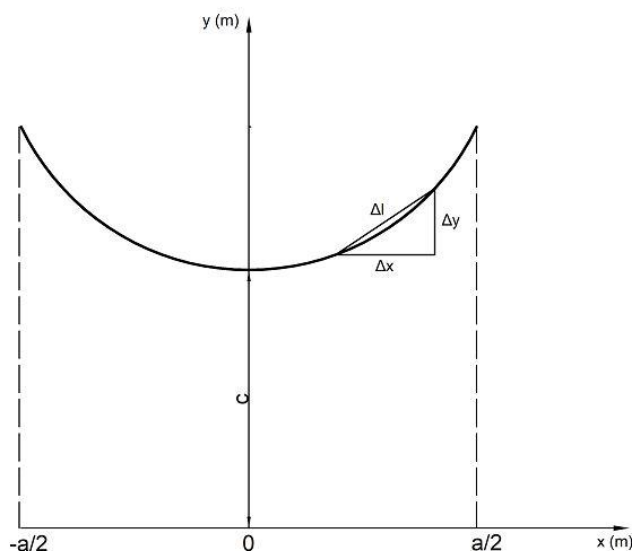
V této kapitole byly použity vzorce, které jsem čerpal ze skript určených pro školení projektantů s názvem Projektování venkovních vedení VN od Ing. Jana Čemuse, Ing. Františka Adámka, Antonína Novotného, Ing. Karla Peřiny a Miroslava Ždycha⁴.

2.1 Výpočet řetězovky

Řetězovka je rovinná křivka. Vedení upnuté mezi dvěma podpěrnými body se vlivem tíhy prověsí a oblouk, který vznikne opisuje tvar řetězovky. Tato křivka je popsána funkcí ve vztahu (1).

$$y(x) = c \cdot \cosh \frac{x}{c} \quad (1)$$

kde veličina c [m] je parametrem řetězovky



Obr. 6: Znárodnění řetězovky a jejích parametrů

Pro výpočet délky zavěšeného vodiče l [m] byla provedena následující metoda. Na libovolném úseku vedení byl vytvořen dostatečně malý trojúhelník, jaký je možné vidět na Obr. 6. Pro element celkové délky Δl platí vztah (2).

$$\Delta l = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (2)$$

kde veličiny Δl [m], Δx [m] a Δy [m] jsou veličinami délky

Pro dostatečně malé délky úseček Δx a Δy je možné nahradit část řetězovky Δl úsečkou. Z tohoto důvodu lze počítat s totálními diferenciály těchto veličin.

Vztah (2) je tedy možné upravit do vztahu (3).

⁴ ČEMUS, Jan a kol. Projektování venkovních vedení VN. České energetické závody. Pardubice, 1971.

$$dl = \sqrt{dx^2 + dy^2}$$

(3)

kde veličiny dl [m], dx [m] a dy [m] jsou veličinami délky

Celková délka vedení l [m] je rovna součtu všech elementů dl [m].

$$\begin{aligned} l &= \int_{-a/2}^{a/2} dl = 2 \cdot \int_0^{a/2} dl = 2 \cdot \int_0^{a/2} \sqrt{dx^2 + dy^2} = \\ &= 2 \cdot \int_0^{a/2} \sqrt{dx^2 + \left(\frac{dy \cdot dx}{dx}\right)^2} = 2 \cdot \int_0^{a/2} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx = \\ &= 2 \cdot \int_0^{a/2} \sqrt{1 + \left(\frac{c \cdot \cosh \frac{x}{c}}{dx}\right)^2} dx = 2 \cdot \int_0^{a/2} \sqrt{1 + \left(\sinh \frac{x}{c}\right)^2} dx = \\ &= 2 \cdot \int_0^{a/2} \sqrt{\left(\cosh \frac{x}{c}\right)^2} dx = 2 \cdot \int_0^{a/2} \cosh \frac{x}{c} dx = \\ &= 2 \cdot \left[c \cdot \sinh \frac{x}{c} \right]_0^{a/2} = 2 \cdot \left(c \cdot \sinh \frac{a}{2 \cdot c} - c \cdot \sinh \frac{0}{c} \right) = \\ &= 2 \cdot c \cdot \sinh \frac{a}{2 \cdot c} \end{aligned}$$

(4)

kde veličina

a [m] je délka rozpětí mezi podpěrnými body

c [m] je parametrem řetězovky

Z rovnice (4) jsem zjistil, že je délka zavěšeného vodiče závislá pouze souřadnicové ose x . Z tohoto důvodu lze tento vztah použít v případech, kdy jsou závěsné body umístěny ve stejných výškách i v případech, kdy jsou závěsné body umístěny v rozdílných výškách. Ve chvíli, kdy jsou závěsné body v rozdílných výškách je ale navíc nutné vytvořit model vedení se závěsnými body ve stejných výškách a následně délku vodiče dopočítat podle rovnice (4).

2.2 Výpočet průhybů vodičů vedení

Při dimenzování vodičů je výpočet průhybů mezi podpěrnými body elektrického vedení jednou z nejdůležitějších činností. Výsledky z těchto výpočtů je možné použít k optimalizaci umístění podpěrných bodů na projektované trase. Průhyb f je výškovým rozdílem mezi závěsným bodem a bodem uprostřed rozpětí, kde je za závěsný bod požadováno místo, ve kterém je vedení upnuto ke konstrukci podpěrného bodu. Základní jednotkou průhybu f je metr. Průhyb f je závislý na délce rozpětí a [m], měrné tíze vodiče γ [N·mm⁻²·m⁻¹], přetížení vodiče z [-], na namáhání určeném kritickou teplotou vodiče σ_H [N·mm⁻²] a na převýšení mezi jednotlivými závěsnými body h [m]. Pro výpočet průhybů se navíc uvažují tyto meteorologické podmínky:

- 1) Okolní prostředí o teplotě 60 °C v bezvětří

2) Okolní prostředí -5 °C a na vodiči je navíc vytvořena námraza.

V situaci, kdy se závěsné body nachází ve stejné výšce platí vztah (5).

$$f = \frac{a^2 \cdot \gamma \cdot z}{8 \cdot \sigma_H \cdot g} [m]$$

(5)

kde veličina

$f [m]$ je průhyb vedení

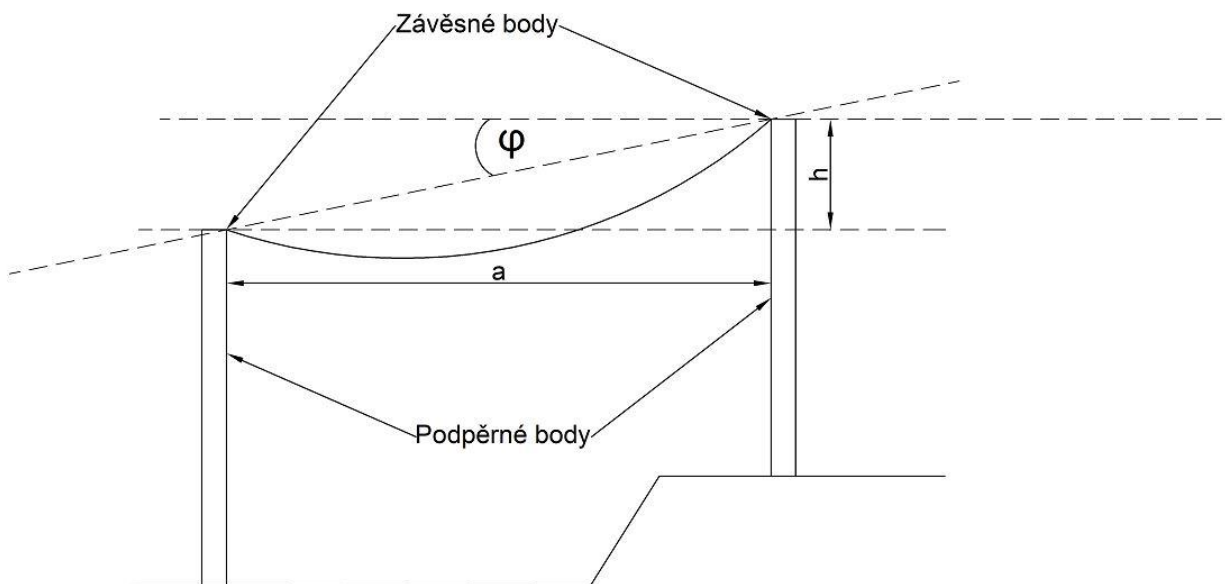
$a [m]$ je délka rozpětí

$\gamma [N \cdot mm^2 \cdot m^{-1}]$ je měrná tíha vodiče

$z [-]$ je přetížení vodiče

$\sigma_H [N \cdot mm^{-2}]$ je namáhání určené kritickou teplotou

$g [-]$ je gravitační konstanta



Obr. 7 Schéma podpěrných bodů s převýšením h

V situaci, kdy se závěsné body nenacházejí ve stejné výšce neleze tento vztah použít ve všech případech. V případě, že $tg(\varphi) \leq \frac{h}{a} \leq 0,25$ lze použít vztah (5). V ostatních případech je již nutné použít vztah (6).

$$f = \frac{a^2 \cdot \gamma \cdot z}{8 \cdot \sigma_H \cdot g \cdot \cos \varphi}$$

(6)

kde veličina

$f [m]$ je průhyb vedení

$a [m]$ je délka rozpětí

$\gamma [N \cdot mm^{-2} \cdot m^{-1}]$ je měrná tíha vodiče

$z [-]$ je přetížení vodiče

$\sigma_H [N \cdot mm^{-2}]$ je namáhání určené kritickou teplotou

$g [-]$ je gravitační konstanta

2.3 Výpočet namáhání vodičů v závěsném bodě

Při zavěšení vodičů vedení dochází vlivem tíhy k jejich namáhání. Samotný vodič je nejvíce namáhán v místě uchycení, což je v tomto případě v závěsném bodě. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl provést výpočet pouze v tomto bodě, neboť při ošetření maximálního namáhání dojde k ošetření i nižších namáhání na zbytku vodiče.

Namáhání $\sigma [N \cdot mm^{-2}]$ závisí na namáhání určeném kritickou teplotou vodiče $\sigma_H [N \cdot mm^{-2}]$ a na vertikální složce namáhání $\sigma_V [N \cdot mm^{-2}]$. Pro výpočet namáhání se uvažují tyto krajní meteorologické podmínky:

- 1) Okolní prostředí o teplotě 60 °C v bezvětří
- 2) Okolní prostředí -5 °C a na vodiči je navíc vytvořena námraza.

Pro namáhání vodiče v závěsném bodě σ platí vztah (7) pro případ kdy se závěsné body nacházejí ve stejné výšce, ale i pro případ kdy se závěsné body nacházejí v různých výškách s převýšením h . Jediným rozdílem je výpočet vertikální složky namáhání σ_V , který je ukázán ve vztahu (8), ve vztahu (9) a ve vztahu (10).

$$\sigma = \sqrt{\sigma_H^2 + \sigma_V^2} \quad (7)$$

kde veličina

$\sigma [N \cdot mm^{-2}]$ je namáhání vodiče

$\sigma_H [N \cdot mm^{-2}]$ je horizontální složka namáhání

$\sigma_V [N \cdot mm^{-2}]$ je vertikální složka namáhání

Pro vertikální složku namáhání σ_V v případě, kdy jsou závěsné body ve stejné výšce, platí vztah (8) v obou závěsných bodech.

$$\sigma_V = \frac{a \cdot \gamma \cdot z}{2 \cdot g} \quad (8)$$

kde veličina

$a [m]$ je délka rozpětí

$\gamma [N \cdot mm^{-2} \cdot m^{-1}]$ je měrná tíha vodiče

$z [-]$ je přetížení vodiče

$g [-]$ je gravitační konstanta

Pro vertikální složku namáhání σ_V v případě, kdy jsou závěsné body v rozdílných výškách s převýšením h a průhybem f . Pokud je závěsný bod A položen níže než závěsný bod B, pro vertikální složku namáhání v závěsném bodě A σ_{VA} platí vztah (9).

$$\sigma_{VA} = \frac{a \cdot \gamma \cdot z}{2 \cdot g} \cdot \left(1 - \frac{h}{4 \cdot f \cdot \cos \varphi}\right)$$

(9)

kde veličina

$\sigma_{VA} [N \cdot mm^{-2}]$ je vertikální složka namáhání závěsného bodu A

$a [m]$ je délka rozpětí

$\gamma [N \cdot mm^{-2} \cdot m^{-1}]$ je měrná tíha vodiče

$z [-]$ je přetížení vodiče

$f [m]$ je průhyb vedení

$h [m]$ je převýšení mezi závěsnými body

$g [-]$ je gravitační konstanta

Pro vertikální složku namáhání v závěsném bodě B σ_{VA} platí vztah (10)

$$\sigma_{VB} = \frac{a \cdot \gamma \cdot z}{2 \cdot g} \cdot \left(1 + \frac{h}{4 \cdot f \cdot \cos \varphi}\right)$$

(10)

kde veličina

$\sigma_{VB} [N \cdot mm^{-2}]$ je vertikální složka namáhání závěsného bodu B

$a [m]$ je délka rozpětí

$\gamma [N \cdot mm^{-2} \cdot m^{-1}]$ je měrná tíha vodiče

$z [-]$ je přetížení vodiče

$f [m]$ je průhyb vedení

$h [m]$ je převýšení mezi závěsnými body

$g [-]$ je gravitační konstanta

2.4 Výpočet vnějších tahů působících na podpěrný bod

Na podpěrný bod, jenž je umístěn nezastavěné oblasti silově působí vnější přírodní vlivy a vodiče, kterými může být na podpěrný bod vyvíjen tah. Tento tah mezi podpěrnými body bývá nejkritičtější v místech, kde linka vedení svojí změnou směru vytváří kolmici a je zde nutné podpěrný bod na tahy připravit vhodným ukotvením k zemi. Následující pasáž bude věnována výpočtu při návrhu příhradového stožáru, avšak pro betonové a dřevěné sloupy dochází k podobným výpočtům s pouze rozdílným výpočtem tlaku větru T_v , kde se u sloupů navíc započítává plocha stožáru.

Při návrhu stožáru se využívá tzv. vrcholové síly t . Jedná se o náhradní sílu, která nahrazuje všechny síly působící na stožár v místě zavěšení vodičů do jednoho bodu na vrcholu stožáru. Vrcholovou sílu t je možné počítat buď pouze pro horní část stožáru nebo pro celý stožár. Vrcholová síla t je závislá na tlaku větru $V [N]$ působící na vybranou část konstrukce, na tlaku větru $T_v [N]$ působící na vodiče zavěšené na

stožáru, na výšce závěsných bodů nad referenční rovinou l_i [m] a na délce vybrané části konstrukce l [m].

Za referenční rovinu se v případě výpočtu vrcholové síly na horním dílu stožáru považuje rovina, ve které dochází k spoji mezi horním dílem stožáru a spodním dílem stožáru. V případě provádění výpočtů na celém stožáru se za referenční rovinu považuje místo, ve kterém dochází k upevnění se zemí.

Pro velikost tlaku větru na vodič platí vztah (11).

$$T_v = \frac{a_1 + a_2}{2 \cdot g} \cdot d \cdot P_v \quad (11)$$

kde veličina

T_v [N] je tlak větru působící na vodiče zavěšené na stožáru

a_1 [m] a a_2 [m] jsou rozpětí vedoucí k počítanému stožáru

d [m] je průměr vodiče

P_v [N·mm⁻²] je tabulková hodnota tlaku větru na vodič.

g [-] je gravitační konstanta

Výsledek ze vztahu (11) lze následně použít při výpočtu vrcholových sil. Pro vrcholovou sílu horního dílu stožáru t_{h2} platí vztah (12) a pro vrcholovou sílu celého stožáru t_{c2} platí vztah (13).

$$t_{h2} = V_h + \frac{1}{l_h} \sum_{i=3}^n (T_{Vi} + l_{ih}) \quad (12)$$

$$t_{c2} = V_c + \frac{1}{l_c} \sum_{i=3}^n (T_{Vi} + l_{ic}) \quad (13)$$

kde veličina

t_{h2} [N] je vrcholová síla vztažena na vrchní díl stožáru

t_{c2} [N] je vrcholová síla vztažena na celý stožár

V_h [N] je tlak větru na horní díl stožáru převedený na vrchol stožáru

V_c [N] je tlak větru na celý stožár převedený na vrchol stožáru

l_h [m] délka horního dílu

l_c [m] délka celého stožáru nad místem vetknutí do betonu

T_v [N] je tlak větru působící na vodiče zavěšené na stožáru

l_{ih} [m] výška závěsu vodičů nad místem horního a spodního dílu

$l_{ic} [m]$ výška závěsu vodičů nad místem vetknutí stožáru do betonu

$n [-]$ počet vodičů umístěných na stožáru

Na závěr proběhne porovnání s tabulkovými hodnotami, které vrcholová síla $t [N]$ nesmí přesáhnout.

2.5 Výpočet tahů vodičů působících na podpěrný bod

Na podpěrné body tahově působí kromě vnějších vlivů i samotné vodiče, jež jsou na podpěrných bodech upevněny. Tyto tahy se vyskytují zejména v chladných podmínkách, kdy dochází ke smršťování vodiče.

Pro výpočet tahů se uvažují tyto meteorologické podmínky:

- 1) Okolní prostředí o teplotě -30 °C
- 2) Okolní prostředí -5 °C a na vodiči je navíc vytvořena námraza

Pro tah vodiče T_a v podélném směru platí vztah (14).

$$T_a = \frac{s \cdot \sigma}{g} \quad (14)$$

kde veličina

$T_a [N]$ je tah vodiče

$s [mm^2]$ je průřez vodiče

$\sigma_H [N \cdot mm^{-2}]$ je namáhání při zvolené meteorologické podmínce a zvoleném materiálu vodiče.

$g [-]$ je gravitační konstanta

V případě podpěrných bodů, na kterých linka vedení zabočuje se výsledný tah T_s vypočítá v závislosti na lomu vedení α ve vztahu (15).

$$T_s = 2 \cdot T_a \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \quad (15)$$

kde veličina

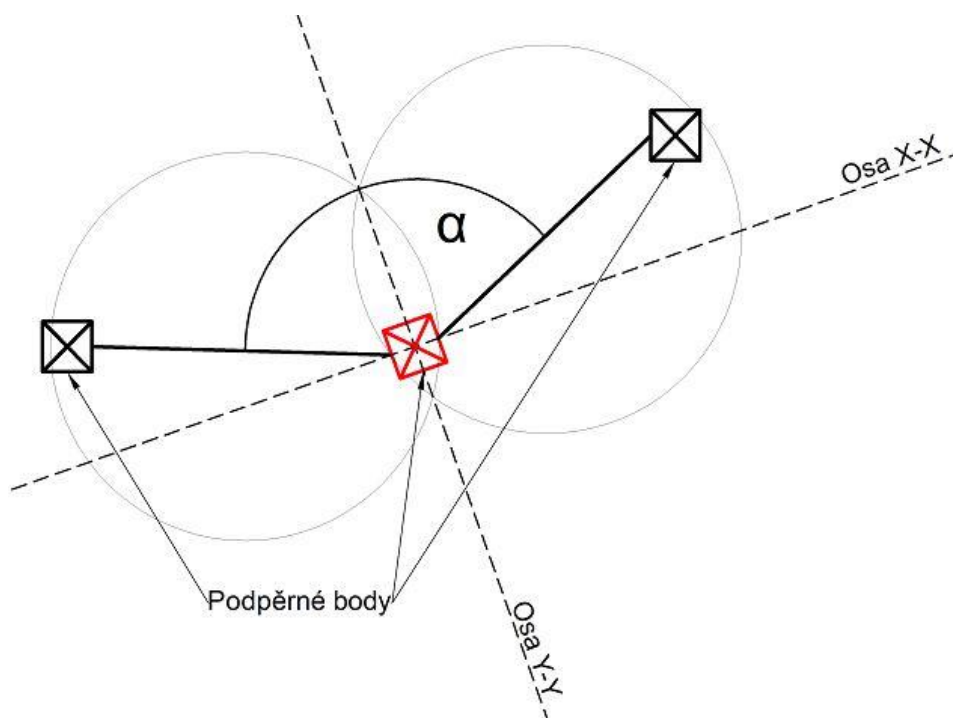
$T_s [N]$ je výsledný tah

$T_a [N]$ je tah vodiče

$\alpha [^\circ]$ je lom vedení

Tento vztah ovšem platí pouze za předpokladu, že jsou na obou stranách stožáru umístěny vodiče o stejném průřezu. Ve chvíli, kdy jsou na stožár umístěny vodiče v rozdílných průřezích nebo vyrobených z rozdílných materiálů, jsou výpočty výsledných tahů mnohem složitější.

Ze vztahu (15) vyplývá, že výslednice tahu T_s leží v ose úhlu lomu vedení α . Tato osa úhlu je totožná s hlavní osou stožáru Y-Y a kolmá na hlavní osu stožáru X-X. Tento vztah je možné vidět na Obr. 8, kde na červeně označeném podpěrném bodu je prováděn konkrétní výpočet.



Obr. 8: Znázornění hlavních os stožáru X-X a Y-Y při pohledu ze shora

Průmět do hlavní osy Y-Y T_s ve vztahu (16) je zobecněný vztah (15).

$$T_s = (T_{a1} + T_{a2}) \cdot \cos \frac{\alpha}{2}$$

(16)

kde veličina

$T_s [N]$ je výsledný tah v ose Y-Y

$T_{a1} [N]$ a $T_{a2} [N]$ jsou tahy vodičů jedné fáze o různém průřezu nebo materiálu

$\alpha [^\circ]$ je lom vedení

Průmět do hlavní osy X-X T'_s ve vztahu (17) je závislý na rozdílu mezi tahy T_{a1} a T_{a2} .

$$T'_s = (T_{a1} - T_{a2}) \cdot \sin \frac{\alpha}{2}$$

(17)

kde veličiny

$T'_s [N]$ je výsledný tah v ose X-X

$T_{a1} [N]$ a $T_{a2} [N]$ jsou tahy vodičů jedné fáze o různém průřezu nebo materiálu

$\alpha [^\circ]$ je lom vedení

Výslednice tahu vodičů působících na stožár T_i je podle vztahu (18) rovna součtu průmětů do těchto hlavních os.

$$T_i = T_s + T'_s$$

(18)

kde veličina

$T_i [N]$ je výslednice tahu vodičů působících na stožár

$T_s [N]$ je výsledný tah v ose Y-Y

$T_s' [N]$ je výsledný tah v ose X-X

Tuto výslednici lze následně použít pro výpočet vrcholových sil. Vrcholová síla horního dílu stožáru t_{h1} je vypočtena ze vztahu (19) a vrcholová síla celého stožáru t_{c1} je vypočtena ze vztahu (20).

$$t_{h1} = \frac{2}{3 \cdot l_h} \sum_{i=3}^n (T_{si} \cdot l_{ih}) \quad (19)$$

$$t_{c1} = \frac{2}{3 \cdot l_c} \sum_{i=3}^n (T_i \cdot l_{ic}) \quad (20)$$

kde veličina

$t_{h1} [N]$ je vrcholová síla vztažena na vrchní díl stožáru

$t_{c1} [N]$ je vrcholová síla vztažena na celý stožár

$l_h [m]$ délka horního dílu

$l_c [m]$ délka celého stožáru nad místem vetknutí do betonu

$T_i [N]$ je výslednice tahů vodičů působících na stožár

$T_{si} [N]$ je výslednice tahů vodičů působících na vrchní díl stožáru

$l_{ih} [m]$ výška závěsu vodičů nad místem horního a spodního dílu

$l_{ic} [m]$ výška závěsu vodičů nad místem vetknutí stožáru do betonu

$n [-]$ počet vodičů umístěných na stožáru

Při výpočtu tahů na stožáru je zároveň nutné brát v potaz možné přerušení vodiče dané fáze, při kterém by se výrazně změnil tah působící na stožár a mohlo by dojít při nevhodném dimenzování k poškození stožáru nebo výstroje stožáru.

Při přerušení vodiče dané fáze se z navrhovaného stožáru stane koncový stožár, a proto je na něm možné provést výpočet ze vztahu (14). Tahy nepřerušených fází zůstanou nezměněny.

2.6 Dimenzování vodiče vedení vysokého napětí z elektrického hlediska

V průběhu navrhování vedení je také nutné vhodně zvolit materiál, ze kterého je vodič vyroben a velikost průřezu vodiče. Mezi parametry, které jsou často brány v potaz patří maximální dovolená teplota vodiče, se kterou je spojena i maximální proudová zatížitelnost, vhodné mechanické vlastnosti, dostatečně malý úbytek napětí. Tyto parametry je zároveň potřeba splnit bez zbytečného plýtvání materiálu, jehož cena v dnešní době relativně rychle roste. V této části se budu zabývat pouze parametry dimenzování vodiče, které jsou ovlivňovány elektrickou energií procházející těmito vodiči. Těmito parametry jsou maximální dovolená teplota vodiče, úbytek napětí na vodiči a hospodárnost průřezu vodiče.

2.6.1 Maximální dovolená teplota

Teplota ovlivňuje vodič z mechanického, ale i z elektrotechnického hlediska. S rostoucí teplotou je například vodič ohebnější, zároveň se ale s teplotou zvyšuje odpor vodiče. Samotný vodič je zahříván teplem z okolního prostředí nebo průchodem elektrického proudu. Poměr energií podílejících se na ohřevu vodiče závisí na prostředí, ve kterém je vodič umístěn.

Pro teplo ohřívající vodič $Q [J]$ platí vztah (21).

$$Q = \int_0^{\tau} R \cdot i(t)^2 dt = R \cdot \int_0^{\tau} i(t)^2 dt \quad (21)$$

kde veličina

$R [\Omega]$ je elektrický odpor

$i(t) [A]$ je časově proměnný elektrický proud protékající vodičem

$\tau [s]$ je doba, po kterou docházelo k průchodu proudu vodičem

Pro efektivní hodnotu proudu $I_{ef} [A]$ platí vztah (22).

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{\int_0^{\tau} i(t)^2 dt}{\tau}} \quad (22)$$

Vztah (22) jsem upravil na vztah (23).

$$\tau \cdot I_{ef}^2 = \int_0^{\tau} i(t)^2 dt \quad (23)$$

Vztah (23) jsem následně dosadil do integrálu ve vztahu (21). Výsledkem byl vztah (24) popisující teplo $Q [J]$, které se uvolnilo při průtoku efektivní hodnoty proudu $I_{ef} [A]$.

$$Q = R \cdot \tau \cdot I_{ef}^2 \quad (24)$$

kde veličina

$R [\Omega]$ je elektrický odpor

$I_{ef}^2 [A]$ je efektivní hodnota elektrického proudu protékajícího vodičem

$\tau [s]$ je doba, po kterou docházelo k průchodu proudu vodičem

Ze vztahu (24) vyplývá, že teplo ohřívající vodič průchodem elektrického proudu je úměrný kvadrátu tohoto elektrického proudu. Teplota vodiče $\vartheta [^{\circ}C]$ se po určité chvíli ustálí na hodnotě ovlivněné způsobem uložení, teplotou okolí, případně množstvím odvodu tepla. Tato teplota nesmí přesáhnout maximální dovolenou teplotu $\vartheta_{max} [^{\circ}C]$, pro maximální provozní proud protékající vodičem $I_P [A]$ platí vztah (25).

$$I_P = \sqrt{\frac{\vartheta_{max}}{T \cdot R}}$$

(25)

kde veličina

$\vartheta_{max} [^{\circ}C]$ je maximální povolená teplota vodiče

$T [m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$ tepelný odpor mezi vodičem a okolním prostředím

$R [\Omega]$ je elektrický odpor vodiče

Vztah (25) není zcela přesný, jelikož ve vodiči může docházet například ke skin efektu, jehož důsledkem je nárůst elektrického odporu nebo dalším ztrátám. Všechny hodnoty v tomto vztahu jsou tedy tabulkové a při navrhování je vhodné brát tento vztah s rezervou.

V tabulkách je někdy možné najít přímo hodnoty elektrických proudů, které je schopen daný vodič přenášet. V situaci, kdy je známa jmenovitá hodnota elektrického proudu ve vodiči, jsou tyto hodnoty velice cenné, ale je nutné tuto jmenovitou hodnotu přepočítat korekčními koeficienty k . Korekčních koeficientů $k [-]$ je několik druhů, které popisují chování vodiče v předem známém prostředí. Existuje například korekční koeficient popisující způsob uložení vodiče, teplotu okolního prostředí, uspořádání více vodičů do svazku nebo podle půdních typů. Tyto faktory se projevují na výsledném provozním elektrickém proudu $I_P [A]$, podle kterého je vybírán vodič. Elektrický proud I_P vodičem při standardních provozních podmínkách protékat nebude. Je to pouze náhradní veličina jmenovitého elektrického proudu I_N , jehož hodnota protékala vodičem v laboratorních podmínkách.

2.6.2 Maximální dovolené úbytky napětí

Úbytky napětí na vodiči vznikají z důvodu protékajícího elektrického proudu vodičem. Velikost úbytku napětí $\Delta U [V]$ lze vypočítat z Ohmova zákona ve vztahu (26).

$$\Delta U = I \cdot R$$

(26)

kde veličina

$R [\Omega]$ je elektrický odpor

$I [A]$ je elektrický proud protékající vodičem

Tento úbytek je následně porovnáván s napětím přivedeným na vedení $U (V)$ ve vztahu (27).

$$\Delta u_{\%} = \frac{\Delta U}{U_c} \cdot 100 \quad (27)$$

kde veličiny

$\Delta u_{\%} [-]$ je poměr úbytku napětí na napětí přivedeným na vedení

$\Delta U [V]$ je úbytek na napětí na vedení

$U_c [V]$ je napětí přivedené na vedení

Tento poměr následně bývá porovnáván s hodnotou v normě, kterou tento vypočtený poměr nesmí přesáhnout. Za normálních provozních podmínek nesmí být úbytek napětí větší, než je hodnota 10 % domluveného napájecího napětí $U_c [V]$ podle normy ČSN EN 50160 ed.3. *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě*.⁵

Součástí těchto výpočtů by měl být i úbytek napětí na reaktanci vedení $X [\Omega]$, ale v porovnání s reaktancemi odpovídající připojeným odběrům na síť jsou reaktance vedení zanedbatelné, a proto zde s nimi nepočítám.

2.6.3 Hospodárnost průřezu

U cen materiálů potřebných ke stavbě linky vysokého napětí je v poslední době možné sledovat strmý nárůst. Z tohoto důvodu je stále důležitější zvažovat, zda není navrhovaný průřez příliš velký. Vhodná volba průřezu může znatelně snížit pořizovací náklady na stavbu.

Hospodárný průřez $S [mm^2]$ lze vypočítat způsobem znázorněným ve vztahu (28).

$$S = k \cdot I_p \sqrt{\tau_z} \quad (28)$$

kde veličina

k je koeficient závislý na materiálu jádra a izolaci⁶

$I_p [A]$ je maximální provozní proud podle kterého bylo provedeno dimenzování podle kapitoly 2.6.1

$\tau_z [s]$ je doba plných ztrát

Ve vztahu (28) proběhl výpočet s pomocí doby plných ztrát τ_z . Doba plných ztrát τ_z odpovídá době provozu, při kterém odebíraný proud $I_{max} [A]$ způsobí stejné výkonové ztráty, jako by způsobila okamžitá hodnota odebíraného proud $i(t) [A]$ v zadaném sledovaném období $T [s]$. Výpočet doby plných ztrát je možné vidět ve vztahu (29).

$$\tau_z = \frac{\int_0^T i^2(t) dt}{I_{max}^2} = T \left(\frac{I_{ef}}{I_{max}} \right)^2 \quad (29)$$

⁵ČSN EN 50160 ed.3. Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011, 56 s. Třídící znak 330122.

⁶ ČSN 34 1610. *Elektrotechnické předpisy ČSN. Elektrický silnoproudý rozvod v průmyslových provozovnách*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1963, 68 s. Třídící znak 341610

kde veličina

$i(t)$ [A] je okamžitá hodnota elektrického proudu

I_{max} [A] je efektivní hodnota maximálního odebíraného proudu

I_{ef} [A] je efektivní hodnota odebíraného proudu

T [s] doba sledovaného období

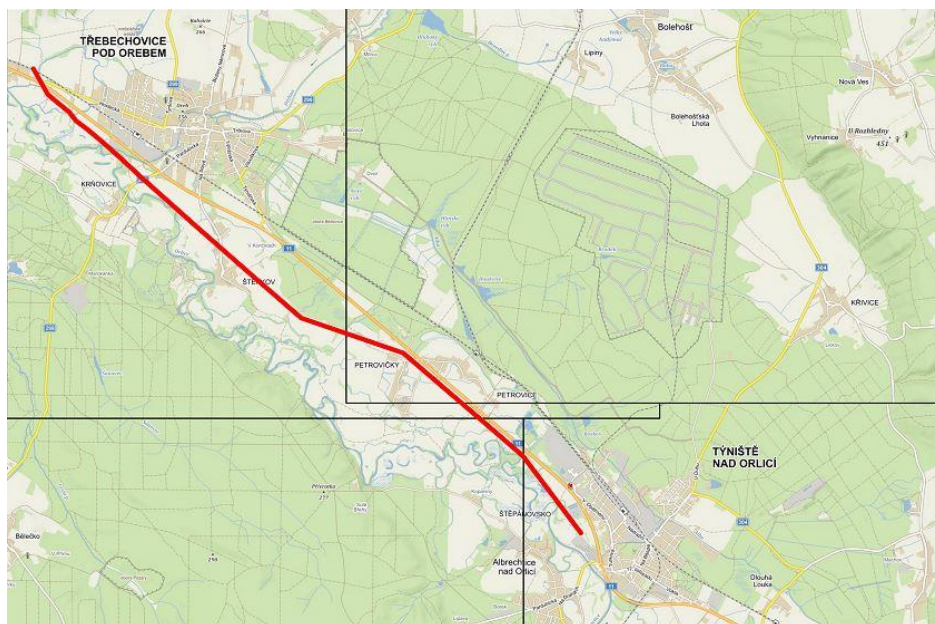
τ_z [s] je doba plných ztrát

Tento výpočet lze pouze použít pro kabelová vedení vysokého napětí, pro venkovní vedení se hospodárný průřez příliš neuvažuje, protože často bývá nová stavba nebo rekonstrukce vedení spojena s plánovaným rozšířením sítě v dané oblasti.

KAPITOLA 3: NÁVRH ELEKTRICKÉHO VEDENÍ VYSOKÉHO NAPĚTÍ

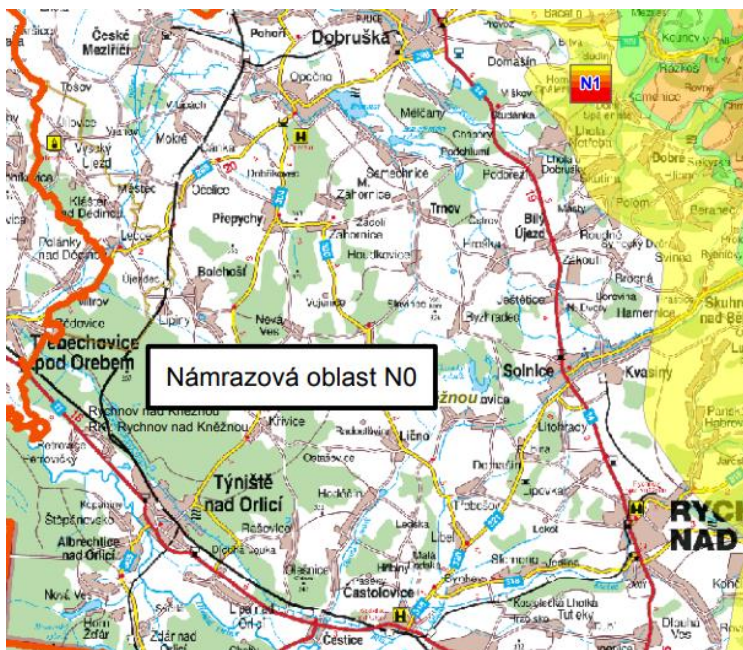
3.1 Zadání pro návrh elektrického vedení vysokého napětí

Jak již bylo zmíněno v úvodu, jedná se o návrh rekonstrukce linky mezi městy Týniště nad Orlicí a Třebechovice pod Orebem v zásobovacím území ČEZ Distribuce a.s.. Na realizované vedení by mělo být následně přivedeno napětí 35 kV. Půdorys trasy je možné najít na Obr. 9. Profil terénu jsem překreslil a vyobrazil v Příloze 1.



Obr. 9: Půdorys projektované trasy

Celá linka se nachází v námrazové oblasti N0 a ve větrné oblasti II. Stávající vedení je v technicky nedostatečném stavu, podpěrné body jsou zrezivělé a na lince jsou často hlášeny poruchy.



Obr. 10: Mapa námrazových oblastí

Nové vedení by mělo splňovat platné technické normy ČSN po stránce mechanické i elektrické. Velká část navrhované trasy by měla být vedena zdvojeně. Z tohoto důvodu je vhodnější použít příhradové stožáry před betonovými, protože by na stožár mohly potenciálně působit zdatelně větší tahy. Protože je tato trasa součástí kmenové linky, rozhodl jsem se použít příhradové stožáry i v případě zbylého úseku s jednoduchým vedením. Tento tah je zároveň mířený k podobné životnosti trasy na jednoduchém i dvojitým vedení, což by mohlo mít vliv na celkovou spolehlivost rekonstruované linky.

Navíc je požadováno, aby na celém úseku rekonstruovaného vedení bylo umístěno kombinované zemní lano. Z tohoto důvodu bude potřeba umístit na koncové stožáry umístěny spojivé optické skříně. Investor si zároveň vybral typ vodiče, který by měl být použit k rekonstrukci linky vysokého napětí. Jedná se o vodič s označením 110-AL1/22-ST1A. Jedná se o vodič typu ALFe používaný pouze ve venkovních vedeních. Označení na vodiči 22-ST1A znamená, že je ocelové jádro při výrobě pozinkováno podle zadané jakosti⁷ a v laně má matematický průřez $S_{FE} = 22 \text{ mm}^2$. Označení na vodiči 110-AL1 znamená, že hliníkový vnější plášť ALFe lana je vyroben z tvrdě taženého hliníku⁷ a má matematický průřez $S_{AL} = 110 \text{ mm}^2$. Elektrické a mechanické parametry tohoto vodiče je možné nalézt v Tabulka 2. Tyto hodnoty byly převzaty ze standardů ČEZ Distribuce, a.s.

typ vodiče	D_{vod}	D_{st}	S_{vod}	S_{st}	M	I_{dov}	F_{JMEN}	R	E	α	γ
[-]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[mm ²]	[kg/km]	[A]	[kN]	[Ω /km]	[MPa]	[$(1/K) \cdot 10^{-5}$]	[N/(m \cdot mm ²)]
110-AL1/22-ST1A	14,96	6,00	132,33	21,99	476,90	326	45,590	0,2560	77400	1,8300	0,03534

Tabulka 2: Parametry vodiče vybraného k návrhu

kde veličina

D_{vod} [mm] je průměr vodiče

D_{st} [mm] je průměr ocelové duše

S_{vod} [mm²] je průřez vodiče

S_{st} [mm²] je průřez ocelové duše

M [kg \cdot km⁻¹] je hmotnost vodiče na 1 km

I_{dov} [A] je maximální dovolený elektrický proud ve vodiči

F_{JMEN} [kN] je jmenovitá pevnost vodiče

R [Ω] je elektrický odpor vodiče na 1 km

E [MPa] je modul pružnosti vodiče

α [$K^{-1} \cdot 10^{-5}$] je teplotní součinitel roztažnosti vodiče

γ [N \cdot m⁻¹ \cdot mm⁻²] je měrná tíha vodiče

Kmenová linka vedení bývá často navrhována na zátěžný elektrický proud $I_p = 300 \text{ A}$ a ani tato linka není výjimkou. Lze tedy říct, že z elektrického hlediska je vodič schopný přenášet tento elektrický proud.

Linka trasy je rekonstruována, z tohoto důvodu jsem se rozhodl umístit nové příhradové stožáry na pozice, ve kterých byly umístěny stávající příhradové stožáry. Po umístění stožárů a vodičů proběhla kontrola na nejkratší vnější povolené vzdálenosti od objektů v průběhu trasy.

⁷ PNE 34 7509 Holé vodiče pro venkovní vedení ze soustředně slaněných kruhových drátů. Praha: České sdružení regulovaných elektroenergetických společností, 2007

3.2 Nejkratší povolené vzdálenosti vodičů

Při návrhu je nutné uvažovat nejkratší povolené vzdálenosti vodičů, jež jsou popsány v technické normě ČSN EN 50 341-1 ed.2. *Elektrická venkovní vedení s napětím nad AC 1kV – Část 1: Obecné požadavky – Společné specifikace*.⁸ Tato problematika je rozdělena na dvě hlavní oblasti. Jednou z oblastí jsou nejkratší vnější povolené vzdálenosti vodičů, u kterých je posuzována vzdálenost mezi vodičem vedení a okolními objekty umístěnými v blízkosti vedení v zadaných podmínkách. Druhou oblastí jsou nejkratší vnitřní povolené vzdálenosti vodičů, u kterých je posuzována vzájemná poloha vodičů umístěných na vedení nebo vzdálenost vodiče od podpěrného bodu v přesně zadaných podmínkách.

3.2.1 Nejkratší vnitřní povolené vzdálenosti vodičů

Mějme situaci, kdy na vodič působí kolmo silové působení v daném směru, které je konstantní na celé délce vodiče. Jsou-li oba konce těchto vodičů pevně uchyceny, prohnutý vodič se bude v tomto silovém poli nejvíce pohybovat v místě největší vzdálenosti od obou upevněných konců. Tento bod je nejkritičtější při výpočtech nejkratší vnitřní povolené vzdálenosti vodičů, protože se může při zadaném silovém působení pohybovat na největší vzdálenosti.

V situaci, kdy je vedení umístěno do gravitačního pole Země se vodič prověsí a vznikne průhyb f [m]. V místě, kde je průhyb největší dochází k největšímu posunu při konstantním silovém působení a je tedy hledaným bodem pro výpočty.

Nejkratší vnitřní vzdálenost b_{emp} [m] je tedy možné určit ze vztahu (30).

$$b_{emp} = k_{emp} \cdot \sqrt{f + L_{ins}} + 0,6 \cdot D$$

(30)

kde veličina

b_{emp} [m] je nejkratší vnitřní vzdálenost

k_{emp} [-] je součinitel závislý na tíze a vzájemné poloze vodičů, případně vzájemné poloze vodiče a zemnicího lana

f [m] je průhyb vodiče

L_{ins} [m] je svislá délka nosného izolátorového závěsu

D [m] je tabulková hodnota pro nejkratší vnitřní povolené vzdálenosti.

Tabulkové hodnoty veličiny D [m] jsou popsány více v Tabulka 3⁵. Pokud je počítána nejkratší vnitřní povolená vzdálenost mezi vodiči umístěnými na společném stožáru, za veličinu D [m] se dosazuje veličina D_{pp} [m]. Pokud je počítána nejkratší vnitřní povolená vzdálenost mezi vodičem a zemnicím lanem, za veličinu D [m] se dosazuje veličina D_{el} [m].

⁸ČSN EN 50 341-1 ed.2. Elektrická venkovní vedení s napětím nad AC 1kV – Část 1: Obecné požadavky – Společné specifikace. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013, 230 s. Třídící znak 333300

Napětí sítě U_s [kV]	D_{el} [m] - Mezi fázovými vodiči a podpěrným bodem	D_{pp} [m] - Mezi fázovými vodiči jednoho potahu vedení
38,5	0,38	0,45

Tabulka 3: Tabulkové hodnoty nejkratších vnitřních vzdáleností

3.2.2 Nejkratší vnější povolené vzdálenosti vodičů

Nejkratší vnější povolené vzdálenosti vodičů závisí čistě na typu objektu uloženého v blízkosti uvažovaného vedení. Tyto hodnoty jsou čistě tabulkové podle základních hodnot D_{pp} [m] a D_{el} [m] v Tabulce 4. Veličina D_{pp} [m] popisuje nejkratší vnější povolenou vzdálenost mezi vodiči odlišných potahů vedení. Veličina D_{el} [m] popisuje nejkratší vnější povolenou vzdálenost vodiče od uzemněných objektů linky vysokého napětí, nebo vzdálenost vodiče od ostatních objektů, které nesouvisí s linkou vysokého napětí.

Napětí sítě U_s [kV]	D_{pp} [m] - K fázovým vodičům jiných potahů vedení	D_{el} [m] - K zemi a ostatním objektům
38,5	0,7	0,6

Tabulka 4: Tabulkové hodnoty nejkratších vnějších vzdáleností

V Tabulce 5 jsem vypsál obvyklé situace, ke kterým platí dané nejkratší vzdálenosti.⁹

	Typ profilu					
	Běžný profil	Skalnatý svah	Stromy pod vedením, na které nelze vylézt	Stromy pod vedením, na které lze vylézt	Stromy vedle vedení, na které nelze vylézt	Stromy vedle vedení, na které lze vylézt
Nejkratší povolená vzdálenost D [m]	$5,0 + D_{el}$, ale nejméně 5,6 m	$2,0 + D_{el}$, ale nejméně 3,0 m	D_{el} , ale nejméně 0,5 m	$1,5 + D_{el}$, ale nejméně 2,1 m	D_{el} , ale nejméně 0,6 m	$1,5 + D_{el}$, ale nejméně 2,1 m
	Typ profilu					
	Silnice	Trakční vedení - ve vodorovném směru	Trakční vedení - ve svislém směru	Vnější okraj vozovky - ve vodorovném směru	Tratřové koleje + cizí vedení - ve vodorovném směru	Křížení vedení
Nejkratší povolená vzdálenost D [m]	$6,0 + D_{el}$, ale nejméně 6,6 m	$0,5 + D_{el}$, ale nejméně 1,5 m	$2,0 + D_{el}$, ale nejméně 2,6 m	$0,5 + D_{el}$, ale nejméně 1,5 m	$4,0 + D_{el}$, ale nejméně 4,6 m	D_{pp} , ale nejméně 1,0 m

Tabulka 5: Nejkratší vnější povolené vzdálenosti pro vybrané situace

3.3 Návrh umístění vodičů na příhradové stožáry

Při návrhu umístění vodiče vedení na podpěrné body jsem se rozhodoval zejména podle výšky příhradového stožáru l_c [m], vrcholové síly působící na stožár t_c [N] a nejkratších povolených vzdáleností

⁹ČSN EN 50 341-1 ed.2. Elektrická venkovní vedení s napětím nad AC 1kV – Část 1: Obecné požadavky – Společné specifikace. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013, 230 s. Třídící znak 333300.

vodičů D [m]. Vrcholovou sílu působící na celý stožár jsem počítal podle vztahu (20) a samotné výpočty vrcholových sil působících na navrhované příhradové stožáry jsem vložil do příloh v souboru programu MS Excel s názvem „Výpočty“. V této kapitole bych zobrazil postup mých výpočtů a zhodnotil vybraný úsek určený převážně k ilustraci vypočtených hodnot. Jak jsem již zmínil, k výpočtu vrcholové síly vodiče t_{c1} působící na stožár jsem použil vztah (20).

$$t_{c1} = \frac{2}{3 \cdot l_c} \sum_{i=3}^n (T_i \cdot l_{ic})$$

(20)

kde veličina

t_{c1} [N] je vrcholová síla vztažena na celý stožár

l_c [m] délka celého stožáru nad místem vetknutí do betonu

T_i [N] je výslednice tahů vodičů působících na stožár

l_{ic} [m] výška závěsu vodičů nad místem vetknutí stožáru do betonu

n [-] počet vodičů umístěných na stožáru

Výšku stožáru l_c [m] a výšku závěsného bodu vodiče l_{ic} [m] jsem vyčetl z podnikové normy PNE 34 8240 *Příhradové stožáry pro elektrická venkovní vedení do 45 kV*.¹⁰ Tyto výšky byly nejprve zadány na danou základní hodnotu, která se mohla měnit.

K vyřešení vztahu (20) bylo zapotřebí znát výslednici tahů vodičů působících na stožár T_i [N]. Jelikož na všech stožárech proti sobě působily proti sobě vždy lana stejných typů a průřezů, lze pro výpočet výslednice tahů použít vztah (15), kde výslednice T_i [N] mohla být nahrazena výsledným tahem T_s [N] a tedy osu X-X zanedbat.

$$T_s = 2 \cdot T_a \cdot \cos \frac{\alpha}{2}$$

(15)

Lom vedení α [°] je možné odečíst z výkresu stávající trasy a pro tah vodiče v podélném směru T_a [N] platí vztah (14).

$$T_a = \frac{s \cdot \sigma_H}{g}$$

(14)

Průřez lana s [mm²] bylo možné zjistit ze standard ČEZ Distribuce, a.s. Namáhání vodiče v horizontálním směru σ_H [N·mm⁻²] je závislé na kritické teplotě a je taktéž zadáno.

Následně proběhl výpočet vrcholových sil získaných větrem ze vztahu (13).

$$t_{c2} = V_c + \frac{1}{l_c} \sum_{i=3}^n (T_{Vi} + l_{ic})$$

(13)

¹⁰ PNE 34 8240 *Příhradové stožáry pro elektrická venkovní vedení do 45 kV*. Praha: České sdružení regulovaných elektroenergetických společností, 1994

kde veličina

$t_{cz} [N]$ je vrcholová síla vztažena na celý stožár

$V_c [N]$ je tlak větru na celý stožár převedený na vrchol stožáru

$l_c [m]$ délka celého stožáru nad místem vetknutí do betonu

$T_v [N]$ je tlak větru působící na vodiče zavěšené na stožáru

$l_{ic} [m]$ výška závěsu vodičů nad místem vetknutí stožáru do betonu

$n [-]$ počet vodičů umístěných na stožáru

Veličina tlaku větru působící na celý stožár $V_c [N]$ byla určena z tabulek v přímě závislosti na aktivní ploše stožáru, na konstrukci stožáru, na větrné oblasti a typu terénu, ve které byl stožár umístěn.

Veličina tlaku větru působící na zavěšené vodiče $T_v [N]$ byla určena stejným způsobem, jenom místo aktivní plochy stožáru, bylo počítáno s aktivní plochou zavěšeného vodiče.

Tabulkové hodnoty potřebné k získání veličin popisujících tlaky větrů byl převzaty z podnikových norem PNE 33 3302 *Elektrická venkovní vedení s napětím do 1kV AC, 3. vydání*.¹¹.

Po vypočtení vrcholových sil byly vypočteny průhyby vodičů f podle vztahu (5), případně vztahu (6).

$$f = \frac{a^2 \cdot \gamma \cdot z}{8 \cdot \sigma_H} [m] \quad (5)$$

$$f = \frac{a^2 \cdot \gamma \cdot z}{8 \cdot \sigma_H \cdot g \cdot \cos \varphi} \quad (6)$$

kde veličina

$f [m]$ je průhyb vedení

$a [m]$ je délka rozpětí

$\gamma [N \cdot mm^{-2} \cdot m^{-1}]$ je měrná tíha vodiče

$z [-]$ je přetížení vodiče

$\sigma_H [N \cdot mm^{-2}]$ je namáhání vodiče v horizontálním směru

$g [-]$ je gravitační konstanta

Případně bylo možné za pomoci řetězovky vypočítat přesnou polohu vodiče. Provedením kontroly poměrů mezi převýšením $h [m]$ a rozpětím $a [m]$ jsem zjistil, že lze pro všechny výpočty průhybu vedení použít vztah (5). Díky těmto výpočtům bylo následně možné provést kontrolu na nejkratší vnější povolené vzdálenosti. Na Obr. 11 je možné vidět část rozhraní MS Excel, s jehož pomocí jsem prováděl výpočty.

¹¹PNE 33 3302 *Elektrická venkovní vedení s napětím do 1kV AC, 3. vydání*. Praha: České sdružení regulovaných elektroenergetických společností, 2013.

Hodnoty zadané ČEZem		Výpočty k určení výšky stožáru					
Průřez vodiče s_1 [mm ²]	132,33	Označení příhradových stožárů na trase [-]		Délka rozpětí a [m]	Převýšení mezi záv. body nejnižšího vodiče h [m]	Průhyb nejnižšího vodiče v rozpětí f [m]	Rozdíl výšek nad mořem h_m [m]
Průřez KZL s_2 [mm ²]	93,15	164	165	97	4,59	1,70	-0,39
Výchozí horiz. složka namáhání vodiče σ_1 [MPa]	40	165	166	112	0,03	2,27	0,03
Výchozí horiz. složka namáhání KZL σ_2 [MPa]	45	166	167	139	-4,04	3,49	-1,04
Měrná tíha vodiče γ_1 [kp·mm ⁻² ·m ⁻¹]	0,03534	167	168	147	-0,40	3,91	-0,40
Měrná tíha KZL γ_2 [kp·mm ⁻² ·m ⁻¹]	0,04697	168	169	175	-0,52	5,54	-0,52
Přetížení vodiče námrakem z_1 [-]	1,637	169	170	170	0,05	5,22	0,05
Přetížení KZL námrakem z_2 [-]	2,637	170	171	164	1,33	4,86	1,33
Maximální tlak větru q_b [Pa]	906,7	171	172	188	1,97	6,39	-1,03
Dynamický součinitel G_1 [-]	0,9	172	173	176	-3,55	5,60	-0,55
Součinitel aerody. odporu C_x [-] pro stožár	2,6	173	174	178	0,86	5,73	0,86
Součinnítek rozpětí G_2 [-]	0,71	174	175	155	2,91	4,34	-0,09
Součinitel aerody. odporu C_x [-] pro vodič	1	175	176	185	0,64	6,19	0,64
Průměr vodiče [mm]	14,96	176	4	182	-2,77	5,99	0,23
Větrová plocha stožáru 18/30 A [m ²]	4,71	4	5	173	2,88	5,41	-0,12
		5	6	177	-2,93	5,66	0,07
		6	7	148	0,43	3,96	0,43
		7	8	170	2,44	5,22	-0,56
		8	9	169	-2,35	5,16	0,65
		9	10	179	3,03	5,79	0,03
		10	11	181	0,03	5,92	0,03
		11	12	181	0,32	5,92	0,32
		12	13	181	0,26	5,92	3,26
		13	14	175	3,68	5,54	0,68
		14	15	169	-0,56	5,16	-0,56
		15	16	182	1,34	5,99	1,34
		16	17	183	-0,72	6,05	-0,72
		17	18	182	1,02	5,99	1,02
		18	19	166	-0,01	4,98	-0,01
		19	20	195	0,96	6,87	0,96
		20	21	168	-6,19	5,10	-3,19
		21	22	183	3,10	6,05	0,10

Obr. 11: Ilustrační obrázek prováděných výpočtů

Při kontrole vedení na nejkratší vnější povolené vzdálenosti došlo k problému, protože mezi stožáry č. 43 a č. 45 došlo k nesplnění podmínek z důvodu velké vzdálenosti mezi těmito stožáry a s tím spojeným i velkým průhybem. Problém jsem vyřešil zvětšením výšek zasažených stožárů a také jsem musel zvýšit namáhání na vodiči σ [MPa] na dvojnásobek.

Vhodným výběrem konzolí nebo vhodným umístěním na příhradový stožár bylo následně možné splnit kontrolu nejkratších vnitřních povolených vzdáleností vodičů.

Následně byla za pomoci řetězovky zjištěna délka instalovaného vedení. Rovnice (4) říká, že pro délku řetězovky l [m] o parametru c [m] a rozpětí a [m] platí:

$$l = 2 \cdot c \cdot \sinh \frac{a}{2 \cdot c} \quad (4)$$

Problémovým prvkem se zde ukázala funkce hyperbolický sinus, která pro daný poměr $\frac{a}{c}$ vracela hodnoty neodpovídající zadaným rozměrům. Z tohoto důvodu byla provedena aproximace funkce pomocí Taylorova rozvoje v okolí počátku. Postup rozvoje je znázorněn v rovnici (31), kde $c = 0$. Z tohoto rozvoje je možné vytvořit až polynom k -tého stupně. Ve výpočtu jsem se rozhodl pro polynom třetího stupně, jelikož mi přesnost tohoto polynomu přišla pro výpočet délek vedení dostatečná

$$\begin{aligned} \sinh(x) &\cong \frac{[\sinh(c)]^{(0)}}{0!} \cdot (x - c)^0 + \frac{[\sinh(c)]^{(1)}}{1!} \cdot (x - c)^1 + \frac{[\sinh(c)]^{(2)}}{2!} \cdot (x - c)^2 + \\ &+ \frac{[\sinh(c)]^{(3)}}{3!} \cdot (x - c)^3 = \frac{\sinh(0)}{1} \cdot (x - 0)^0 + \frac{\cosh(0)}{1} \cdot (x - 0)^1 + \\ &\frac{\sinh(0)}{2} \cdot (x - 0)^2 + \frac{\cosh(0)}{3!} \cdot (x - 0)^3 = x + \frac{x^3}{3!} \end{aligned} \quad (31)$$

Vznikl tedy nový vztah (32) pro výpočet délky řetězovky.

$$l = 2 \cdot c \cdot \left(\frac{a}{2 \cdot c} + \frac{a^3}{3! \cdot 8 \cdot c^3} \right) \quad (32)$$

kde veličina

a [m] je rozpětí vedení

c [m] je parametrem řetězovky

Tento parametr řetězovky c [m] určuje rozměry řetězovky a je závislý na měrné tíze vodiče γ [$N \cdot mm^{-2} \cdot m^{-1}$] a na namáhání vodiče v horizontálním směru σ_H [$N \cdot mm^{-2}$] podle vztahu (33).

$$c = \frac{\sigma_H}{z \cdot \gamma_1} = \frac{\sigma_H}{\gamma} \quad (33)$$

Po roznásobení závorky a vyjádření parametru c se finálním vztahem pro výpočet délky řetězovky l stal vztah (34).

$$l = a + \frac{a^3 \cdot \gamma^2}{24 \cdot \sigma_H^2} \quad (34)$$

Stejným způsobem jsem následně vypočítal celkovou délku kombinovaného zemního lana.

Na závěr mohl proběhnout součet komponent potřebných pro ekonomický rozbor.

KAPITOLA 4: ROZPOČET STAVBY ELEKTRICKÉHO VEDENÍ VYSOKÉHO NAPĚTÍ

Pro vytvoření rozpočtu stavby elektrického vedení jsem nejprve vypsaly komponenty, které by měly být použity v realizaci projektu. Kromě příhradových stožárů, vodičů a kombinovaných zemních lan jsem na seznam použitých komponent připsal ještě konzoly, izolátorové řetězce a uchycení zemních lan. Zároveň bylo nutné v rozpočtu nutně počítat například s demontáží stávajícího vedení nebo dalšími úkony prováděnými montážníky.

Seznam možných položek v rozpočtu s cenami je možné vidět v Tabulka 6. Tyto ceny jsou pouze orientační, protože cena materiálu a práce je silně závislá na dodavateli nebo montážní firmě.

Komponenta [-]	Jednotková cena [Kč]	Počet [-]	Cenový součet [tis. Kč]
Příhradový stožár 18M/30KN	185 000,00	15,00	2 775,00
Příhradový stožár 18M/40KN	215 000,00	10,00	2 150,00
Příhradový stožár 21M/40KN	240 000,00	31,00	7 440,00
Příhradový stožár 24M/60KN	350 000,00	2,00	700,00
Konzola typu A2	12 000,00	90,00	1 080,00
Konzola typu A4	18 000,00	45,00	810,00
Konzola typu B2	8 000,00	24,00	192,00
Konzola typu B3	11 000,00	12,00	132,00
Izolátorový řetězec SM 35-2-M	2 900,00	312,00	904,80
Uchycení KZL	3 000,00	58,00	174,00
Kombinované zemní lano KZL 2S 2/24	350,00	10 039,00	3 513,65
Vodič 110-AL1/22ST1A	80,00	53 585,00	4 286,80
Demontáž stožáru	8 000,00	58,00	464,00
Celkový součet [mil. Kč]			24,62

Tabulka 6: Seznam možných položek rozpočtu s cenami

Z tabulky jsem zjistil, že více než polovina všech nákladů byla vynaložena na zprostředkování příhradových stožárů. Nabízí se tedy otázka, jestli nebylo možné snížit celkové náklady výběrem příhradových stožárů s nižší výškou nebo menším vyztužením. Po vypočtení nejnižších výšek vodičů nad zemí c [m] jsem nabyl dojmu, že použití nižších stožárů není příliš proveditelné, neboť jsem si na stožárech chtěl ponechat minimální rezervu 2 m. V případech, kde byla rezerva větší byla často mezi stožáry umístěna překážka v podobě železniční trasy, silnic, obytných budov, řek nebo jezer. Z tohoto důvodu jsem rozhodl použít tyto výšky stožárů.

Po vypočtení celkových vrcholových sil na stožárech t_c [kN] byly rezervy při navrhování vyztužení stožárů přijatelné. Po vybrání výchozích hodnot vyztužení jsem musel u deseti stožárů zvýšit vyztužení. U ostatních komponentů nelze nijak výrazněji snížit pořizovací náklady.

ZÁVĚR

Má práce se v prvních dvou kapitolách zabývala převážně teoretickou stránkou problému. Na začátku jsem popsal jedny z nejdůležitějších komponentů použitých v návrhu elektrického vedení vysokého napětí.

Následně jsem zmapoval postupy, kterými bylo možné provést elektrická a mechanická dimenzování na těchto komponentách. Tyto postupy jsem následně využil v praktické části práce, ve které bylo popsáno zadání návrhu.

V praktické části jsem provedl výpočty týkající se typologického výběru stožáru podle výšky nebo vrcholové síly. Při návrhu stožáru jsem se rozhodl použít obvyklé stožáry používající se ve stavbách vysokých napětí. Jednalo se o stožáry typu 18M/30KN a 21M/40KN. Tyto stožáry jsem následně umístil na pozice stávajících stožárů a určil výšky a maximální vrcholové síly z nasbíraných informací v podélném profilu terénu. Ze začátku jsem vybral výchozí hodnotu vyztužení stožáru, protože na velikosti větrové plochy stožáru závisela vrcholová síla při působení větru ve vodorovném směru na stožár a vodiče. Následně jsem byl přinucen u deseti stožárů typu 18M/30KN zvýšit hodnotu vyztužení a použít místo nich stožáry typu 18M/40KN. Celkem tedy bylo v trase použito patnáct stožárů typu 18M/30KN, deset stožárů typu 18M/40KN a třicet jedna stožárů typu 21M/40KN.

Z důvodů nedodržení nejkratších vnějších povolených vzdáleností jsem navíc musel ošetřit rozpětí mezi příhradovými stožáry s číselným označením 43 a 45. Mezi těmito stožáry se nacházelo velké množství mokřadů a jezírek a kvůli tomu bylo v této oblasti málo míst, kde by se mohl ukotvit příhradový stožár. To se ovšem promítlo na vzdálenosti mezi těmito stožáry, kde hodnota rozpětí $a [m] = 289 m$. V případě výchozí hodnoty horizontálního namáhání vodiče $\sigma_1 = 40 MPa$ by vedení ve středu rozpětí bylo pouze přibližně jeden metr nad zemí, což hrubě porušuje předepsané hodnoty minimálních vzdáleností od terénu. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl zvýšit výšku stožáru $l_c [m] = 24 m$ a horizontální namáhání vodiče $\sigma_H = 80 MPa$. V návrhu to byly stožáry typu 24M/60KN a byly pouze dva.

Při výběru konzol jsem se držel zvyklostí a pro dvojitě vedení jsem použil konzole typu A2 a typu A4, se kterými bylo možné vytvořit stožár typu soudek. Na každý stožár s dvojitým vedením tedy připadla jedna konzola typu A4 a dvě konzoly typu A2. Na stožáry s jednoduchým vedením jsem umístil konzoly typu B2 a typu B3 ve tvaru připomínajícím stožáry typu soudek. Konzola typu B3 byla umístěna na opačné straně stožáru než zbývající dvě konzoly typu B2, protože není příliš vhodné umísťovat jednostranné konzoly pouze na jednu stranu stožáru.

K uchycení vodičů jsem použil kompozitní izolátorový řetězec SM 35-2-M, který se vyrábí ve variantách nosných i kotevních. Výdržná napětí tohoto izolátorového řetězce jsou 75 kV za deště a 180 kV při atmosférickém impulsu 1,2/50 μs .

Na stožárech bylo umístěno i kombinované zemní lano prostřednictvím vhodného uchycení, které se nachází na špičce stožáru. Kombinované zemní lano mělo jiné mechanické parametry, než měl vodič použitý v návrhu. Významným rozdílným parametrem byla měrná tíha, kvůli které jsem očekával větší průhyby ve středu rozpětí než v případě vodičů. Z tohoto důvodu jsem zvolil větší výchozí hodnotu horizontálního namáhání kombinovaného zemního lana $\sigma_2 = 45 MPa$. Zároveň jsem se pokoušel umístit vodiče dále od kombinovaného zemního lana, aby nemohlo dojít k přeskokům mezi vodičem a zemním lanem. Kombinovaná zemní lana jsou zároveň náchylná na otřesy, tudíž je bylo potřeba opatřit vhodnými tlumiči vybrací.

Na závěr jsem tyto komponenty umístil do společné tabulky a vytvořil v hrubých rysech rozpočet stavby elektrického vedení. Z vytvořeného rozpočtu jsem zjistil, že cena stavby byla zhruba 25 milionů korun. Tato cena byla pouze orientační, obecně je silně závislá na firmách zprostředkovávající realizaci. Domnívám se, že by se celkové náklady mohly pohybovat v rozmezí 25 až 35 milionů korun. Z vytvořené tabulky č. 6 v kapitole č. 4 vyšlo najevo, že výrazná část nákladů připadala na náklady spojené

s nákupem příhradových stožárů. Velkou část rozpočtu zabíraly i náklady na pořízení kombinovaného zemního lana a vodiče. Kombinované zemní lano typu KZL 2S 2/24 bylo sice v porovnání ceny na metr přibližně čtyřnásobně dražší, ale vodiče typu 110-AL1/22ST1A byly na stožárech taženy vždy ve skupinách po třech nebo šesti vodičích. Z tohoto důvodu byla celková délka použitých vodičů přibližně pětinasobná oproti délce kombinovaného zemního lana. Náklady spojené s pořizováním vodičů byly z tohoto důvodu větší než náklady spojené s pořizováním kombinovaných zemních lan. Celková délka použitého vodiče typu 110-AL1/22ST1A o celkovém průřezu 132 mm^2 činila přibližně 53,6 km. Celková délka kombinovaného zemního lana typu KZL 2S 2/24 o průřezu 93 mm^2 činila 10,0 km.

Jednou z položek rozpočtu byla i demontáž stožáru. Jednalo se o jedinou položku v Tabulka 6, která souvisela s pracovními úkony probíhajícími při realizaci projektu. Demontáž jsem vybral z důvodu snadné kvantifikace, protože velké množství těchto úkonů bylo téměř nemožné kvantifikovat. Jedním z příkladů těchto úkonů bylo odstranění porostu. Tento úkon nebyl závislý na žádném z technických parametrů stavby. Jediným způsobem, jak zjistit velikost plochy, kterou zabírala ošetřovaná oblast, bylo vypracování detailní výměry. Tuto výměru jsem bohužel neměl k dispozici.

Zároveň jsem do rozpočtu nezapisoval různá značení. Mezi tato značení patřily číslovací tabulky na stožárech, letecké značení nebo dopravní značení, které bylo použito při montáži. Důvodem byla zanedbatelná cena v porovnání s ostatními položkami ve vypracovaném rozpočtu.

Myslím si, že mi vypracování této práce přineslo spoustu důležitých poznatků týkajících se elektrických vedení vysokého napětí. Přijde mi, že oblasti vysokých napětí jsou v dnešní době neprávem opomíjeny a zaslouží si větší pozornosti širší veřejnosti. Na druhou stranu zastávám názor, že mnou vypočtené hodnoty mají hrubé rysy a co do kvality je nelze příliš srovnávat s výpočty nejlepších výpočetních programů. Výpočty jsem na rozdíl od výpočetních programů prováděl pouze pro stav, při kterém byla okolní teplota $-5 \text{ }^\circ\text{C}$, bylo bezvětří a na vodiči se vytvořil námrazek. Do budoucna bych se tedy s těmito výpočetními programy chtěl naučit pracovat, abych mohl tyto rozdílné způsoby výpočtů porovnat a třeba i zpracovat v další práci.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- 1) ČEMUS, Jan a kol. *Projektování venkovních vedení VN*. České energetické závody. Pardubice, 1971.
- 2) ČSN 33 2000-5-52 ed. 2. *Elektrické instalace nízkého napětí - Část 5-52 Výběr a stavba elektrických zařízení - Elektrická vedení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012, 120 s. Třídící znak 332000.
- 3) ČSN 34 1610. *Elektrotechnické předpisy ČSN. Elektrický silnoproudý rozvod v průmyslových provozovnách*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1963, 68 s. Třídící znak 341610.
- 4) ČSN EN 50160 ed.3. *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011, 56 s. Třídící znak 330122.
- 5) ČSN EN 50 341-1 ed.2. *Elektrická venkovní vedení s napětím nad AC 1kV – Část 1: Obecné požadavky – Společné specifikace*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013, 230 s. Třídící znak 333300.
- 6) PNE 33 3302 *Elektrická venkovní vedení s napětím do 1kV AC, 3. vydání*. Praha: České sdružení regulovaných elektroenergetických společností, 2013.
- 7) PNE 34 7509 *Holé vodiče pro venkovní vedení ze soustředně slaněných kruhových drátů*. Praha: České sdružení regulovaných elektroenergetických společností, 2007.
- 8) PNE 34 8210 *Dřevěné sloupy a dřevěné sloupy na patkách pro elektrická venkovní vedení do 45 kV*. Praha: České sdružení regulovaných elektroenergetických společností, 2004.
- 9) PNE 34 8240 *Příhradové stožáry pro elektrická venkovní vedení do 45 kV*. Praha: České sdružení regulovaných elektroenergetických společností, 1994.

PŘÍLOHA 1: PODÉLNÝ PROFIL TERÉNU TRASY VEDENÍ VYSOKÉHO NAPĚTÍ

