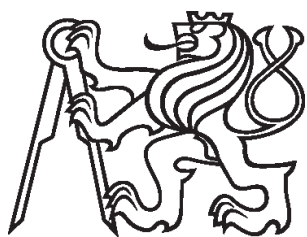


Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická

Návrh dimenzování VVN kabelu pro TR 110/22 kV Brno-Sever (Klusáčkova)

Jaroslav Šlajcher

Vedoucí práce: Mgr. Ing. Vít Klein, Ph.D.
2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šlajcher** Jméno: **Jaroslav** Osobní číslo: **483807**
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:

Návrh dimenzování VVN kabelu pro TR 110/22 kV Brno-Sever (Klusáčkova)

Název bakalářské práce anglicky:

Dimensioning of VHV cable for TR 110/22 kV Brno-Sever (Klusáčkova)

Pokyny pro vypracování:

- 1) Venkovní a kabelové vedení velmi vysokého napětí.
- 2) Problematika dimenzování kabelů velmi vysokého napětí.
- 3) Dimenzování kabelu 110 kV pro TR 110/22 kV Brno - Sever (Klusáčkova).
- 4) Návrh trasy kabelu.
- 5) Rozpočet.

Seznam doporučené literatury:

- 1) ORSÁGOVÁ, Jaroslava. Rozvodná zařízení, elektronická skripta, VUT v Brně, 2015.
- 2) PNE 34 1050 ed. 3 – Kladení kabelů nn, vn a 110 kV v distribučních sítích energetiky. 3. dopl. vyd. 2020.
- 3) TOMAN, Petr. Provoz distribučních soustav. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.

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: **27.01.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2022**

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

Čestné 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 Lounech dne 13. 8. 2021

Jaroslav Šlajcher

Poděkování

Hlavní poděkování směřuji k panu Mgr. Ing. Vítu Kleinovi, Ph.D., za jeho ochotu, vstřícnost a podporu při tvorbě bakalářské práce. Životní zkušenosti, které mi byly předávány po celou dobu tvorby, mi pomohly pochopit, o čem studium na vysoké škole je, čehož si velice vážím. Dále děkuji panu Ing. Pavlu Pavlátkovi, Ph.D., za jeho odborné rady a poskytnuté materiály pro lepší pochopení problematiky dimenzování a projektování v praxi.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá návrhem dimenzování kabelu 110 kV, který je součástí zakázky přestavby spínací stanice a jejího připojení k distribuční soustavě. Objednatelem této zakázky je společnost EG.D, a.s., která tímto rozšiřuje distribuční soustavu.

Záměrem práce je shrnutí a využití znalostí nabytých při studiu. Společně s tím i nahlédnutí do průběhu projektové činnosti v praxi. Práce tedy ve své druhé polovině obsahuje i poznatky a postupy z praxe, a to hlavně při návrhu trasy kabelového vedení v hustě zastavěné oblasti města.

Klíčová slova

Distribuční soustava, kabelové zemní vedení, venkovní nadzemní vedení, dimenzování, zemní výkopové práce, návrh trasy kabelového vedení, projektování, rozpočet.

Abstract

Bachelor thesis deals with dimensioning of 110 kV cable, which is a part of reconstruction of switching station and connection to the distribution electrical power system. Reconstruction and connection is ordered by company EG.D, a.s., which wants to expand distribution electrical power system.

Purpose of the thesis is to use and summarize acquired knowledge from studying bachelor program at the CTU. Along with that the goal is to get to know processes that are used in real planning in power engineering. The second part of thesis contains description of problems connected with design of the cable trace at densely built-up city area and displays solutions that are commonly used.

Keywords

Distribution electrical power system, cable lines, overhead power lines, dimensioning, ground works, design of cable trace, planning in power engineering, budget.

Obsah

1	ÚVOD	1
2	VENKOVNÍ A KABELOVÉ VEDENÍ VELMI VYSOKÉHO NAPĚTÍ.....	3
2.1	Elektrizační soustava a rozdělení napěťových hladin.....	3
2.2	Venkovní vedení VVN	5
2.2.1	Vodiče.....	5
2.2.2	Podpěrné body	6
2.2.3	Izolátory	7
2.3	Kabelové vedení VVN	8
2.3.1	Kabely VVN a jejich konstrukce	8
2.3.2	Kabelové spoje a koncovky VVN	10
2.3.3	Uzemnění kovových stínění a kovových plášťů	10
2.3.4	Konfigurace jednožilových kabelů.....	13
2.3.5	Způsoby uložení kabelů v zemi	13
2.4	Výběr druhu vedení	16
3	PROBLEMATIKA DIMENZOVÁNÍ KABELŮ VELMI VYSOKÉHO NAPĚTÍ.....	23
3.1	Provozní teplota v dovolených mezích	23
3.2	Průřez vodičů v hospodárných mezích.....	25
3.3	Dostatečná mechanická pevnost	26
3.4	Úbytek napětí v dovolených mezích.....	27
3.5	Odolnost vůči účinkům zkratů	28
4	DIMENZOVÁNÍ KABELU 110 KV PRO TR 110/22 KV BRNO – SEVER (KLUSÁČKOVA).....	35
4.1	Bližší seznámení s projektem Brno – Sever (Klusáčkova)	35
4.2	Dimenzování kabelu 110 kV.....	38
4.2.1	Výchozí parametry	39
4.2.2	Výpočet minimálního průřezu vedení.....	39
4.3	Výpočty vhodné pro porovnání kabelů	41

4.3.1	Poměrné ztráty výkonu	42
4.3.2	Kapacitní proudy	43
4.3.3	Přirozený výkon vedení	46
4.3.4	Úbytek napětí na vedení	48
4.4	Zhodnocení výpočtů a výběr vhodného kabelu	50
5	NÁVRH TRASY KABELU	53
5.1	Legislativní a normové požadavky návrhu	53
5.2	Postup návrhu trasy kabelového vedení	54
5.2.1	Zadání stavby a práce projektanta	54
5.2.2	Věcná břemena a vyvlastnění	55
5.3	Navržená trasa kabelového zemního vedení pro zakázku Brno – Sever (Klusáčkova)	57
6	ROZPOČET	59
6.1	Podrobný popis trasy	59
6.2	Tvorba rozpočtu	62
6.2.1	Zemní práce	62
6.2.2	Elektromontáže	64
6.2.3	Materiálové vybavení	65
6.2.4	Celkový rozpočet	66
7	ZÁVĚR	67
7.1	Shrnutí obsahu práce	67
7.2	Shrnutí výsledků a závěrů práce	67
7.3	Přínos práce pro autora	69
8	SEZNAM LITERATURY	71
9	SEZNAM PŘÍLOH	75

Obrázky

Obr. 2.1 - Přenosová soustava v ČR	3
Obr. 2.2 - Výzbroj nadzemního vedení VVN	5
Obr. 2.3 - Základní typy a pojmenování stožárů pro VVN a ZVN	6
Obr. 2.4 - Způsoby uchycení vodičů.....	7
Obr. 2.5 - Vrstvy jednožilového kabelu VVN	9
Obr. 2.6 - Transpozice 3f vedení	12
Obr. 2.7 - Propojení stínění ve spojovacího	12
Obr. 2.8 - Uložení kabelu VVN v trojúhelníkové formaci	14
Obr. 2.9 - Uložení kabelu VVN v ploché formaci.....	15
Obr. 2.10 - Ochranné pásmo nadzemního a kabelového vedení.....	18
Obr. 3.1 - Průběh souměrného zkratového proudu	30
Obr. 4.1 - Souběh vedení Brno - Sever (Klusáčkova)	37
Obr. 4.2 - Provozní kapacity jednožilových kabelů samostatně a v trojúhelníkové formaci	43
Obr. 4.3 - Zobrazení poloměrů pro výpočet napětí.....	45
Obr. 5.1 – Vývojový diagram návrhu trasy	56
Obr. 5.2 - Situace širších vztahů	57
Obr. 6.1 - Zobrazení protlaků, šachet a podobných situací v trase kabelu	61

Tabulky

Tab. 2.1 - Napěťové hladiny elektrizační soustavy v ČR.....	4
Tab. 2.2 - Důsledky transfigurace kabelových vedení	13
Tab. 2.3 - Ochranná pásma vedení elektrické energie	18
Tab. 2.4 - Ceny výkopových prací	19
Tab. 2.5 - Práce spojené s výstavbou podzemního vedení	20
Tab. 2.6 - Náklady při výstavbě nadzemního vedení	20
Tab. 3.1 – Provozní a maximální teploty vodičů podle druhu izolace	25
Tab. 3.2 – Vliv teploty okolí na přepočítavací koeficient	25
Tab. 3.3 - Přepočítavací koeficient pro ekvivalentní oteplovací proud.....	31
Tab. 4.1 - Délka dimenzovaného vedení	35
Tab. 4.2 - Známé parametry k dimenzování	37
Tab. 4.3 - Normalizovaná řada zkratových odolností	38
Tab. 4.4 - Parametry pro výpočet materiálového koeficientu	39
Tab. 4.5 - Jmenovitá proudová zatížení	40
Tab. 4.6 - Průřezy elektrovedné části splňující proudové zatížení	41
Tab. 4.7 - Parametry vybraných kabelů z katalogu	42
Tab. 4.8 – Přehled vypočtených hodnot	51
Tab. 4.9 – Cena kabelů na metr délky	52
Tab. 4.10 – Celkové ceny kabelu na délku navrhované trasy	52
Tab. 6.1 – Vzdálenost trasy v různých typech povrchu	62
Tab. 6.2 – Rozpočet zemních prací	63
Tab. 6.3 – Rozpočet elektromontáží.....	65
Tab. 6.4 – Rozpočet materiálu.....	65
Tab. 6.5 – Celkový rozpočet	66

Seznam zkratk

BE/BEB	Oboustranně uzemněný systém (both-ends ending)
CB	Transpozice (cross-bonding)
ČML	Teplárna Červený mlýn
DS	Distribuční soustava
EIA	Posouzení vlivů na životní prostředí (Environmental Impact Assessment)
ES	Elektrizační soustava
KLS	Rozvodna na ulici Klusáčkova
KZL (OPGW)	Kombinované zemní lano (Optical ground wire)
MJ	Měrná jednotka
NN	Nízké napětí
OP	Ochranné pásmo
PD	Projektová dokumentace
PS	Přenosová soustava
SB	Oboustranně uzemněný systém (solid-bonding)
SBVB	Smlouva budoucí na věčné břemeno
SK	Skupina těžitelnosti zeminy dle ČSN 73 3055
SPB	Jednostranně uzemněný systém (single-point bonding)
SPR	Spojkoviště na ulici Sportovní
ÚR	Územní rozhodnutí
VN	Vysoké napětí
VVN	Velmi vysoké napětí
ZL	Zemní lano
ZŘ	Zjišťovací řízení
ZVN	Zvlášť vysoké napětí
ŽP	Životní prostředí

Seznam použitých technických norem

- I. PNE 34 1050 (3. vydání) – Kladení kabelů NN, VN a 110 kV v distribučních sítích energetiky
- II. ČSN 73 6005 (říjen 2020) – Prostorové uspořádání vedení technického vybavení
- III. ČSN IEC 60287-1-1+A1 (říjen 2017) – Výpočet dovolených proudů
- IV. PNE 33 3042 (leden 2003) – Příklady výpočtu zkratových proudů ve střídavých sítích
- V. PNE 33 3300 (2.vydání) – Navrhování a stavba venkovních vedení nad AC 45 kV

1 ÚVOD

Spotřeba elektrické energie na celém světě stále roste. K tomu abychom spotřebu pokryli, je nejdůležitější zajistit výrobu. Toto je zřejmá logická návaznost, u které je ale vynechán důležitý článek koloběhu, bez kterého by výroba byla bezvýznamná a spotřeba by neexistovala. Myšleným zapomenutým článkem je přenos energie z bodu výroby k místu spotřeby. Způsobů, jak energii přenášet, je mnoho, tato práce se konkrétně zabývá přenosem velkého množství energie na dlouhé vzdálenosti pomocí silových rozvodů. Silovými rozvody je zde myšleno venkovní nadzemní vedení a kabelové zemní vedení.

První třetina práce je věnovaná popisu obou druhů rozvodu elektrické energie s větším zaměřením na kabelové zemní vedení. Zaměření na kabelové zemní vedení má odůvodnění vzhledem k aktuálním trendům u laické společnosti, která v případech volby favorizuje právě tento druh přenosu energie. Hlavním důvodem bývá nedostatek informací k tomuto způsobu přenosu energie oproti přenosu pomocí venkovního nadzemního vedení, které je pro přenos energie používáno ve velké většině. Proto je zbytek práce věnován návrhu dimenzování kabelového vedení společně s návrhem trasy a vytvořením rozpočtu kabelového zemního vedení. Pro návrh bylo využito aktuální zakázky¹ od společnosti EG.D, a.s. Zakázka je řešena společností Union Grid s.r.o., prostřednictvím níž jsem mohl být součástí realizace zakázky.

Hlavním cílem práce je tedy navržení dimenzování kabelového vedení pro zmíněnou zakázku společně s přiblížením veškerých problémů, které v praxi při realizaci nového kabelového vedení nastávají. Hodnotové výsledky v bakalářské práci vycházejí z platných českých technických a podnikových norem. Používané postupy při návrhu trasy kabelového vedení jsou v souladu s veškerými normativními i legislativními požadavky.

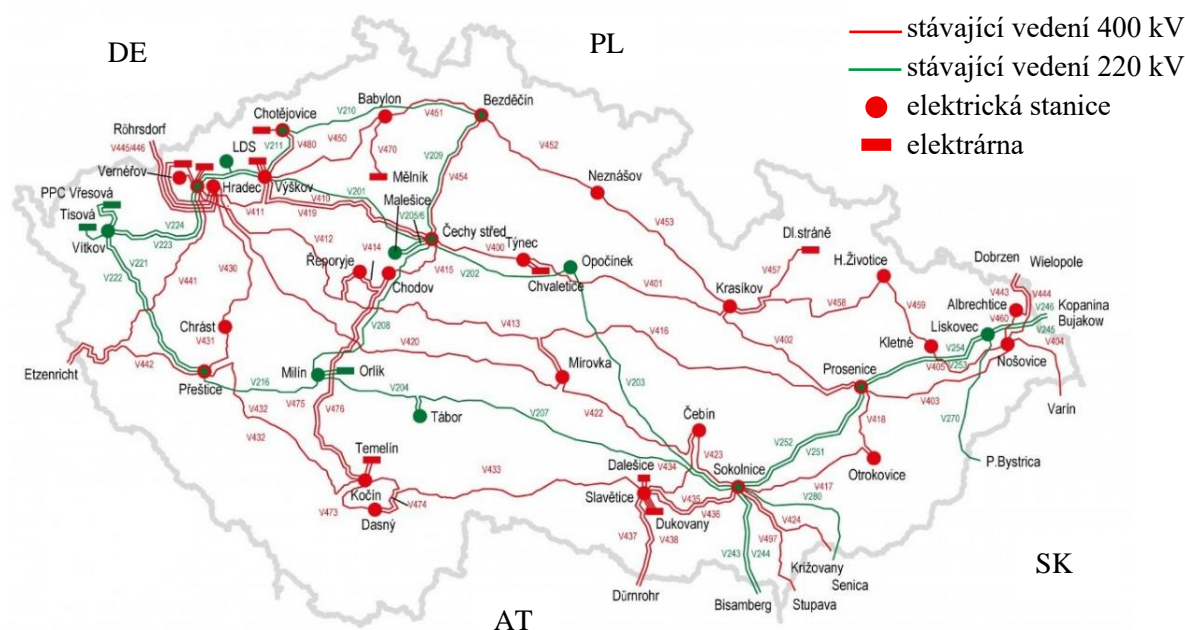
¹ Jedná se o koncepci rozvoje distribuční soustavy 110 kV EG.D, a.s. Přesněji jde o napojení stávající spínací stanice 22 kV Brno-sever k distribuční soustavě 110 kV a současné přestavbě stanice na transformovnu 110/22 kV. Připojení je provedeno novým 110 kV kabelovým vedením z místní teplárny Červený mlýn. Dále z nové transformovny povede druhý nový kabel ke spojovacímu směrem na Medlánky, kam původně ze zmíněné teplárny vedlo kabelové vedení, které se tímto bude rušit.

2 VENKOVNÍ A KABELOVÉ VEDENÍ VELMI VYSOKÉHO NAPĚTÍ

Pro celou kapitolu bylo čerpáno z vlastních poznámek a načerpaných znalostí z bakalářského studia elektrotechnické fakulty ČVUT. Pro rozšíření či doplnění určitých témat bylo také využito elektronických skript: „Rozvodná zařízení“ od Jaroslavy Orságové, vzdělávacího portálu společnosti ČEZ², a.s., a portálu oEnergetice³.

2.1 Elektrizační soustava a rozdělení napěťových hladin

Elektrizační soustava (dále jen „ES“) se skládá z výroby, přenosu a spotřeby elektrické energie. Venkovní nadzemní vedení a kabelové vedení slouží pro přenos elektrické energie, což znamená, že obě vedení jsou součástí elektrizační soustavy. Přenos vede od místa výroby k místu spotřeby a dělí se podle charakteru na dvě soustavy, soustavu přenosovou (dále jen „PS“) a distribuční (dále jen „DS“).



Obr. 2.1 - Přenosová soustava v ČR⁴

² ČEZ, a.s. - *Svět energie* [online]. Praha: ČEZ, a.s. [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/>

³ OEnergetice [online]. 2015 [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/>

⁴ ČEPS - Údaje o PS. ČEPS [online]. Praha, 2020 [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/udaje-o-ps>

Přenosová soustava, která je zobrazena na Obr. 2.1, slouží k přenosu velkých výkonů na velké vzdálenosti a tvoří páteř přenosu elektrické energie. Velké výkony jsou přenášeny díky vysoké hodnotě napětí a co nejnižší hodnotě proudu, jelikož ztráty na vedení rostou s druhou mocninou proudu. V roce 2020 činily ztráty v přenosové soustavě necelých 1,3 GWh a celková přenesená elektrická energie sahala k 65 GWh⁵. V České republice je přenosová soustava tvořena vedeními 400 kV (s délkou 3867 km), 220 kV (s délkou 1824 km) a nejméně zastoupeným vedením 110 kV (s délkou 84 km), které je realizováno jako venkovní nadzemní vedení. Přenosovou soustavu v České republice provozuje společnost ČEPS, a.s.

Distribuční soustava je propojovacím článkem mezi přenosovou soustavou a místem odběru elektrické energie. Rozvod elektrické energie je od hladiny napětí 400 V do hladiny 110 kV. Přechody z jednotlivých napěťových hladin realizují elektrické stanice, a to nejčastěji v tomto pořadí: 110 kV → 22 kV → 400 V. Rozdíl PS od DS je v zastoupení způsobu rozvodu elektrické energie, jelikož v DS jsou již ve větším počtu zastoupena kabelová vedení v zemi, a to i na hladině 110 kV. Provozovatel DS na rozdíl od PS není pouze jeden, ale jsou celkem tři. Pro celé území ČR mimo Prahu, jižní Moravu a jižní Čechy je provozovatelem společnost ČEZ Distribuce, a.s., pro jižní Čechy a jižní Moravu zajišťuje distribuci společnost EG.D, a.s., (dříve známá jako E.ON Distribuce) a distribuce na území Prahy je zajišťována společností PREdistribuce, a.s. Kompletní rozdělení napěťových hladin v elektrizační soustavě je zobrazeno v Tab. 2.1.

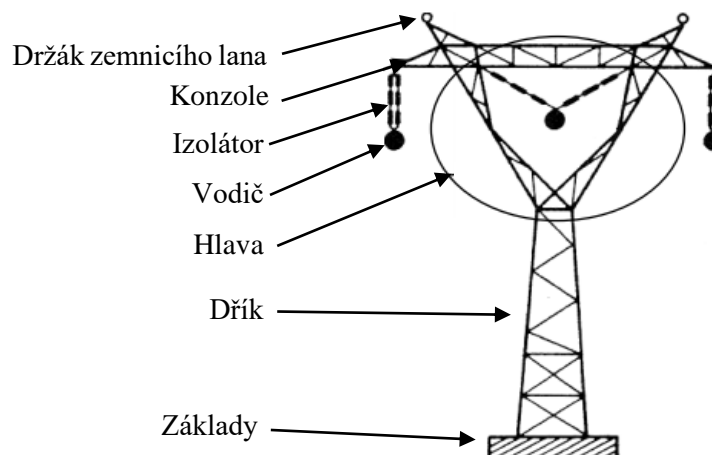
Napěťové hladiny	Napětí [kV]
ZVN	400
VVN	220
	110
VN	35
	22
	10
	6
NN	0,4

Tab. 2.1 - Napěťové hladiny elektrizační soustavy v ČR

⁵Veškeré statistické údaje v tomto odstavci vycházejí z : ČEPS - Údaje o PS. ČEPS [online]. Praha, 2020 [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/udaje-o-ps>

2.2 Venkovní vedení VVN

Venkovní kabelová vedení jsou realizována holými vodiči, které jsou přes izolátory upevněny k podpěrným stožárům. Vedení mohou být zřizována jako jednoduchá, dvojitá, případně vícenásobná na společných podpěrných stožárech. V případě dvojitých a vícenásobných vedení musí být vyřešeno vzájemné ovlivňování napěťových systémů. Výzbroj stožáru venkovního nadzemního vedení VVN je zobrazen na Obr. 2.2.



Obr. 2.2 - Výzbroj stožáru nadzemního vedení VVN⁶

2.2.1 Vodiče

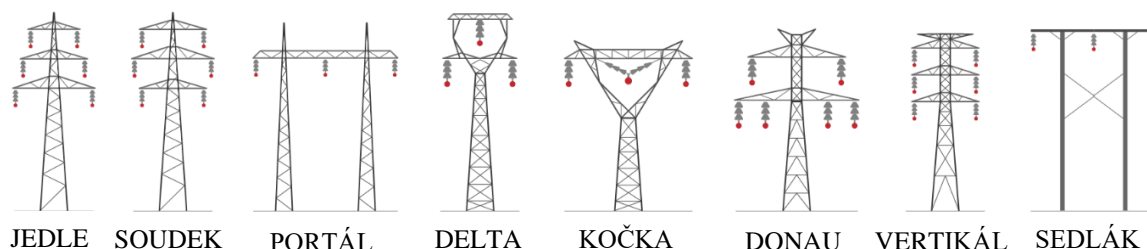
Základní požadavky, které musí vodič splňovat, jsou elektrická vodivost, mechanická pevnost a přijatelná cena. Přesněji vyjádřeno, co největší elektrická vodivost a dostatečující mechanická pevnost za co nejmenší náklady. Nejčastěji je vodivá část tvořena hliníkem, který nemá tak velkou elektrickou vodivost jako měď, ale je výrazně lehčí a levnější. Jádro pro hliníkovou vodivou část tvoří centrální pozinkovaná ocelová nosná část. Tyto typy vodičů se nazývají AlFe lana. Popsaný typ vodiče se používá jako fázový. Dále je u venkovního vedení potřebné zemnicí lano, které slouží jako ochrana proti atmosférickému přepětí a označuje se ZL. Dále může být zemnicí lano kombinované s označením KZL. Kombinovaná zemnicí lana obsahují navíc optická vedení, která jsou umístěna uvnitř lan a slouží pro přenos informace a komunikaci.

⁶ KOSTKA, Tomáš. *Elektroenergetika* [online]. In: . s. 36 [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: https://www.ssph.cz/vyuka/wp-content/uploads/2020/03/ee-prenos_rozvod_ee.pdf

Hlavním materiálem zemnicích lan ZL i KZL jsou stejné materiály jako pro fázové vodiče, nebo jsou ve výjimečných případech tvořeny pouze ocelovými pramenci Fe.

2.2.2 Podpěrné body⁷

Podpěrné body venkovního vedení VVN neboli stožáry tvoří bezpečnou cestu pro rozvod elektrické energie. Základní rozdělení dělí stožáry na jednodřívkové a portálové. Jednodřívkové příhradové stožáry mají čtvercový průřez dřívku, který se směrem k základně rozšiřuje. Čtyřboká ocelová příhradová konstrukce dobře odolává všem působícím namáháním. Portálová konstrukce je tvořena ze dvou dřívků, které jsou ve vrchní části spojeny příčným ramenem. Dále dělíme stožáry podle druhu zatížení a namáhání konstrukce na nosné, kotevní, rohové a koncové. Kotevní stožáry mají robustnější konstrukci a tvoří pevné body. Mezi kotevními stožáry se umísťují nosné stožáry, na které působí namáhání pouze svislé, jelikož vedení je napínané mezi kotevními stožáry. Rohový stožár slouží k odbočení z přímého směru, a vzniká zde tedy nerovnoměrné zatížení. Koncový stožár je namáhán pouze jednostranně. V praxi používané stožáry jsou zobrazeny na Obr. 2.3.



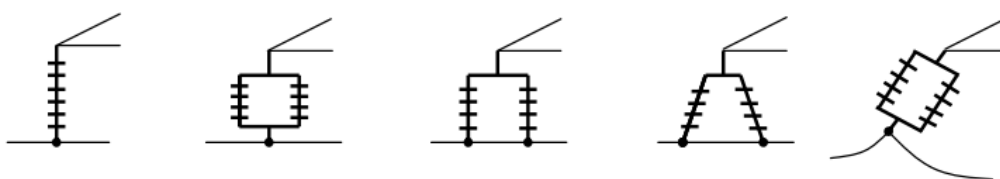
Obr. 2.3 - Základní typy a pojmenování stožárů pro VVN a ZVN⁸

⁷ Volně z: ČEZ, a.s., Energetika zblízka. *Svět energie: Vzdělávací portál ČEZ* [online]. Praha: ČEZ, a.s. [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/distribuce-elektriny/distribuce-elektricke-energie-podrobne/stozary-linek-vvn-vn-a-nn/vyklad>

⁸ Tamtéž

2.2.3 Izolátory

Pro kvalitní a bezpečný provoz nadzemních vedení je potřebné izolovat živé části od uzemněných prvků, tedy stožárů. Izolace je v tomto případě provedena vzduchem, a je tedy potřebné zařídit nevodivé uchycení vodičů v určité vzdálenosti (podle napěťové hladiny) od stožárů. K tomuto účelu slouží izolátory. Pro hladinu napětí VVN se používají nejčastěji závěsné izolátory ze skla nebo porcelánu. Dělí se opět na nosné a kotevní, podle druhu namáhání. Možné způsoby uchycení vodičů jsou zobrazeny na Obr. 2.4.



Obr. 2.4 - Způsoby uchycení vodičů⁹

Z Obr. 2.4 je patrné, že dochází i k zdvojování izolátorů. Hlavním důvodem zdvojování je zvýšení mechanické pevnosti. Toto zdvojování se nazývá „Vícenásobné izolátorové závěsy“. Norma PNE 33 3300 – *Navrhování a stavba venkovních vedení nad AC 45 kV* udává pravidla, kdy je takové uchycení nutné. Jedná se zejména o případy, kde jsou zvýšené bezpečnostní požadavky, nebo o případy, kdy jednoduché izolátorové závěsy (uchycení pouze s jednou větví izolátorů) nesplňují mechanické požadavky. Zmíněná norma udává i minimální vzdálenosti, které musí být dodrženy mezi vodičem a uzemněnou částí, tedy stožárem. Tyto vzdálenosti následně udávají počty, nebo délky izolátorů v izolátorovém závěsu.

Důležité parametry pro použití izolátorů:

- jmenovité napětí, jemuž odpovídá délka izolátoru (podle druhu izolátoru),
- mechanická pevnost v ohybu, nebo v tahu (podle druhu izolátoru),
- zkušební podmínky,
- konstrukce a materiál izolátoru.

⁹ KOSTKA, Tomáš. *Elektroenergetika* [online]. In: . s. 34 [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: https://www.ssph.cz/vyuka/wp-content/uploads/2020/03/ee-prenos_rozvod_ee.pdf

2.3 Kabelové vedení VVN

V této kapitole se ve velké míře vychází z podnikové normy PNE 34 1050 ed.3 – *Kladení kabelů NN, VN a 110 kV v distribučních sítích energetiky* (dále jen PNE 34 1050). Kabelová vedení VVN jsou vedena pod povrchem země v hloubce, která je dána normou, a stejně tak způsobem uložení, který je také určen normou. Kabely na této napěťové hladině jsou výhradně jednožilové pro přenos velkých výkonů. Na této hladině napětí se používají hlavně z prostorových důvodů při propojování rozveden v zastavěných oblastech. Výrobní délka těchto kabelů je 600 až 800 m, je tedy nutné kabely spojovat pro dosažení větších vzdáleností. Místo spoje se nazývá „spojkoviště“ a jedná se o nejslabší článek kabelového vedení, proto je potřeba, aby bylo dostupné pro kontroly.

2.3.1 Kabely VVN a jejich konstrukce¹⁰

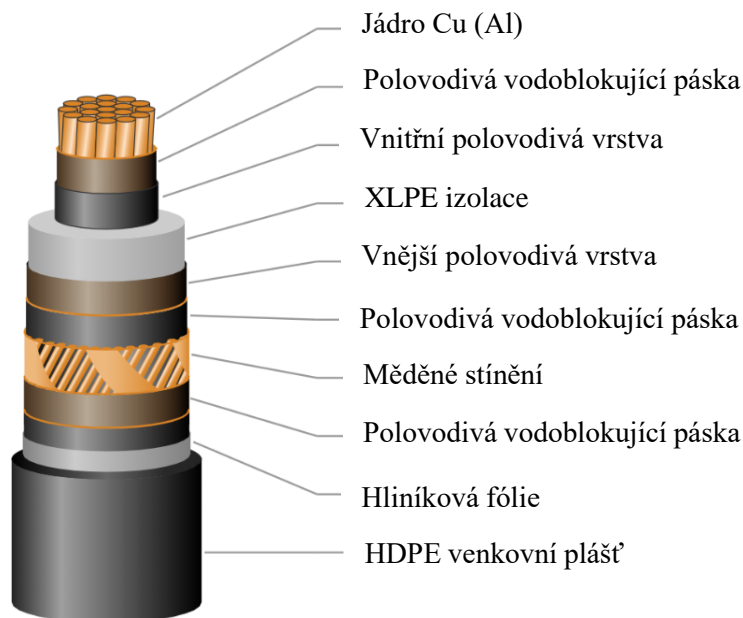
Kabely se používají výhradně jednožilové. Centrální část určená pro vedení elektrické energie je většinou z mědi (značíme: *Cu*), popřípadě hliníku (*Al*). Používá se měď elektrovodná neboli „standardní vyžíhaná měď“, jejíž elektrotechnické vlastnosti popisuje norma ČSN 42 3001 - *Měď elektrovodná 42 3001 Cu 99,9E*. Při výběru materiálu vodivého jádra je potřebné znát následky ovlivňující konstrukci kabelu. Výběrem hliníkového jádra vzroste vlivem nižší elektrické vodivosti průřez vodiče o 64 %, ovšem hmotnost kabelu je o 50 % menší než u kabelu s jádrem z elektrovodné mědi. Průměr vodivého jádra se dimenzuje na základě normy ČSN IEC 60287-1-1+A1 - *Elektrické kabely - Výpočet dovolených proudů - Část 1-1: Rovnice pro výpočet dovolených proudů (100% zatížitelnost) a výpočet ztrát – Obecně*, která určuje dovolené proudy podle všech vlivů a okolností, ve kterých se kabel nachází. Hlavní kritéria pro volbu vodiče jsou teplota vodičů při běžném provozu v dovolených mezích, hospodárný průřez, dostatečná pevnost, dovolený úbytek napětí a odolnost proti silovým a tepelným účinkům zkratových proudů.

¹⁰ Volně z: ORSÁGOVÁ, Jaroslava. *Rozvodná zařízení* [online]. 2015. VUT v Brně [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/16989703-Rozvodna-zarizeni-autor-textu-ing-jaroslava-orsagova.html>

Vodivé jádro je konstrukčně provedeno jako:

- lanované, zhušťované, kruhové,
- komprimované kruhové,
- segmentové, kruhové, duté.

Izolací vodivého jádra je především zesítěný polyetylen neboli XLPE. Následně obsahuje kabel kovové stínění, nebo kovové pláště pro odvedení svodových kapacitních proudů či jednofázových zkratových proudů. Stínění je provedeno měděnými dráty s protispirálou, popřípadě jako olovněný plášť, který zaručuje stoprocentní ochranu před vniknutím vody. Poslední vrstvu kabelu tvoří vnější plášť, jehož typ závisí na prostředí, v němž je kabel uložen. Je-li kabel uložen v prostředí s přítomností vzduchu, je potřeba použít nehořlavý materiál neboli materiál retardující plamen. Standardně je pro tyto účely používán vnější plášť z HDPE (polyetylen s vysokou hustotou). Pokud je kabel uložen v zemi, nemusí být vnější plášť z materiálu retardujícího plamen. Při uložení kabelu do vody je nutné použít kabel vodotěsného provedení. Vodotěsné provedení může být podélné nebo příčné. Vnější plášť musí obsahovat i polovodivou vrstvu pro účely zkoušek neporušitelnosti pláště. Zkoušky se provádějí po položení kabelu.



Obr. 2.5 - Vrstvy jednožilového kabelu VVN¹¹

¹¹ ČEZ, a.s., Energetika zblízka. *Svět energie: Vzdělávací portál ČEZ* [online]. Praha [cit. 2021-05-05]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/distribuce-elektriny/distribuce-elektricke-energie-podrobne/kabelova-vedeni/vyklad>

2.3.2 Kabelové spoje a koncovky VVN

Vysokonapěťové kabely se vyrábějí v maximálních vzdálenostech, které jsou zadané výrobcem. Potřebujeme-li vedení o větší vzdálenosti, je nutné kabely spojovat. Místa spojení kabelů zároveň slouží k vyvedení a uzemnění, popřípadě k transpozici kovového stínění kabelu, a nazýváme je „spojkoviště“. Místo spoje je zároveň nejslabším článkem kabelového vedení a je potřebné, aby bylo odolné před vniknutím vody a mělo potřebnou mechanickou odolnost. Jednotlivé spojky mohou být provedeny vedle sebe nebo za sebou, záleží přitom na prostorových možnostech v místě spojení. Spoje jsou umístěny na betonové desce mezi stěnami, které jsou z vhodného materiálu pro uložení do země, a tento prostor je následně zapískován a zakryt betonovými deskami a ochrannou fólií.

Koncovky vysokonapěťových kabelů se rozdělují na venkovní a vnitřní. Venkovní koncovky jsou určeny pro přechod z kabelového vedení pod povrchem země na venkovní nadzemní vedení. Vnitřní kabelové koncovky jsou určeny pro zakončení v rozvaděčích a transformátorech, které jsou izolované plynem SF₆. Koncovky jsou konstruovány jako suché nebo plněné izolačním olejem.

2.3.3 Uzemnění kovových stínění a kovových plášťů

Kovové stínění kabelů je uzemňováno pro zvýšení zatížitelnosti kabelů, snížení indukovaného napětí na stínění a ke snížení ztrát. Uzemnění kabelů je realizováno jednostranně (SPB), oboustranně (BEB, BE nebo SB), transpozičně (CB) popřípadě kombinací zmíněných uzemnění.

Jednostranně uzemněné systémy (SPB z anglického single-point bonding) jsou systémy používané pro kabelové vedení maximální délky do jednoho kilometru. Omezení je zavedeno pro případ průtoku poruchového proudu, při kterém by vzniklo nebezpečně vysoké napětí na neuzemněném konci kabelu, jehož velikost je následně přímo úměrná délce. Hodnoty indukovaného napětí se určují ze vztahu:

$$U_{i/l} = \sqrt{3} \cdot I \cdot X_m \quad [\text{V} \cdot \text{km}^{-1}; \text{A}, \Omega \cdot \text{km}^{-1}] \quad (2.1)$$

kde $U_{i/l}$ je indukované napětí na neuzemněném konci stínění vztažené na kilometr délky, I je proud ve fázovém vodiči a X_m je vzájemná reaktance mezi stíněním a fázovým vodičem. Pro celkové indukované napětí na neuzemněném konci je potřebné napětí $U_{i/l}$ vynásobit délkou vedení. Zmíněná hodnota vzájemné reaktance X_m se mění podle

konfigurace fázových vodičů. Pro konfiguraci do těsného trojúhelníku je vzájemná reaktance dána vztahem:

$$X_m = 2 \cdot \omega \cdot 10^{-4} \ln \frac{2 \cdot s}{D} \quad [\Omega \cdot \text{km}^{-1}; \text{s}^{-1}, \text{mm}, \text{mm}] \quad (2.2)$$

kde ω je úhlová frekvence, s je osová vzdálenost vodičů a D je střední průměr stínění. Pro uložení vedle sebe je vzájemná reaktance stínění dána jako:

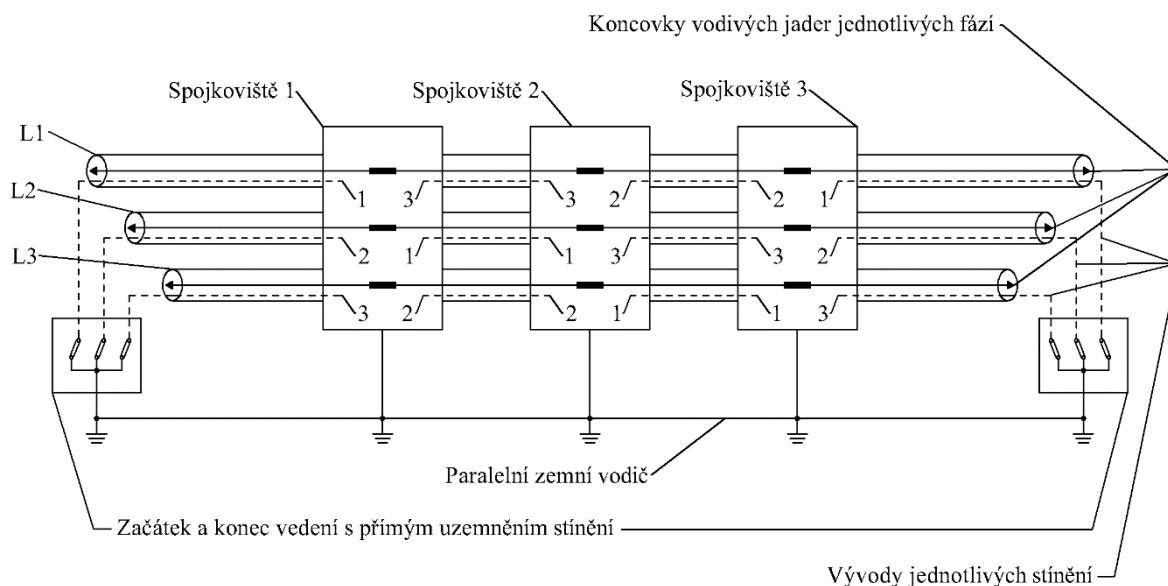
$$X_m = 2 \cdot \sqrt[3]{2} \cdot \omega \cdot 10^{-4} \ln \frac{2 \cdot s}{D} \quad [\Omega \cdot \text{km}^{-1}; \text{s}^{-1}, \text{mm}, \text{mm}] \quad (2.2)$$

kde jednotlivé parametry byly již objasněny výše. Případná přepětí je nutné limitovat svodiči přepětí. Paralelně s kabelem je potřebné vést zemní vodič, ke kterému je stínění na jednom konci přímo připojené, a na druhém konci je připojené přes svodiče přepětí. Paralelní zemní vodič tedy slouží k odvodu poruchových proudů a omezení interferencí na sdělovací vedení. V neporuchovém stavu neprotéká stíněním žádný proud, nevznikají ztráty, a to umožňuje větší zatížitelnost kabelu, což je zároveň největší výhoda tohoto typu uzemnění.

Oboustranně uzemněné systémy (BEB a BE z anglického both-ends bonding, nebo SB z anglického solid-bonding) jsou využívány pro vedení nad jeden kilometr délky v případech, kde není možné použít transpozici (CB). Vlivem oboustranného uzemnění mohou protékat stíněním indukované proudy, které zapříčiní vznik ztrát, a tím snižují zatížitelnost kabelu. Ve spojkořístích je možné provést transpozici žil k docílení vyšší zatížitelnosti a lepších poměrů pro interferenci. Hlavní nevýhodou je zde indukovaný proud ve stínění, který pro konfiguraci kabelů vedle sebe snižuje zatížitelnost o 10 až 15 %. Vlivem uzemnění na obou stranách vedení zde nevzniká napětí proti zemi, což je výhodou tohoto uzemnění.

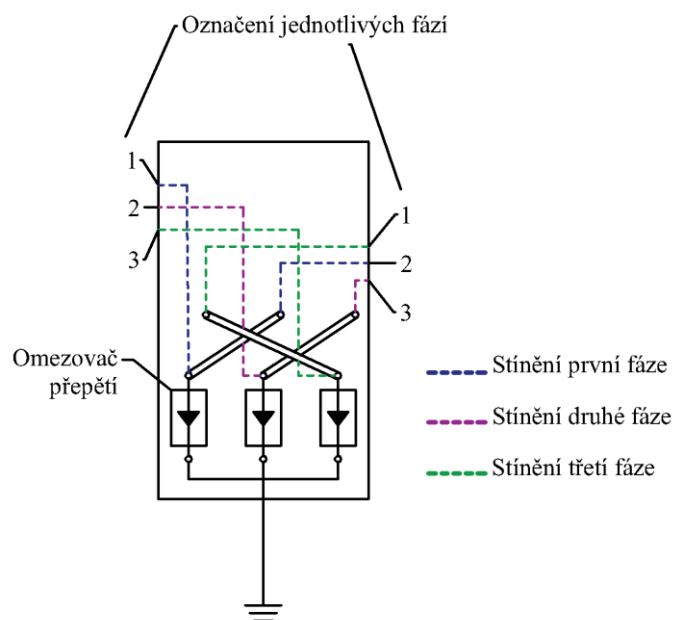
Transpozice (CB z anglického cross-bonding) je způsob uzemnění, které je na obou koncích vedení uzemněno a je využíváno pro kabelové vedení větších vzdáleností. Jednotlivé úseky mezi spojkořísti se nesmějí délkově lišit o více jak 10 %. Ve spojkořístích je stínění kabelu přerušené, oddělené, izolovaně vyvedené a křížově propojené. Transpozice je ekonomicky výhodná pro vedení o minimálně třech spojovaných kabelových úsecích. Při provozu je na kovovém stínění stálé indukované napětí, které musí odpovídat vymezeným hranicím dovoleného dotykového a krokového napětí. Pro omezení případných přepětí vlivem atmosférických či přechodových jevů se

v místech transpozice umísťujú omezovače prepětí. Výhodou transpozice je výrazné omezení proudů ve stínění, a s tím spojené snížení ztrát, a umožnění větší zatížitelnosti kabelu. Nevýhodou je složitější provedení spojkovišť kvůli izolovanému systému stínění. Provedení transpozice u třífázového vedení je zobrazeno na Obr. 2.6.



Obr. 2.6 - Transpozice 3f vedení



Přesnější interpretace propojení stínění ve spojkovišti je provedena na Obr. 2.7.



Obr. 2.7 - Propojení stínění ve spojkovišti

2.3.4 Konfigurace jednožilových kabelů

Kabely se konfigurují do trojúhelníkového těsného svazku (anglicky také „trefoil formation“), nebo jsou uloženy vedle sebe s mezerami (anglicky „flat formation“). Máme-li kabely uložené v chráničkách, je možné i uložení v trojúhelníkové konfiguraci s mezerami. Změna určitých vlastností vzhledem ke konfiguraci, a s tím související výhody a nevýhody, jsou popsány v Tab. 2.2. Pro udržení zvolené transfigurace jsou kabely dále upevňovány. Upevňování je prováděno pomocí svazkovacích pásek, polyamidových šňůr a PE spon.

Konfigurace	Těsný trojúhelník 	Vedle sebe 
Prostor uložení	Menší	Větší
Zatížitelnost	Vyšší při BEB Nižší při CB, SPB	Nižší při BEB Vyšší při CB, SPB
Ztráty ve vodičích	Nižší	Vyšší
Ztráty ve stínění	Nižší	Vyšší
Vnější tepelný odpor kabelu	Vyšší	Nižší
Magnetické pole nad kabelem	Nižší	Vyšší
Interference na okolí	Nižší	Vyšší

Tab. 2.2 - Důsledky transfigurace kabelových vedení¹²

2.3.5 Způsoby uložení kabelů v zemi

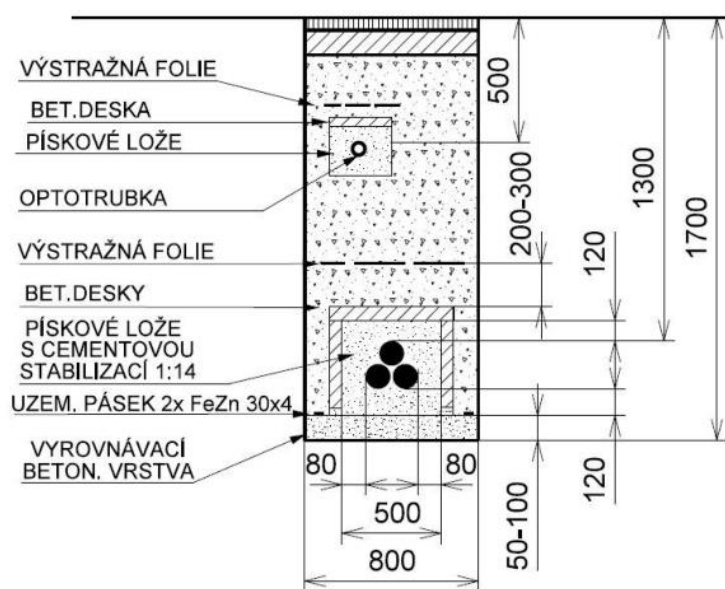
Kabely jsou ukládány různými způsoby dle vlivu okolních podmínek. Pro hladinu napětí 110 kV je hloubka uložení stanovena normou nejméně na 1,3 m, tato vzdálenost je brána od povrchu země k plášti uloženého kabelu. Hloubka uložení může být jiná, a to např. vlivem křížení s teplovodem, vodním tokem, či jiným kabelovým vedením (prvky technické infrastruktury). Pravidla při křížení, která je nutné dodržovat, určuje norma ČSN 73 6005 – *Prostorové uspořádání vedení technického vybavení*. Další důležité podmínky pro ukládání VVN kabelů do země jsou měrný tepelný odpor půdy, teplota okolí a osové vzdálenosti fází.

¹² PNE 34 1050. *Kladení kabelů NN, VN a 110 kV v distribučních sítích energetiky*. Třetí vydání. Praha: ČEZ Distribuce, a.s., EG.D, a.s., E.ON Česká republika, s. r. o., ČEPS, a.s., 2020.

Norma PNE 34 1050 dělí způsoby uložení takto:

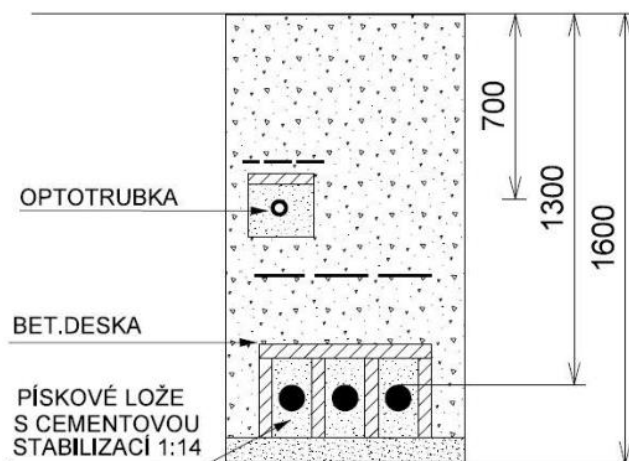
- uložení do pískového lože s cementovou stabilizací,
- uložení v kabelových chráničkách,
- uložení v kabelových žlabech,
- bezvýkopová metoda pluhováním,
- uložení kabelu v podvrtnu.

Pro uložení do pískového lože s cementovou stabilizací jsou kabely uloženy ve zmíněném loži v poměru cementu a písku (kopaný písek o velikosti zrn do 2 mm) 1:14. Tento poměr stabilizuje tepelný odpor na hodnotu 1,2 Km/W. V případě konfigurace kabelů do trojúhelníku je lože společné pro všechny kabely, které jsou následně ze stran a shora obklopeny betonovými deskami. Při rovinné formaci kabelů má každý kabel jedno lože obklopené z obou stran betonovými deskami, a shora jsou následně kabely zakryty také betonovou deskou. Lože musí být minimálně 120 mm od povrchu kabelu shora i zdola. Zmíněné betonové desky musí být minimálně 50 mm tlusté a 250 mm vysoké. Směrem vzhůru k povrchu země se po 200 až 300 mm od betonové desky nachází výstražná fólie. Je-li konfigurace kabelů trojúhelníková, je nutné ji svazkovat pro účel udržení formace. Vzdálenosti svazků jsou 3 m.



Obr. 2.8 - Uložení kabelu VVN v trojúhelníkové formaci¹³

¹³ PNE 34 1050. *Kladení kabelů NN, VN a 110 kV v distribučních sítích energetiky*. Třetí vydání. Praha: ČEZ Distribuce, a.s., EG.D, a.s., E.ON Česká republika, s. r. o., ČEPS, a.s., 2020.



Obr. 2.9 - Uložení kabelu VVN v ploché formaci¹⁴

Pro případ uložení pod komunikacemi, vjezdy a podobně se kabely ukládají do chrániček. Jednotlivé fáze jsou uloženy každá v jedné chráničce o minimálním průměru 1,5 krát větším, než je průměr kabelu. Společně s chráničkami pro jednotlivé fáze se ukládá i rezervní chránička. Pro následné tažení kabelu chráničkou je nutné, aby byly výstupy z chrániček provedeny tak, aby nezapříčinily poškození kabelu. Není doporučeno tažení kabelu chráničkou v ohybu ani na površích, které nejsou horizontálně a vertikálně zcela rovné. Při tažení by mohlo dojít k proříznutí plastové chráničky, celkové deformaci a celkovému zneprůchodnění prostupu.

Není-li možné použít uložení do pískového lože s cementovou stabilizací, nebo je potřeba chránit stávající vedení a zároveň je žádoucí vedení dostatečně mechanicky chránit, využije se uložení v kabelových žlabech.

Pro případy uložení kabelů přes vodní toky je možné využít metodu tzv. pluhování. Je uplatňována v případech dlouhých úseků bez spojek a je realizována zaoráváním. U této metody nelze zabezpečit mechanické krytí betonovými deskami a není vhodné v místech s křížením s inženýrskými sítěmi. Je ovšem možné v jednom pracovním cyklu uložit všechny tři vodiče kabelového vedení i s možností umístění výstražné fólie nad trasu kabelu. Pluhování je provedeno pokládkovým nožem, který odtlačuje zeminu a zároveň formuje dno zářezu. Na dno zářezu je následně položeno vedení.

¹⁴ PNE 34 1050. *Kladení kabelů NN, VN a 110 kV v distribučních sítích energetiky*. Třetí vydání. Praha: ČEZ Distribuce, a.s., EG.D, a.s., E.ON Česká republika, s. r. o., ČEPS, a.s., 2020.

Při přechodech vozovky je využívána metoda podvrtnu. Je pro to využívána metoda řízeného vrtání. Před podvrtem je nezbytné provést geologický průzkum např. pro zjištění těžitelnosti zeminy, která má následně vliv na velikost tlačné síly a na tloušťku protlačovaného potrubí.

2.4 Výběr druhu vedení

Při plánu výstavby nového druhu vedení či rozšiřování přenosové nebo distribuční soustavy je na hladině VN, VVN a ZVN v České republice využíván rozvod pomocí venkovního nadzemního vedení. To je tvrzení, které platí výhradně pro nezastavěné oblasti. Hlavním důvodem jsou náklady na výstavbu, ale dále i provoz a údržbu. Náklady na výstavbu kabelového vedení jsou totiž vždy vyšší. Existují výjimky, ale zmiňujeme-li linku vedení VN, VVN nebo ZVN, je tomu tak vždy. Cena výstavby je velmi závislá na terénu a okolnostech, kde má být stavba realizována. Záleží tedy na tom, jaký má terén profil, zda dochází ke křížení s inženýrskými sítěmi, jaký způsob uložení je vyžadován vzhledem k okolnostem, kolik je v kabelové trase spojkořísť (což závisí na délce vedení) a hlavně o jakou třídu těžitelnosti zeminy se jedná. Toto je výčet hlavních kritérií, která výrazně ovlivňují náklady kabelového vedení. V Tab. 2.4 jsou zobrazeny ceny za provedení výkopových prací pro kabelové vedení. Tab. 2.4 i další níže uvedené údaje jsou z katalogu ÚRS CZ a.s.¹⁵, což je společnost zabývající se oceňováním stavební produkce. Pro podzemní vedení ovšem nestačí mít pouze lidově řečeno „vykopanou díru“. Kabel, jak již bylo zmíněno, musí být uložen v normou daném loži. Dále bude podle kabelové trasy nutné například využití protlaku nebo přechodu vodních toků. Náklady s tímto spojené jsou zobrazeny v Tab. 2.5. Samozřejmě tomu tak není jen u kabelového zemního vedení. I v případě venkovního vedení jsou náklady na výstavbu různé podle okolností a terénu. Největší náklady u venkovního vedení jsou spojeny s typem stožáru, profilem trasy a počtem kotevních a rohových stožárů. V Tab. 2.6 jsou nastíněny náklady spojené s výstavbou základů pro stožár. Pokud bychom nyní porovnali náklady na výstavbu, a to z informací, které jsou nám dosud známé, tak je mezi dvěma druhy vedení patrný jeden velký rozdíl, a to náklady při výstavbě.

¹⁵ ÚRS - *Cenová soustava* [online]. Praha, 2021, 2. pololetí 2021 [cit. 2021-08-01]. Dostupné z: <https://app.urs.cz/>

U kabelového podzemního vedení jsou náklady ve velké míře spojené s výkopovými pracemi, kdežto u nadzemního vedení tomu tak není. Jedná o samotné stožáry, přesněji jejich typy. Je tedy možné konstatovat, že kabelové vedení je typ, u kterého může dojít mnohem častěji k prodražení. To tedy vysvětluje prvotní tvrzení dominance nadzemního vedení v nezastavěných oblastech. Elektrickou energii je ovšem potřebné rozvést i do měst, tedy zastavěných oblastí. To je v podstatě důvod, proč je rozvod elektřiny realizován tak, aby se dostal k co největšímu počtu spotřebitelů. Pohybujeme-li se tedy v zástavbě, není použití nadzemního vedení možné realizovat (zastavěnou oblastí jsou zde myšlena města, nikoliv malé obce, kde nadzemní kabelové vedení není okamžitě vyhodnoceno jako nerealizovatelné). Ovšem nemožnost realizace zde není myšlena z důvodu nárůstu nákladů nad náklady zemního kabelového vedení, ale hlavně z důvodů bezpečnostních. Dále také legislativa České republiky stanovuje povinnost ukládat rozvody elektrické energie v zastavěných územích na hladině VVN pod zem (od roku 2018 to již neplatí pro vedení na hladině ZVN)¹⁶. Je tedy povinností v zastavěných oblastech použít kabelové zemní vedení, ovšem pokud existují pádné důvody pro uložení vedení nad zem, tak při udělení výjimky lze provést.

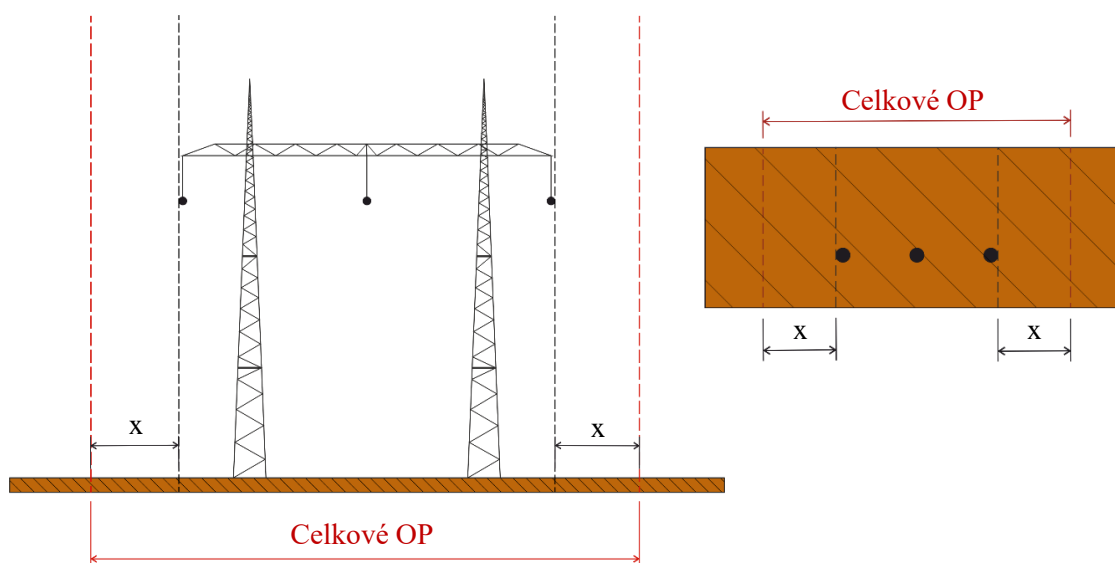
Z výše popsaného je tedy patrné, že potenciální výběr druhu rozvodu elektrické energie je daný výhradně ekonomickou stránkou výstavby. Na začátku této kapitoly byly ovšem zmíněny náklady i na provoz a údržbu, kterým jsme se dosud nevěnovali. Co se týče provozu, v konečném součtu by vycházelo pomyslně „výhodnější“ kabelové zemní vedení. A to hlavně díky odstranění téměř všech nepříznivých vlivů okolí, jako je např. námraza a vítr. U nadzemního vedení je ale výhoda průměrně 2× větší životnosti. Z pohledu údržby je možné říct, že nadzemní vedení je „lepší“ volbou. A to hlavně z důvodu jednoduššího nalezení poruch na vedení. Tuto výhodu ovšem není možné přímo porovnávat s kabelovým vedením z důvodu menší nutnosti hledání poruch, jelikož je četnost poruch u kabelového vedení menší. Dalším důležitým faktorem, jak ovlivňují jednotlivé druhy vedení své okolí, je ochranné pásmo (dále jen „OP“), což je prostor v bezprostřední blízkosti zařízení elektrizační soustavy sloužící k ochraně

¹⁶ OEnergetice. Jsou podzemní kabelová vedení řešením pro českou krajinu?. *OEnergetice* [online]. Třebíč: OM Solutions, s.r.o., 2015 [cit. 2021-05-06]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/prenos-elektriny/jsou-podzemni-kabelova-vedeni-resenim-ceskou-krajinu>

života, zdraví a majetku osob. Přehled, jak velká jsou OP vzhledem k hladině napětí daného vedení, je v Tab. 2.3, grafická interpretace je propojena s tabulkou v Obr. 2.10.

Rozsah napětí [kV]	Druh vedení	Typ Vodiče	Velikost OP – x [m]
$U \in (1 - 35 >$	NADZEMNÍ	Bez izolace	7
	NADZEMNÍ	Se základní izolací	2
	NADZEMNÍ	Závěsné kabelové vedení	1
	PODZEMNÍ	Kabel	1
$U \in (35 - 110 >$	NADZEMNÍ	Bez izolace	12
	NADZEMNÍ	Se základní izolací	12
	NADZEMNÍ	Závěsné kabelové vedení	5
	PODZEMNÍ	Kabel	1
$U \in (110 - 220 >$	NADZEMNÍ	Bez izolace	15
	PODZEMNÍ	Kabel	3
$U \in (220 - 400 >$	NADZEMNÍ	Bez izolace	20
	PODZEMNÍ	Kabel	3
$U > 400$	NADZEMNÍ	Bez izolace	30
	PODZEMNÍ	Kabel	3

Tab. 2.3 - Ochranná pásma vedení elektrické energie¹⁷



Obr. 2.10 - Ochranné pásmo nadzemního a kabelového vedení

¹⁷ ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 458/2000 Sb., o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon). In: *Sbírka zákonů*. Praha: Ministerstvo vnitra ČR, 2000, částka 131. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-458/zneni-20210101>

Z přehledu je patrné, že venkovní nadzemní vedení má OP rozsáhlejší, ovšem to nemusí nutně znamenat, že by na svoje okolí mělo větší dopady nebo omezení.

Společná omezení pro oba druhy rozvodu elektrické energie v OP:

- bez souhlasu vlastníka je zakázáno zřizovat či umisťovat konstrukce a jiná podobná zařízení, jakož i uskladňovat hořlavé a výbušné látky,
- bez souhlasu vlastníka je zakázáno provádět zemní práce,
- zákaz provádět činnosti, které by mohly ohrozit spolehlivost a bezpečnost provozu vedení elektrické energie nebo ohrozit život, zdraví či majetek osob,
- zákaz provádět činnosti, které by znemožňovaly nebo podstatně znesnadňovaly přístup k vedení elektrické energie.

Omezení pro venkovní nadzemní vedení:

- zákaz vysazování chmelnice a ponechání růstu porostů nad výškou 3 m.

Omezení pro kabelové podzemní vedení:

- zákaz vysazování trvalých porostů,
- zákaz přejíždět vedení mechanismy o celkové hmotnosti nad 6 tun.

Přehled příkladů cen za práce při výstavbě vedení:

- Tab. 2.4 zobrazuje ceny za výkopové práce

Třída těžitelnosti zeminy	Skupina	Hloubení zapažených i nezapažených rýh ručně v soudržných horninách		Hloubení nezapažených rýh strojně přes 100 m ³	
		Cena za m ³ [Kč]		Cena za m ³ [Kč]	
		Šířka 800 mm	Šířka 800 až 2000 mm	Šířka 800 mm	Šířka 800 až 2000 mm
I	1 a 2	847,00	717,00	226,00	122,00
	3	1410,00	1180,00	450,00	202,00
II	4	1960,00	1610,00	608,00	265,00
	5	2710,00	2640,00	946,00	399,00
III	6	-	-	1150,00	779,00
	7	-	-	-	-

Tab. 2.4 - Ceny výkopových prací (bez DPH)¹⁸

¹⁸ Proškrtnuté ceny u tříd těžitelnosti 6 a 7 jsou kvůli nutnosti použít trhavinu. Tento úkon má svá nacenění.

- Ceny za obvyklé práce při realizaci kabelového zemního vedení

Zemní protlaky strojně délky do 20 m a hloubky do 6 m pro skupiny těžitelnosti 1 až 4 s vtažením ocelové trubky		Rýha pro kabelové spojky přes 10 kV ručně		Kabelové lože z písku pro kabely VN a VVN kryté betonovou deskou		Zásyp strojně se zhutněním rýh šířky 80 cm a hloubky 150 cm	
Průměr [mm]	Cena za m [Kč]	SK ¹⁹	Cena za kus [Kč]	Šířka lože [mm]	Cena za kus [Kč]	SK	Cena za m [Kč]
do 300	15 500,00	1	3 000,00	30 až 40	152,00	1 a 2	189,00
300 až 400	18 100,00	2	3 610,00	40 až 50	181,00	3	210,00
400 až 500	20 800,00	3	5 340,00	50 až 60	218,00	4	231,00
500 až 600	23 100,00	4	7 400,00	60 až 70	256,00	5	254,00
600 až 700	25 300,00	5	10 200,00	70 až 80	285,00	6	-
-	-	6	-	80 až 90	324,00	7	-
-	-	7	-	90 až 100	367,00	-	-

Tab. 2.5 - Práce spojené s výstavbou podzemního vedení (bez DPH)

- Práce spojené s výstavbou venkovního nadzemního vedení

Montáž venkovního vedení s oblastí znečištění I až III – 6 vodičů		Montáž zemnicího lana a kombinovaného zemnicího lana	
Typ	Cena za kus [Kč]	Položka	Cena za kus [Kč]
110 kV nosné s průřezovou plochou vodičů do 300 mm ²	80 000,00	Montáž ZL na nosný stožár	12 700,00
110 kV kotevní s průřezovou plochou vodičů do 300 mm ²	252 900,00	Montáž ZL na kotevní stožár	43 300,00
220 kV nosné s průřezovou plochou vodičů do 450 mm ²	105 600,00	Montáž KZL na nosný stožár	15 200,00
220 kV kotevní s průřezovou plochou vodičů do 450 mm ²	337 000,00	Montáž KZL na kotevní stožár	35 200,00
400 kV nosné ²⁰	251 100,00	-	-
400 kV kotevní	1 344 500,00	-	-

Tab. 2.6 - Náklady při výstavbě nadzemního vedení (bez DPH)

Třídou těžitelnosti v uvedených tabulkách je myšleno rozdělení různých druhů zemin do svých tříd vzhledem k obtížnosti vyhloubení rýh a ostatních úkonů, které je nutno provést. Výše uvedené tabulky využívají rozdělení zemin do tříd podle normy ČSN 73 3055 – *Zemní práce při výstavbě potrubí*.

¹⁹ Zkratka SK v této tabulce označuje slovo: „Skupina“, čímž je myšlena skupina třídy těžitelnosti zeminy

²⁰ Pro 400 kV vedení se jedná o montáž pro oblast znečištění I a II.

Můžeme tedy konstatovat, že hlavním aspektem pro výběr druhu vedení elektrické energie jsou náklady spojené s výstavbou, kde jsou mezi oběma druhy vedení největší a směrodatné rozdíly. Následně, v případě, kdy je již jasné, jaký druh vedení bude zvolen, vstupují do procesu možné výhody či nevýhody s tím spojené. Tyto výhody a nevýhody nejsou rozhodujícími faktory. Celkové náklady u podzemního kabelového vedení se mohou v nejlepších podmínkách pouze přiblížit nákladům nadzemního vedení. Nejsou-li podmínky ideální, může být cena za podzemní kabelové vedení až třicetinasobkem vedení nadzemního.

3 PROBLEMATIKA DIMENZOVÁNÍ KABELŮ VELMI VYSOKÉHO NAPĚTÍ

Pro tuto kapitolu bakalářské práce bylo využíváno výhradně znalostí čerpaných při studiu²¹. Rozšíření zde tvořilo dílo Jaroslavy Orságové: *Rozvodná zařízení*. Účelem této kapitoly je sjednotit veškeré aspekty ovlivňující dimenzování silových kabelů pro bezpečný a spolehlivý přenos elektrické energie. Tyto aspekty jsou:

- provozní teplota v dovozených mezích,
- průřezy vodičů v hospodárných mezích,
- dostatečná mechanická pevnost,
- úbytek napětí v dovozených mezích,
- odolnost vůči účinkům zkratů.

Výše zmíněné požadavky jsou hlavně technického charakteru, ovšem nesmí se zapomínat, že v dimenzování kabelových vedení mají vliv i požadavky jako:

- nízké pořizovací a provozní náklady,
- prostorová nenáročnost,
- bezpečnost vůči osobám a věcem.

Není ale možné vždy splnit všechny požadavky, a to mj. i z důvodu, že některé požadavky jsou protichůdné. Hledá se tedy kompromis u těch faktorů, které jej připouštějí. Možné to není například u technických požadavků, které musí být bezvýhradně splněny pro spolehlivý, kvalitní a bezpečný provoz.

3.1 Provozní teplota v dovozených mezích

Tzv. dovozená provozní teplota je nejvyšší teplota, při které může být vodič v provozu bez poruchových a jiných nežádoucích stavů. Je dána druhem izolace. Pokud by docházelo v provozu k vyšším teplotám, mělo by to za důsledek výrazné snížení životnosti kabelu, zhoršení mechanických vlastností a nepříznivé ovlivňování okolí

²¹ České vysoké učení technické Praha - Katedra elektroenergetiky: *Přednášky z předmětu B1B15EN1*. Fakulta elektrotechnická v Praze, 2020.

kabelu. Zaměříme-li se na teplo, které působí na silový kabel, je možné ho rozdělit na teplotní zatěžování způsobené vlastním provozem a na teplo, které na kabel působí z vnějšku.

První zmíněné teplotní zatížení je dáno proudovým zatěžováním kabelu, tedy Jouleovými ztrátami, které jsou úměrné kvadrátu protékaného proudu. Do vnějšího teplotního působení se řadí teplota prostředí, tedy předávání tepla kondukcí, konvekcí a sáláním z okolí silového kabelu, s tím tedy souvisí i způsob uložení. Dále má také vliv sluneční záření, a také jiné inženýrské a kabelové sítě v okolí dimenzovaného silového kabelu. Chceme-li se držet pod hodnotou dovolené provozní teploty ϑ_{dov} , vycházíme z dovoleného proudového zatížení I_{dov} , které nám následně určuje minimální průřez elektrovedné části.

$$I_{dov} = k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_n \cdot I_{nv} \quad [A; -, A] \quad (3.1)$$

kde I_{dov} je dovolené proudové zatížení, koeficienty k_1 až k_n jsou přepočítávací koeficienty vyjadřující různé podmínky a prostředí uložení, typy průřezů vodičů apod., lze je nalézt v normě ČSN 33 2000-5-52 ed.2 – *Elektrické instalace nízkého napětí*²², a I_{nv} je jmenovitá proudová zatížitelnost udávaná výrobcem, která odpovídá základnímu způsobu uložení bez překročení dovolené provozní teploty. Referenční hodnoty pro základní způsoby uložení udává norma ČSN IEC 287 – *Elektrické kabely – Výpočet dovolených proudů*.

Průřez elektrovedné části je následně dán:

$$S_{min} \geq \frac{I_{dov}}{J} \quad [mm^2; A, A \cdot m^{-2}] \quad (3.2)$$

kde S_{min} je minimální průřez elektrovedné části, I_{dov} je zmíněné proudové zatížení a J je dovolená proudová hustota elektrovedného materiálu.

Na další stránce je uvedena tabulka Tab. 3.1, která zobrazuje provozní a maximální teploty vodičů pro různé druhy izolace.

²² Tato norma obsahuje pouze „klasické odchylky“ od referenčních hodnot. Není zde tedy k nalezení přepočet pro všechny možné situace, které mohou v praxi nastat. Pro přesné přepočty slouží norma ČSN IEC 60 287-1-1+A1 – *Výpočet dovolených proudů*.

Druh izolace vodiče	Zkratka názvu	Značka	Základní teplota okolního vzduchu [°C]	Nejvyšší dovolená provozní teplota [°C]	Nejvyšší dovolená teplota [°C]	
					Při proudovém přetížení	Při zkratu
Polyvinylchlorid měkčený	PVC	Y	30	70	120	140-160
Zesíťený polyetylén	XE	X	30	90	120	250
Propylén	FEP		90	200	250	250

Tab. 3.1 – Provozní a maximální teploty vodičů podle druhu izolace²³

Tab. 3.2 zobrazuje změnu koeficientu vzhledem k různým teplotám okolí (vzduchu i země), a to jen pro dovolenou provozní teplotu 90 °C. Volba pouze této teploty souvisí s přímým dimenzováním kabelu, čemuž se věnujeme v další kapitole této práce (kap. 4).

Nejvyšší dovolená provozní teplota jádra	Teplota okolního vzduchu [°C]									
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
90 °C	1,15	1,12	1,08	1,04	1,00	0,96	0,91	0,87	0,82	0,76
	Okolní teplota země [°C]									
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
90 °C	1,07	1,04	1,00	0,96	0,93	0,89	0,85	0,80	0,76	0,71

Tab. 3.2 – Vliv teploty okolí na přepočítavací koeficient²⁴

3.2 Průřez vodičů v hospodárných mezích

Hospodárný průřez je spjat s hospodárnou proudovou hustotou, která závisí na době plných ztrát τ_z . Doba plných ztrát je časový úsek v hodinách za rok, který udává, jak

²³ ČSN 33 2000-4-43 ed. 2 Elektrické instalace nízkého napětí - Část 4-43: Bezpečnost - Ochrana před nadproudy. Druhá edice. Praha: Česká agentura pro standardizaci s.p.o., 2010.

²⁴ ČSN 33 2000-5-52 ed.2 Elektrické instalace nízkého napětí - Část 5-52: Výběr a stavba elektrických zařízení - Elektrická vedení. Druhá edice. Praha: Česká agentura pro standardizaci s.p.o., 2012.

dlouhý byl provoz s maximálními činnými ztrátami, aby celkové ztráty odpovídaly proměnlivému zatěžování za dobu T .

$$\int_0^T R \cdot i^2(t) \cdot dt = R \cdot I_{max}^2 \cdot \tau_z \quad [\Omega, A, s; \Omega, A, h \cdot rok^{-1}] \quad (3.3)$$

kde levá strana rovnice odpovídá činným ztrátám proměnlivému zatěžování za dobu T a pravá strana rovnice odpovídá maximálním činným ztrátám po dobu plných ztrát. Z rovnice 3.3 plyne:

$$\tau_z = \frac{\int_0^T i^2(t) \cdot dt}{I_{max}^2} \quad [h \cdot rok^{-1}; A, s, A] \quad (3.4)$$

kde τ_z je doba plných ztrát, $i(t)$ je zatěžovací proud a I_{max} je maximální hodnota proudu na kterou se $i(t)$ za svůj průběh v čase dostane. Pomocí doby plných ztrát můžeme následně vypočítat hospodárny průřez jako:

$$S_h = k \cdot I_V \cdot \sqrt{\tau_z} \quad [mm^2; -, A, h \cdot rok^{-1}] \quad (3.5)$$

kde S_h je hospodárny průřez vodiče, I_V je výpočtový proud a k je součinitel udávaný normou podle druhu vedení. Výsledný hospodárny průřez udává minimální průřez, který dané vedení musí mít. Zároveň může průřez určit i jiná ze zásad dimenzování, přičemž může jít o větší než hospodárny průřez, následně toto kritérium dimenzování neovlivní, jen ho kontroluje. Norma zabývající se hospodárným průřezem se nazývá ČSN 34 1610 – *Elektrotechnické předpisy ČSN*.

3.3 Dostatečná mechanická pevnost

Vodiče, a s nimi i celková vedení musí být dimenzovány tak, aby odolaly mechanickému namáhání, kterému budou za celý cyklus svého života vystaveny. Mechanickému namáhání je zejména vystaveno vedení venkovní nadzemní, na které působí klimatické a povětrnostní podmínky společně s námrazou. Kabelové vedení v zemi je namáháno zejména při pokládce, ale musí se brát v potaz i vlivy při zkratových proudech. Všechny ovlivňující vlivy se tedy musí zohlednit a následně se tomu musí přizpůsobit průřezy daných vedení. Průřezy se musí následně kontrolovat, zda jsou nad dovolenými hodnotami, které udává norma ČSN 34 1610 - *Elektrotechnické předpisy ČSN*.

3.4 Úbytek napětí v dovolených mezích

Rozvod elektrické energie má za hlavní požadavky spolehlivost, bezpečnost a udržování kvality elektrické energie. Právě s kvalitou jsou spjaty úbytky napětí, které chceme na vedení co nejmenší. Potřebujeme, aby se k zařízení, ke kterému rozvod elektrické energie vede, dostala hodnota napětí co nejbližší jmenovité hodnotě. Co nejbližší je v tomto případě myšleno určité pásmo okolo jmenovité hodnoty napětí. Norma ČSN EN 50160 – *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí* tato pásma udává. Obecně je z krátkodobého hlediska pro rozvodné soustavy možné vychýlení $\pm 10\% U_n$ a z hlediska dlouhodobého $\pm 5\% U_n$. Kvalita rozvodu elektrické energie je tedy ten důvod, proč je úbytek napětí jeden z aspektů při dimenzování vedení. Výpočet úbytku se dá rozdělit na výpočet úbytku kapacitní zátěže a na výpočet úbytku induktivní zátěže. Zdali se zátěž bere jako induktivní nebo kapacitní, je dáno proudem, který pro svou funkci odebírá. Vedení samo o sobě představuje také zátěž sítě, jelikož má svou impedanci. Induktivní zátěží je vedení venkovní nadzemní a kapacitní zátěží je vedení kabelové v zemi.

Výpočet úbytku napětí kapacitní zátěže:

$$\Delta \hat{U}_f = \hat{Z}_l \cdot \hat{I} = (R + jX) \cdot (I_c + jI_j) \quad [\text{V}; \Omega, \text{A}] \quad (3.6)$$

Výpočet úbytku napětí induktivní zátěže:

$$\Delta \hat{U}_f = \hat{Z}_l \cdot \hat{I} = (R + jX) \cdot (I_c - jI_j) \quad [\text{V}; \Omega, \text{A}] \quad (3.7)$$

kde $\Delta \hat{U}_f$ je úbytek fázového napětí, \hat{Z}_l je podélná impedance daného vedení o určité délce v komplexním tvaru a následná závorka $(R+jX)$ je rozepsaná komplexní impedance na reálnou a imaginární složku. Její reálná složka je činný odpor R , který je dán materiálovými vlastnostmi a provozní teplotou vodiče. Imaginární složka X se nazývá reaktance. Tyto parametry jsou dané výrobcem vedení. S proudem je význam značení stejný a následná závorka $(I_c \pm I_j)$ má také význam reálné a imaginární složky proudu.

3.5 Odolnost vůči účinkům zkratů

Zkrat je jedním z poruchových stavů, které mohou při provozu nastat, a zároveň se jedná o nejrozšířenější poruchu v ES. Zkraty se obecně dělí na souměrné a nesouměrné. Souměrný zkrat je zkrat třífázový, a pro kabelové vedení představuje nejčastější typ zkratu. Nesouměrné zkraty se dělí na dvoufázové, dvoufázové zemní a jednofázové. Následky, které se zkratem přicházejí, ovlivňují vodiče a celková vedení svými silovými a tepelnými účinky.

Silové účinky zkratových proudů

Máme-li dva paralelní vodiče v určité vzdálenosti a , kterými protéká proud I , tak je v oblasti jednoho vodiče od druhého vyvolaná magnetické pole o indukci B . Tuto magnetickou indukci lze určit z rovnice 3.8 jako:

$$\oint_a \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \cdot I \quad [\text{T, m; H}\cdot\text{m}^{-1}, \text{A}] \quad (3.8)$$

kde \mathbf{B} je vektor magnetické indukce, $d\mathbf{l}$ je element na indukční čáře vzdálené od ve stejné vzdálenosti jako je vzdálenost mezi vodiči a , μ_0 je permeabilita vakua a I je zmíněný celkový proud, který protéká vodičem. Zmíněná indukční čára představuje kružnici se středem v ose vodiče. Magnetická indukce je k této indukční čáře tečnou a vzhledem k symetrii je i konstantní. Je tedy možné ji vytknout před křivkový integrál a následně provést integraci po zmíněné kružnici o poloměru a . Výsledkem této integrace je rovnice 3.9:

$$B \cdot 2 \cdot \pi \cdot a = \mu_0 \cdot I \quad [\text{T, m; H}\cdot\text{m}^{-1}, \text{A}] \quad (3.9)$$

kde jednotlivé prvky rovnice byly popsány výše. Z rovnice 3.9 si lze vyjádřit magnetickou indukci jako:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot a} \quad [\text{T, m; H}\cdot\text{m}^{-1}, \text{A}] \quad (3.10)$$

kde jednotlivé prvky rovnice byly popsány výše. Známe-li nyní hodnotu magnetické indukce, tak je možné si vyjádřit sílu, která působí na vodič protékající proudem. Tato síla se nazývá Lorentzova a je zobrazena v rovnici 3.11:

$$\mathbf{F} = Q \cdot \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad [\text{N; C, m}\cdot\text{s}^{-1}, \text{T}] \quad (3.11)$$

kde \mathbf{F} je vektor síly působící na vodič v magnetickém poli, Q je náboj částice, \mathbf{v} je vektor rychlosti pohybu částice a \mathbf{B} je indukce magnetického pole.

Pokud nyní provedeme vektorový součin a vyjádříme jeho velikost, tak rovnici upravíme do tvaru:

$$F = Q \cdot v \cdot B \cdot \sin \theta \quad [\text{N}; \text{C}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}, \text{T}] \quad (3.12)$$

kde F je zmíněná síla působící na vodič, Q je náboj částice, v je rychlost pohybu částice, B je indukce magnetického pole a θ je úhel mezi vektorem rychlosti pohybu částic a vektorem magnetické indukce (pro náš případ je tento úhel 90° a sinus tohoto úhlu je 1). Konečnou úpravu vzorce provedeme rozepsáním náboje Q jako součin proudu s časem a rychlost v rozepíšeme jako vzdálenost (v našem případě délka vodiče l) za čas. Čas se pokrátí, výsledkem je tvar zobrazený v rovnici 3.13:

$$F = B \cdot I \cdot l \quad [\text{N}; \text{T}, \text{A}, \text{m}] \quad (3.13)$$

kde F je síla působící na vodič, B je již zmíněná magnetická indukce, I je proud, který protéká vodičem, l je délka vodiče. Dosadíme-li nyní z rovnice 3.10 za magnetickou indukci s vyjádřením za permeabilitu vakua ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$), dostaneme tvar:

$$F = \frac{2 \cdot I^2}{a} \cdot l \cdot 10^{-7} \quad [\text{N}; \text{A}, \text{m}, \text{m}] \quad (3.14)$$

Toto obecné vyjádření je nutné upravit pro zmíněný zkratový proud:

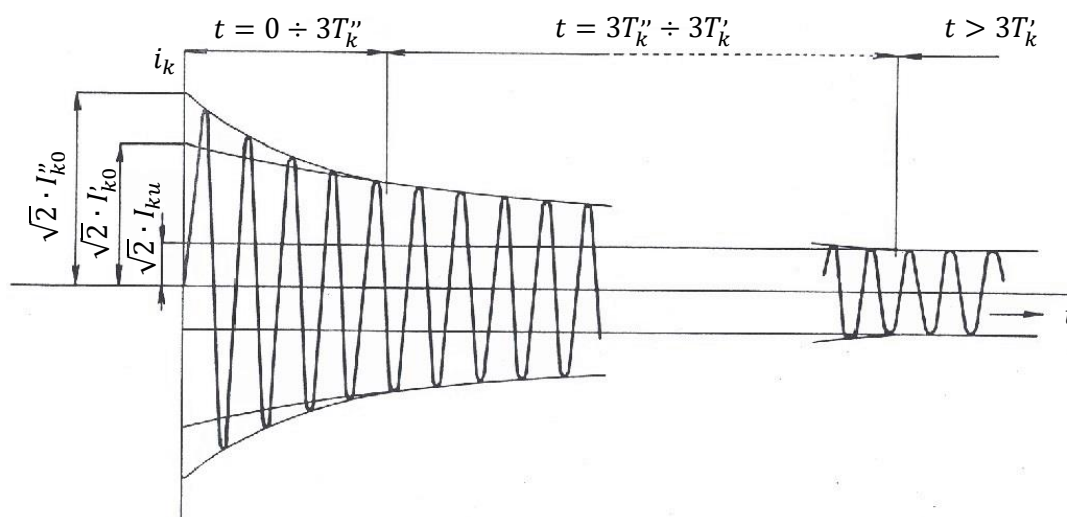
$$F_m = k \cdot \frac{2 \cdot I_{km}^2}{a_m} \cdot l \cdot 10^{-7} \quad [\text{N}; -, \text{A}, \text{m}, \text{m}] \quad (3.15)$$

kde F_m je síla působící na fázový vodič, koeficient k respektuje uspořádání vodičů a fázový posun proudů v jednotlivých vodičích. Vzdálenost od vodiče a_m přibyla o koeficient m na rozdíl od vzdálenosti a ve vzorci 3.14, což nyní představuje účinnou vzdálenost mezi vodiči. Je možné ji nahradit pouze vzdáleností mezi vodiči a , pokud se jedná o vodiče kruhového průřezu nebo je-li vodič složený z dílčích vodičů kruhového průřezu. Proud I_{km} je nejvyšší hodnota, na kterou se zkratový proud při svém průběhu dostane a je nazývána nárazovým zkratovým proudem, jehož hodnota vychází z počátečního rázového zkratového proudu I''_{k0} :

$$I_{km} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k0} \quad [\text{A}; -, \text{A}] \quad (3.16)$$

kde I_{km} je nárazová zkratový proud, I''_{k0} je rázový zkratový proud I''_k v čase $t = 0$ a κ je činitel vycházející z druhu sítě (teoretické maximum je 2). Hodnotu proudu I''_{k0} je možné vypočítat z parametrů sítě. Na Obr. 3.1 se nachází průběh souměrného zkratového proudu, kde je naznačeno, jak s časovým průběhem klesá velikost proudu z nárazového

zkratového proudu I_{km} , což je maximální hodnota zkratového proudu v období trvání $t \in (0 \div 3T_k'')$ na hodnotu přechodného zkratového proudu I_k' , což je maximální hodnota zkratového proudu v období $t \in (3T_k'' \div 3T_k')$. Hodnota proudu pro $t > 3T_k'$ se jmenuje ustálený zkratový proud I_{ku} a je to tedy proud po zániku přechodných složek. V indexech proudů na Obr. 3.1 se navíc objevuje „0“, jejímž významem je označení hodnoty daného proudu v časovém počátku, tedy v $t = 0$.



Obr. 3.1 - Průběh souměrného zkratového proudu²⁵

Pro úplnost je vhodné vyjádřit slovní pojmenování pro jednotlivé časové úseky (složky) zkratového proudu:

- $t \in (0 \div 3T_k'')$... rázová složka,
- $t \in (3T_k'' \div 3T_k')$... přechodná složka,
- $t > 3T_k'$... ustálená složka.

Průběh nesouměrného zkratu se od souměrného liší přítomností stejnosměrné složky, která by celkově zvýšila maximální zkratové hodnoty.

Tepelné účinky zkratových proudů

Jedná se o účinky, pomocí kterých získáváme požadavek na minimální průřez vodiče S_{min} , aby nedocházelo vlivem zkratového proudu k přehřívání vodiče nad dovolenou teplotu. Nejvyšší dovolené teploty vodiče při provozu a v případech zkratů udává norma

²⁵ České vysoké učení technické Praha - Katedra elektroenergetiky: Přednášky z předmětu B1B15EN1. Fakulta elektrotechnická v Praze, 2020.

podle druhu izolace, což bylo pro určité materiály izolace zobrazeno v Tab. 3.1. Vzhledem k rychlosti průběhu zkratového proudu se bere oteplení jako tzv. adiabatický děj, což znamená, že teplo, které se vyvine, se nestihne odvést do okolí, ale bude celé akumulováno vodičem. Vyvinuté teplo je přitom možné vypočítat jako:

$$Q = \int_0^{t_k} R(\vartheta) \cdot i_k^2(t) \cdot dt \quad [\text{J}; \Omega, \text{A}, \text{s}] \quad (3.17)$$

kde Q je již zmíněné vyvinuté teplo vodičem, $R(\vartheta)$ teplotně závislý odpor, t_k je čas, jak dlouho zkrat probíhal a $i_k(t)$ je skutečný zkratový proud v čase. Skutečný zkratový proud nám udává ekvivalentní oteplovací proud I_{ke} , který vyvolá stejné tepelné účinky jako časově proměnný proud $i_k(t)$:

$$I_{ke} = \sqrt{\frac{1}{t_k} \int_0^{t_k} i_k^2(t) \cdot dt} \quad [\text{A}; \text{s}, \text{A}, \text{s}] \quad (3.18)$$

kde I_{ke} je ekvivalentní oteplovací proud, t_k je čas, jak dlouho zkrat probíhal a $i_k(t)$ je skutečný zkratový proud v čase. Z rovnice 3.18 je patrné, že ekvivalentní oteplovací proud je efektivní hodnotou skutečného zkratového proudu. Proud I_{ke} je dále možné určit ze vzorce:

$$I_{ke} = k_e \cdot I''_{k0} \quad [\text{A}; -, \text{A}] \quad (3.19)$$

kde I_{ke} je zmíněný ekvivalentní oteplovací proud, koeficient k_e je přepočítávací koeficient, který závisí na době trvání zkratu t_k a I''_{k0} je rázový zkratový proud I''_k v čase $t = 0$. Přesné hodnoty koeficientu k_e udává norma ČSN EN 60 865 – 1 – *Elektrotechnické předpisy. Výpočet účinku zkratových proudů* a jsou zobrazeny v Tab. 3.3.

Doba trvání zkratu t_k [t]	Činitel k_e [-]	
	Zkrat v soustavě	
	NN	VN, VVN
Pod 0,05	1,60	1,50
0,05 – 0,1	1,50	1,20
0,1 – 0,2	1,40	1,10
0,2 – 1,0	1,30	1,05
1,0 – 3,0	1,10	1,00
Nad 3,0	1,00	1,00

Tab. 3.3 - Přepočítávací koeficient pro ekvivalentní oteplovací proud

Dále můžeme pomocí I_{ke} přepsat rovnici 3.17 jako:

$$Q = R(\vartheta) \cdot I_{ke}^2 \cdot t_k \quad [\text{J}; \Omega, \text{A}, \text{s}] \quad (3.20)$$

Jelikož se jedná o vyvinuté teplo Q ve vodiči o určitém materiálu a objemu, lze ho také vyjádřit jako:

$$Q = \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_k} c \cdot V \cdot d\vartheta \quad [\text{J}; \text{J} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}, \text{m}^3, \text{K}] \quad (3.21)$$

kde c je měrná tepelná kapacita materiálu a V je objem daného vodiče. Nyní je možné dosadit do rovnice 3.20 za vyvinuté teplo výraz v rovnici 3.19:

$$\int_{\vartheta_1}^{\vartheta_k} c \cdot V \cdot d\vartheta = R(\vartheta) \cdot I_{ke}^2 \cdot t_k \quad (3.22)$$

Dále je možné vyjádřit teplotně závislý odpor:

$$R(\vartheta) = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta) \quad [\Omega; \Omega, \text{K}^{-1}, \text{K}] \quad (3.23)$$

kde α je teplotní součinitel odporu materiálu vodiče a R_0 je odpor vodiče při 20 °C a lze ho vypočítat jako:

$$R_0 = \rho_{20} \cdot \frac{l}{S} \quad [\Omega; \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}, \text{m}, \text{m}^2] \quad (3.24)$$

kde ρ_{20} je měrná rezistivita materiálu při 20 °C, l je délka vodiče a S je průřez. Následně po dosazení rovnice 3.24 do rovnice 3.23 dostaneme:

$$R(\vartheta) = \rho_{20} \cdot \frac{l}{S} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta) \quad [\Omega; \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}, \text{m}, \text{m}^2, \text{K}^{-1}, \text{K}] \quad (3.25)$$

Nyní můžeme dosadit rovnici 3.25 do rovnice 3.22. Po dosazení se provedou potřebné matematické operace a výpočet integrálu. Z výsledného vztahu si vytkneme hledaný průřez S , který představuje nejmenší možný průřez pro nepřehřívání nad dovolenou teplotu. Pro úplnost významu tohoto průřezu jej označíme S_{min} . Výsledný vztah je tedy:

$$S_{min} = \frac{I_{ke} \cdot \sqrt{t_k}}{K} \quad [\text{mm}^2; \text{A}, \text{s}, \text{A} \cdot \text{s} \cdot \text{mm}^{-2}] \quad (3.26)$$

Kde S_{min} je minimální průřez vodiče, K představuje materiálovou konstantu, která je úměrná provozní teplotě ϑ_1 a teplotě při zkratu ϑ_k zvolené izolace. Zbývající parametry byly již popsány výše. Přesný výpočet materiálové konstanty je zobrazen v rovnici 3.27 na další straně.

$$K = \sqrt{\frac{c_0}{\alpha \cdot \rho_{20}} \cdot \ln \frac{1 - 20 \cdot \alpha + \alpha \cdot \vartheta_k}{1 - 20 \cdot \alpha + \alpha \cdot \vartheta_1}} \quad [\text{A} \cdot \text{s} \cdot \text{mm}^{-2}] \quad (3.27)$$

kde:

c_0 ...měrné objemové teplo při 0 °C [$\text{J} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$],

α ...teplotní součinitel odporu [K^{-1}],

ρ_{20} ...měrná rezistivita materiálu při 20 °C [$\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$],

ϑ_k ...nevyšší teplota při zkratu podle druhu izolace [K],

ϑ_1 ...nejvyšší provozní teplota podle druhu izolace [K].

4 DIMENZOVÁNÍ KABELU 110 KV PRO TR 110/22 KV BRNO – SEVER (KLUSÁČKOVA)

Tato kapitola je určena přímo pro návrh dimenzování kabelu 110 kV. Zároveň také popisuje postupy používané v praxi, které mohou být odlišné od dimenzování popsaného v předchozí kapitole. Závěrem je zde obsaženo srovnání kabelů s hliníkovým a měděným jádrem a výsledný výběr nejvhodnějšího řešení. Veškeré materiály, ze kterých se pro dimenzování vychází, poskytla společnost Union Grid s.r.o. a ENSLO CZ, s.r.o.

4.1 Bližší seznámení s projektem Brno – Sever (Klusáčkova)

Již v úvodu této práce bylo zmíněno, že dimenzovaný kabel 110 kV povede z místní teplárny Červený mlýn (dále jen „ČML“) do nově vybudované transformovny 110/22 kV na ulici Klusáčkova, která nahradí aktuálně se nacházející spínací stanici 22 kV. Přenášený výkon a rostoucí zatížení jsou pro toto řešení předurčující. Z teplárny ČML vede aktuálně jiný 110 kV kabel směrem na Medlánky, který bude až k prvnímu spojkovišti v trase zrušen a bude zde napojen právě dimenzovaný kabel, který povede z rozvodny na ulici Klusáčkova (dále jen „KLS“) ke zmíněnému spojkovišti, které se nachází na ulici Sportovní (dále jen „SPR“). Tabulka 4.1 znázorňuje vzdálenosti popsaných tras 110 kV kabelů.

Kabel 110 kV	
Trasa	Délka [m]
ČML - KLS	3 · 1285
KLS - SPR	3 · 1440
Celkem	8750

Tab. 4.1 - Délka dimenzovaného vedení

Vynásobení jednotlivých délek číslem tři je z důvodu třífázového rozvodu. Celková délka je již finální, je zde tedy započteno i 5 % z celkové vzdálenosti kvůli prořezům a různé korekce prvotní trasy, která byla původně 2575 m. Korekcemi trasy jsou myšleny všechny potřebné mírné změny v trase přes různé pozemky. Tyto mírné změny neboli odklony jsou běžné a dále budou zmíněny v kapitole 5. Souběžně vede s kabely optický kabel o celkové délce 2750 m.

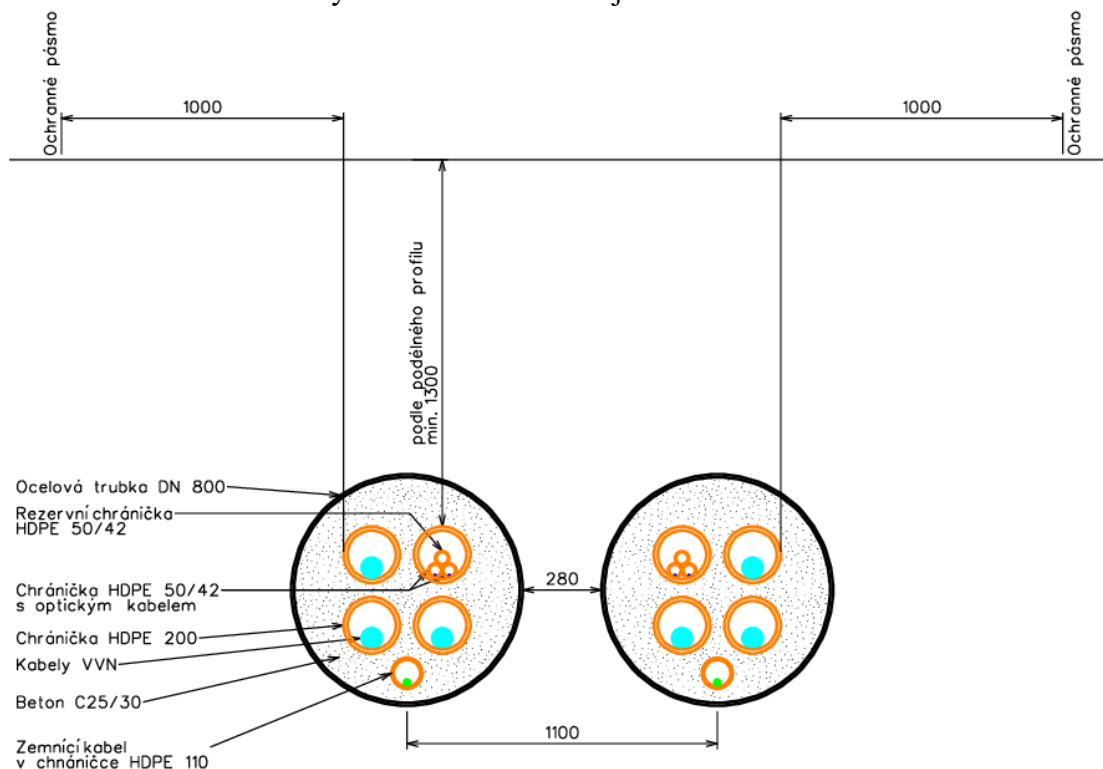
Z popisu trasy je patrné, že kabely jsou část trasy v souběhu a to 375 m, což bude hrát při výpočtech důležitou roli. Dále budou mít také vliv následující faktory:

- způsob uložení,
- hloubka uložení,
- konfigurace kabelů,
- způsob uzemnění kovového stínění,
- tepelný odpor půdy,
- teplota půdy pro danou hloubku uložení.

V průběhu celé trasy se všechny tyto podmínky mění. Důvodem jsou veškerá křížení s jinými inženýrskými sítěmi, kvůli kterým je nutné provést hlubší uložení. Dalším důležitým faktorem je, v jaké oblasti kabel vede. Jedná-li se například o oblast, kde je potřeba projíždět těžkou technikou, a tedy půdu nad kabelem zatěžovat více, než dovoluje energetický zákon, tak je nutné upravit uložení kabelu. Uložení se provede do chrániček s obetonovaným okolím. Výrazný vliv v zastavěné oblasti mají i protlaky pod komunikacemi, kterých je v trase celkem 16. Protlak je proveden ocelovou rourou o průměru 800 mm. Z pohledu uzemnění stínění se vzhledem k celkové vzdálenosti vedení pohybujeme na mezi, kdy je již vhodné použít CB. Ovšem i přes tento fakt je zde využito SPB, kde bude na jednom konci stínění přímo uzemněné a na druhé straně přes svodiče přepětí a mezi těmito místy jsou propojeny paralelním zemním vodičem. Svodiče přepětí jsou pro oba kabely umístěny v nové transformovně na ulici Klusáčkova. S uzemněním stínění souvisí i spojovací místa, která jsou v trase ČML – Klusáčkova dvě a v trase Klusáčkova – Sportovní tři. Celkově se bude jednat o šest jednotlivých kabelů, které budou v spojovací místech přímo propojeny. Stínění v jednotlivých spojovací místech jsou také přímo propojena a neuzemněna. Uzemnění je provedeno na začátku prvního kabelu, který vychází z teplárny ČML a u druhého na konci kabelu, tedy ve spojovací místě na ulici Sportovní. Přesné zakreslení je zobrazené v příloze A.

Z toho, co bylo popsáno, je nyní možné si vyvodit zásadní body pro dimenzování. Pro dimenzování nebereme v potaz každý úsek kabelu s jeho vlastnostmi (konfigurace, hloubka, tepelný odpor, ...), ale bereme v potaz tu část, kde jsou podmínky „nejhorší“. Nejhoršími podmínkami jsou myšleny ty, kde musí být zatížení sníženo (viz. výpočet dovolených proudů v předchozí kapitole) tak, aby nedocházelo k nežádoucím vlivům.

V popsané trase se jedná o místo, kde jsou kabely v souběhu v protlaku pod komunikací a v hloubce uložení necelých 8 m. Tato situace je zobrazena na Obr. 4.1.



Obr. 4.1 - Souběh vedení Brno - Sever (Klusáčkova)²⁶

Dále se k výše uvedenému musí brát v potaz i styl zmíněného uzemnění stínění. V Tab. 4.2 jsou zobrazeny další potřebné okolnosti pro dimenzování, které jsou pro tento případ známy.

Parametry potřebné k dimenzování	
Proudové zatížení kabelu [A]	680,0
Jmenovitý krátkodobý proud [kA]	31,5
Doba zkratu [s]	1,0
Jmenovitý dynamický výdržný proud [kA]	80,0
Jmenovité napětí [kV]	110,0

Tab. 4.2 - Známé parametry k dimenzování

Z tabulky je patrné, že zkratové hodnoty jsou známé, ovšem v jiných případech je nutné tyto hodnoty také vypočítat.

²⁶ Union Grid s.r.o., Vzorové příčné řezy protlaku. Zakázka č. 18-70-001. Praha. 2020.

Výpočet vychází ze vzorce pro výpočet rázového zkratového proudu I''_{k0} v závislosti na parametrech sítě:

$$I''_{k0} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} \quad [\text{A}; -, \text{V}, \Omega] \quad (4.1)$$

kde I''_{k0} je již zmíněný rázový zkratový proud, $(c \cdot U_n) / \sqrt{3}$ tvoří ekvivalentní napěťový zdroj v místě zkratu a Z_k je zkratová impedance daná jednotlivými prvky elektrizační soustavy před zkratem. Po vypočítání I''_{k0} je možné dopočítat dynamický zkratový výdržný proud I_P . Výpočet je stejný jako v rovnici 3.14.

$$I_P = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k0} \quad [\text{A}; -, \text{A}] \quad (4.2)$$

kde I_P je zmíněný dynamický zkratový výdržný proud, κ je činitel závislý na druhu sítě (pro VVN síť je roven 1,7). Přesný výpočet udává norma PNE 33 3042 – *Příklady výpočtů zkratových proudů ve střídavých sítích*. S vypočteným I_P jsme následně odkázáni na Tab. 4.3 zkratových odolností odkud vybereme nejbližší větší hodnotu. Dále pomocí této hodnoty odečteme i jmenovitý krátkodobý proud I_{ke} .

I_P [kA]	16	20	31,5	40	50	63	80	100	125	160
I_{ke} [kA]	6,3	8	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63

Tab. 4.3 - Normalizovaná řada zkratových odolností

4.2 Dimenzování kabelu 110 kV

V této kapitole bude dimenzováno kabelové vedení pro výše popsanou zakázku připojení transformační stanice k distribuční soustavě 110 kV kabelem. Výpočty zde provedené navazují na obecné požadavky pro dimenzování kabelů z předešlé kapitoly. Rozdíl oproti teoretickému popisu výpočtu v předešlé kapitole nastane u výpočtu dovolených proudů, který nebude proveden přímým dosazováním přepočítávacích koeficientů podle podmínek uložení kabelového vedením v zemi. Výsledný maximální dovolený proud je vypočten softwarem CYMCAP²⁷.

²⁷ CYME INTERNATIONAL. *CYME Power Engineering Software* [online]. [cit. 2021-08-09]. Dostupné z: <https://www.cyme.com/software/cymcap/>

4.2.1 Výchozí parametry

Z parametru, který je z počátku známý, což je zatěžovací proud, který je roven 680 A, je možné vypočítat hodnotu zdánlivého výkonu jako:

$$S = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot I_z \quad [\text{VA}; \text{V}, \text{A}] \quad (4.3)$$

kde S je zdánlivý výkon, U_s je jmenovitá hodnota napěťové hladiny a I_z je již zmíněný zatěžovací proud. Dosadíme-li známý zatěžovací proud a sdružené napětí, tak zdánlivý výkon je roven:

$$S = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot I_z = \sqrt{3} \cdot 110\,000 \cdot 680 = 129,56 \text{ MVA} \quad (4.4)$$

V praxi se běžně vychází ze známé přenosové schopnosti neboli přenosového výkonu, který lze získat, známe-li účinník $\cos \varphi$ ze vztahu:

$$P = S \cdot \cos \varphi \quad [\text{W}; \text{VA}, -] \quad (4.5)$$

kde P je přenášený výkon, S je vypočtený zdánlivý výkon a $\cos \varphi$ je zmíněný účinník. K dosažení hodnoty přenosové schopnosti je tedy potřebné určit účinník, který volím s hodnotou 0,95. Přenosová schopnost po dosazení do rovnice 4.3 a 4.4 je rovna:

$$P = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot I_z \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 110\,000 \cdot 680 \cdot 0,95 = 123,08 \text{ MW} \quad (4.6)$$

4.2.2 Výpočet minimálního průřezu vedení

Pro výpočet minimálního průřezu vyjdeme ze známých zkratových parametrů uvedených v Tab. 4.2, které dosadíme do rovnice 3.24. Je ovšem potřebné nejdříve dopočítat materiálový koeficient K . Výpočet provedeme pro Cu (rovnice 4.7) i pro Al (rovnice 4.8) s dosazením potřebných parametrů z Tab. 4.4 a Tab. 3.1.

Materiálové konstanty		
Materiál elektrovedné části	Cu	Al
Měrné objemové teplo c_0 [$\text{J} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$]	3,500	2,417
Teplotní součinitel odporu α [K^{-1}]	0,00393	0,00403
Měrná rezistivita materiálu ρ_{20} [$\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$]	0,01786	0,02941

Tab. 4.4 - Parametry pro výpočet materiálového koeficientu

Materiálová konstanta pro Cu, po dosazení vychází:

$$K_{Cu} = \sqrt{\frac{c_0}{\alpha \cdot \rho_{20}} \cdot \ln \frac{1-20 \cdot \alpha + \alpha \cdot \vartheta_k}{1-20 \cdot \alpha + \alpha \cdot \vartheta_1}} = \sqrt{\frac{3,5}{0,004 \cdot 0,01786} \cdot \ln \frac{1-20 \cdot 0,004 + 0,004 \cdot 250}{1-20 \cdot 0,004 + 0,004 \cdot 90}} =$$

$$= 141 [-] \quad (4.7)$$

Materiálová konstanta pro Al, po dosazení vychází:

$$K_{Al} = \sqrt{\frac{c_0}{\alpha \cdot \rho_{20}} \cdot \ln \frac{1-20 \cdot \alpha + \alpha \cdot \vartheta_k}{1-20 \cdot \alpha + \alpha \cdot \vartheta_1}} = \sqrt{\frac{2,417}{0,004 \cdot 0,02941} \cdot \ln \frac{1-20 \cdot 0,004 + 0,004 \cdot 250}{1-20 \cdot 0,004 + 0,004 \cdot 90}} =$$

$$= 91 [-] \quad (4.8)$$

Nyní je možné vypočítat minimální průřezy elektrovodných částí jako:

$$S_{min_{Cu}} = \frac{I_{ke} \cdot \sqrt{t_k}}{K_{Cu}} = \frac{31\,500 \cdot \sqrt{1}}{141} = 223 \text{ mm}^2 \quad (4.9)$$

$$S_{min_{Al}} = \frac{I_{ke} \cdot \sqrt{t_k}}{K_{Al}} = \frac{31\,500 \cdot \sqrt{1}}{91} = 346 \text{ mm}^2 \quad (4.10)$$

Po nahlédnutí do katalogu přiloženého v příloze B (pro Cu) a v příloze C (pro Al) vybereme nejbližší vyšší vyráběný průřez, což by pro Cu bylo 240 mm² a pro Al 400 mm². Dále na další stránce v příloze B a C jsou vidět možná proudová zatížení pro dané průřezy, jež jsou zobrazeny také v Tab. 4.5 níže.

Jmenovitá proudová zatížení		
Materiál	Cu	Al
Průřez [mm ²]	240	400
I _N [A]	565	580

Tab. 4.5 - Jmenovitá proudová zatížení

Proudová zatížení pro dané průřezy s uzemněním stínění na obou koncích jsou ovšem v obou případech menší, než je pro případ Brno – Sever, tedy 680 A. Je tedy zřejmé, že výpočet minimálního průřezu pomocí zkratových parametrů nebude určovat konečný bráný průřez, ale jedná se jen o kontrolu, zda je tato podmínka splněna. Nyní je podle známého zatížení potřebné vybrat z katalogu vhodný průřez elektrovodné části, který bude splňovat potřebné proudové zatížení. Toto je provedeno v Tab. 4.6 na začátku další stránky.

Jmenovitá proudová zatížení				
Materiál	Cu		Al	
Průřez [mm ²]	630	800	1000	1200
I _N [A]	970	1100	995	1085

Tab. 4.6 - Průřezy elektrovedné části splňující proudové zatížení

Tab. 4.6 obsahuje dva různé průřezy pro oba možné materiály. Dovolené proudy, které katalog udává, odpovídají největšímu možnému zatížení kabelu uloženého na vzduchu. Je nutné přepočítat tuto jmenovitou hodnotu pro kritické místo uložení v trase kabelu. Nejvíce kritickým místem je ta část trasy, kde jsou kabely v souběhu v protlaku. Tato situace je nasimulovaná pro kabel s jádrem z Cu o průřezu 800 mm² ve zmíněném programu CYMCAP, což je zobrazeno v příloze C. Software přepočítal výchozí dovolené proudové zatížení 1100 A na maximální proudové zatížení 673,9 A pro dané kritické uložení. Tato hodnota je v toleranci zadaného proudového zatížení pro daný kabel, tedy 680 A. Z toho plyne, že použití kabelu o průřezu 630 mm² s jádrem z Cu není vzhledem k výchozí hodnotě proudového zatížení možné. Touto logickou návazností je možné navázat i na kabel s jádrem z Al, který může mít plochu průřezu nejméně 1200 mm² vzhledem k jmenovitému proudovému zatížení. Přesné výpočty dovolených proudů, jak již bylo zmíněno, neprobíhají „ručním“ výpočtem nebo přepočtem pomocí přepočítávacích koeficientů. Tyto výpočty je možné provést ve výpočetním programu CYMCAP, kde je možné si přesněji nastavit způsoby uložení, hloubky, souběhy a zbylé ovlivňující faktory. Přepočty, se kterými pracují výpočetní programy, je možné nalézt v normě ČSN IEC 60287 – *Elektrické kabely – Výpočet dovolených proudů*.

4.3 Výpočty vhodné pro porovnání kabelů

Z katalogu společnosti NKT s.r.o., byly vybrány dva možné kabely, které jsou použitelné pro projekt Brno – Sever (Klusáčkova). Kabel s jádrem z Cu má označení 2XS(FL)2Y 1×800 RM/225 a z Al A2XS(FL)H 1×1200RMS/235. Technické parametry potřebné k dalším výpočtům od každého z druhů kabelů jsou uvedeny v Tab. 4.7 na další straně, která čerpá z příloh B a C.

Typ kabelu	Cu jádro 800 mm ² s XLPE izolací	Al jádro 1200 mm ² s XLPE izolací
R _{DC-20} [Ω/km] – DC odpor vodiče při 20 °C	0,0221	0,0247
R _{AC-90} [Ω/km] – AC odpor vodiče při 90 °C	0,0322	0,0323
X _L [Ω/km] – Induktivní reaktance při 90 °C	0,1260	0,1220
C _l [μF/km] – Provozní kapacita	0,1930	0,2150
Hmotnost kabelu [kg/km]	13640	10467

Tab. 4.7 - Parametry vybraných kabelů z katalogu od společnosti NKT s.r.o.

4.3.1 Poměrné ztráty výkonu

Při přenosu energie, tedy při průchodu proudem vodičem, dochází vlivem materiálových vlastností ke ztrátám výkonu. Tyto ztráty se nazývají Jouleovy ztráty a jsou úměrné druhé mocnině procházejícího proudu. Nacházíme-li se v třífázové soustavě, je možné tyto ztráty vypočítat jako:

$$\Delta P = 3 \cdot R \cdot I^2 \quad [\text{W}; \Omega, \text{A}] \quad (4.11)$$

kde ΔP jsou zmíněné ztráty, R je odpor vodiče a I je proud, který protéká vodičem. Jedná se o celkové ztráty, které na vedení o určité vzdálenosti vzniknou. Neznáme-li celkovou vzdálenost vedení, je možné vypočítat poměrné ztráty vztažené na jeden kilometr délky vedení jako:

$$\Delta p = 3 \cdot R_{AC-90} \cdot I^2 \quad [\text{W} \cdot \text{km}^{-1}; \Omega \cdot \text{km}^{-1}, \text{A}] \quad (4.12)$$

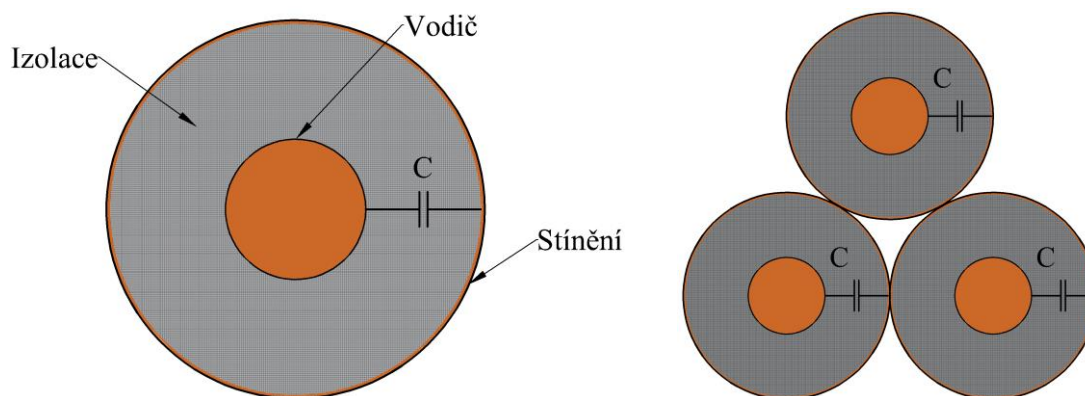
kde Δp jsou poměrné ztráty vedení vztažené na kilometr délky, R_{DC-20} je odpor vodiče vztažený na kilometr délky a I je již zmíněný proud, který vedením protéká. Po dosazení odporů vodičů z Tab. 4.7 a známého proudového zatížení $I = 680 \text{ A}$ je nyní možné získat poměrné ztráty pro jednotlivé kabely:

$$\Delta p_{Cu} = 3 \cdot R_{AC-90_{Cu}} \cdot I^2 = 3 \cdot 0,0322 \cdot 680^2 = 44\,668 \text{ W} \cdot \text{km}^{-1} \quad (4.13)$$

$$\Delta p_{Al} = 3 \cdot R_{AC-90_{Al}} \cdot I^2 = 3 \cdot 0,0323 \cdot 680^2 = 44\,807 \text{ W} \cdot \text{km}^{-1} \quad (4.14)$$

4.3.2 Kapacitní proudy

Téma kapacitních neboli nabíjecích proudů je potřebné u kabelových vedení zmínit. Nabíjecí proudy vycházejí z provozních kapacit kabelů, které jsou v porovnání s venkovním nadzemním vedením řádově větší vlivem kratších vzdáleností mezi elektrovednou částí a zemněným prvkem (stínění). Vzhledem k velikosti provozních kapacit je často nutné provádět u kabelových vedení kompenzaci. U jednožilových kabelů je provozní kapacitou myšlena kapacita mezi elektrovednou částí a vlastním stíněním kabelu, jak je zobrazeno na Obr. 4.2. Vzájemné vazby mezi jednotlivými jednožilovými kabely se neberou v potaz.



Obr. 4.2 - Provozní kapacity jednožilových kabelů samostatně a v trojúhelníkové formaci

Pro odvození provozní kapacity je nejdříve potřebné odvodit si intenzitu elektrického pole, což je možné pomocí Gaussovy věty, která je uvedena v rovnici 4.15:

$$\oiint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{Q}{\varepsilon_0} \quad [\text{V} \cdot \text{m}^{-1}, \text{m}^2; \text{C}, \text{F} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (4.15)$$

kde \mathbf{E} je vektor intenzity elektrického pole, $d\mathbf{S}$ je vektor elementu plochy, Q je náboj a ε_0 je permitivita vakua. Bereme případ, kdy je kolem vodiče, tedy středu kabelu, zvolena uzavřená válcová plocha s poloměrem r a délkou l . Na hranici této plochy lze provést skalární součin vektoru intenzity \mathbf{E} s elementem plochy $d\mathbf{S}$:

$$\mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = |\mathbf{E}| \cdot |d\mathbf{S}| \cdot \cos\sigma \quad (4.16)$$

kde \mathbf{E} je vektor intenzity elektrického pole, $d\mathbf{S}$ je vektor elementu plochy (tyto vektory v rovných závorkách představují jejich velikosti) a σ je úhel mezi těmito vektory. Ovšem intenzita je na zvolenou plochu kolmá a má i stejnou velikost. Je tedy možné vektor intenzity \mathbf{E} nahradit v rovnici 4.15 pouze velikostí intenzity elektrického pole E a stejně to provést i s vektorem $d\mathbf{S}$.

Po provedení integrace po celé ploše válce o poloměru r a délce l dostaneme následně výraz:

$$E \cdot 2\pi \cdot r \cdot l = \frac{Q}{\varepsilon_0} \quad [\text{V}\cdot\text{m}^{-1}; \text{m}, \text{m}; \text{C}, \text{F}\cdot\text{m}^{-1}] \quad (4.17)$$

kde jednotlivé veličiny byly popsány výše. Pro další úpravu si vyjádříme náboj Q jako součin liniového náboje τ vynásobeného délkou l . Délky se na obou stranách rovnice pokrátí. Dále je potřebné nahradit permitivitu vakua celkovou permitivitou prostředí ε , jelikož se nepohybujeme ve vakuu. Výsledný vztah pro intenzitu elektrického pole ve vzdálenosti r od vodivého jádra je uveden v rovnici 4.18:

$$E = \frac{\tau}{2\pi \cdot \varepsilon \cdot r} \quad [\text{V}\cdot\text{m}^{-1}; \text{C}\cdot\text{m}^{-1}, \text{F}\cdot\text{m}^{-1}, \text{m}] \quad (4.18)$$

kde E je zmíněné intenzita elektrického pole, τ je liniová hustota náboje, ε je permitivita prostředí a r vzdálenost mezi elektrodami. Pomocí intenzity elektrického pole E je možné získat napětí mezi dvěma body A a B na elektrodách neboli práci, kterou vyková elektrické pole pro přesunutí bodového náboje mezi těmito body. Zmíněnou práci lze vyjádřit jako:

$$A = \int_l \mathbf{F} d\mathbf{l} \quad [\text{J}; \text{N}, \text{m}] \quad (4.19)$$

kde A je zmíněná práce pro přesunutí bodového náboje po určité dráze l , \mathbf{F} je vektor síly působící na bodový náboj a $d\mathbf{l}$ element dráhy l . Sílu F , jež působí na náboj v elektrickém poli o určité intenzitě E , je možné vyjádřit jako:

$$\mathbf{F} = Q \cdot \mathbf{E} \quad [\text{N}; \text{C}, \text{V}\cdot\text{m}^{-1}] \quad (4.20)$$

kde \mathbf{F} je vektor působící síly, \mathbf{E} je vektor intenzity elektrického pole a Q je náboj ve zmíněném poli. V našem popsaném případě se jedná o jednotkový kladný náboj, a je tedy možné rovnici 4.20 upravit do tvaru:

$$\mathbf{F} = \mathbf{E} \quad [\text{N}; \text{V}\cdot\text{m}^{-1}] \quad (4.21)$$

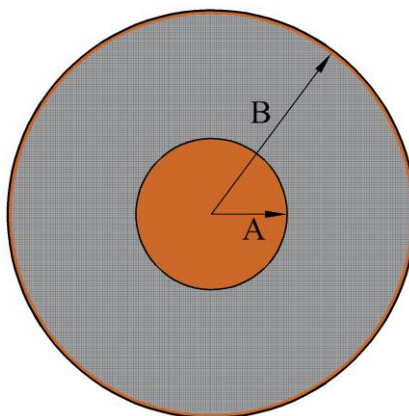
Těmito úpravami se dostáváme k prvotně zmíněnému napětí, které lze vyjádřit spojením rovnic 4.19 až 4.21:

$$U = \int_A^B \mathbf{E} d\mathbf{l} \quad [\text{V}; \text{V}\cdot\text{m}^{-1}, \text{m}] \quad (4.22)$$

kde U je napětí mezi body A a B a \mathbf{E} je již zmíněný vektor intenzity elektrického pole. Dosadíme-li prvotně odvozenou intenzitu v rovnici 4.18 s následným provedením integrace, dostaneme vztah pro napětí mezi dvěma válcovými elektrodami:

$$U = \frac{\tau}{2\pi \cdot \varepsilon} \ln \frac{B}{A} \quad [\text{V}; \text{C}\cdot\text{m}^{-1}, \text{F}\cdot\text{m}^{-1}, \text{m}, \text{m}] \quad (4.23)$$

kam již od posledně popsané rovnice přibyly body A a B , jež se nacházejí na jednotlivých hranách elektrod, tedy na hraně vodiče a stínění. Pro výpočet tedy představují jednotlivé poloměry od středu elektrovedné části, jak je zobrazeno na Obr. 4.3.



Obr. 4.3 - Zobrazení poloměrů pro výpočet napětí

Po odvození napětí je možné získat hledanou hodnotu kapacity, z jejíž definice vychází výraz:

$$C = \frac{Q}{U} \quad [\text{F}; \text{C}, \text{V}] \quad (4.24)$$

kde C je kapacita, Q je náboj a U je zmíněné napětí. Tuto rovnici lze přepsat pro kapacitu vztahenou na jednotku délky pomocí liniové hustoty náboje jako:

$$C_{/l} = \frac{\tau}{U} \quad [\text{F}\cdot\text{m}^{-1}; \text{C}\cdot\text{m}^{-1}, \text{V}] \quad (4.25)$$

kde $C_{/l}$ je již zmíněná kapacita vztahená na jednotku délky a τ je liniová hustota náboje. Dosadíme-li do rovnice 4.25 odvozený vztah pro napětí (rovnice 4.23) s provedením potřebných úprav a vztahením kapacity na kilometr délky vzhledem k délkám vedení, dostaneme hledaný výraz pro výpočet provozní kapacity kabelového vedení:

$$C_{/l} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon}{\ln \frac{B}{A}} \quad [\text{F}\cdot\text{km}^{-1}; \text{F}\cdot\text{m}^{-1}, \text{m}, \text{m}] \quad (4.26)$$

kde jednotlivé prvky rovnice již byly popsány výše. Provozní kapacity pro oba kabely jsou již vypočtené výrobcem a jsou zobrazeny v Tab. 4.7, která vychází z katalogů v příloze. Z provozní kapacity je možné vypočítat poměrné kapacitní proudy (nabíjecí) jako:

$$i_c = \omega \cdot C_{/l} \cdot \frac{U_s}{\sqrt{3}} \quad [\text{A}\cdot\text{km}^{-1}; \text{s}^{-1}, \text{F}\cdot\text{km}^{-1}, \text{V}] \quad (4.27)$$

kde i_c je poměrný kapacitní proud vztahený na kilometr délky, ω je úhlová frekvence, $C_{/l}$ je provozní kapacita vedení vztahená na kilometr délky a U_f je fázové napětí neboli

napětí mezi fází a uzemněným bodem (stíněním). Dosadíme-li provozní kapacity z Tab. 4.7, dostaneme poměrné hodnoty kapacitních proudů pro oba kabely jako:

$$i_{C_{Cu}} = \omega \cdot C_{/l_{Cu}} \cdot \frac{U_S}{\sqrt{3}} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,193 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{110\,000}{\sqrt{3}} = 3,85 \text{ A} \cdot \text{km}^{-1} \quad (4.28)$$

$$i_{C_{Al}} = \omega \cdot C_{/l_{Al}} \cdot \frac{U_S}{\sqrt{3}} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,215 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{110\,000}{\sqrt{3}} = 4,29 \text{ A} \cdot \text{km}^{-1} \quad (4.29)$$

Dále je také možné vypočítat poměrné dielektrické ztráty spojené s provozní kapacitou podle rovnice 4.30. Zde se nachází člen $\tan \delta$, který doposud nebyl nikde zmíněn. Jedná se o ztrátový činitel, který je určen podle druhu izolace. Pro počítané kabely se v obou případech jedná o izolaci XLPE, jejíž hodnota ztrátového činitele je dána normou ČSN IEC 60287 – *Elektrické kabely – Výpočet dovolených proudů* na hodnotu $\tan \delta = 0,001$.

$$\Delta w_d = \omega \cdot C_{/l_{Cu}} \cdot \frac{U_S}{\sqrt{3}} \cdot \tan \delta \quad [\text{W} \cdot \text{km}^{-1}; \text{s}^{-1}, \text{F} \cdot \text{km}^{-1}, \text{V}, -] \quad (4.30)$$

kde Δw_d jsou poměrné dielektrické ztráty vztažené na kilometr délky. Zbylé prvky rovnice byly již popsány výše. Dosadíme-li do rovnice 4.30 parametry z Tab. 4.7, vychází poměrné dielektrické ztráty pro oba druhy kabelů následovně:

$$\begin{aligned} \Delta w_{d_{Cu}} &= \omega \cdot C_{/l_{Cu}} \cdot \left(\frac{U_S}{\sqrt{3}}\right)^2 \cdot \tan \delta = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,193 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{110\,000^2}{\sqrt{3}^2} \cdot 0,001 \\ &= 244,55 \text{ W} \cdot \text{km}^{-1} \end{aligned} \quad (4.31)$$

$$\begin{aligned} \Delta w_{d_{Al}} &= \omega \cdot C_{/l_{Cu}} \cdot \left(\frac{U_S}{\sqrt{3}}\right)^2 \cdot \tan \delta = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,215 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{110\,000^2}{\sqrt{3}^2} \cdot 0,001 \\ &= 272,43 \text{ W} \cdot \text{km}^{-1} \end{aligned} \quad (4.32)$$

4.3.3 Přirozený výkon vedení

Přirozený výkon je ideální výkon, který je vedení schopno přenášet. Idealitou je zde myšleno vykompenzování kapacitní a induktivní složky vedení, což znamená, že proud, který prochází vedením, má pouze činnou složku. Chceme-li získat hodnotu přirozeného výkonu, je nejdříve nutné znát hodnotu vlnové impedance vedení, což je impedance, při které dojde ke zmíněnému vykompenzování kapacitní a induktivní složky a je možné ji určit ze vzorce 4.33 na další straně.

$$Z_V = \frac{\sqrt{L}}{\sqrt{C}} \quad [\Omega; \text{H}, \text{F}] \quad (4.33)$$

kde Z_V je zmíněná vlnová impedance, L je indukčnost vedení a C je kapacita vedení. Pro zjištění vlnové impedance je nutné zjistit hodnotu indukčnosti vedení. Tuto hodnotu lze vypočítat ze známé hodnoty induktivní reaktance jako:

$$X_k = \omega \cdot L \Rightarrow L = \frac{X_k}{\omega} \quad [\Omega; \text{s}^{-1}, \text{H}] ; [\text{H}; \text{s}^{-1}, \Omega] \quad (4.34)$$

kde L je zmíněná indukčnost vedení, ω je úhlová frekvence a X_k je induktivní reaktance.

Do tohoto výrazu můžeme dosadit za induktivní reaktanci na kilometr délky pro oba kabely a výsledkem budou provozní indukčnosti na kilometr délky:

$$L/l_{Cu} = \frac{X/l_{Cu}}{\omega} = \frac{0,126}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,401 \text{ mH} \cdot \text{km}^{-1} \quad (4.35)$$

$$L/l_{Al} = \frac{X/l_{Al}}{\omega} = \frac{0,122}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,388 \text{ mH} \cdot \text{km}^{-1} \quad (4.36)$$

Nyní je možné vypočítat z parametrů uvedených v Tab. 4.7 a dopočtených provozních indukčností vlnové impedance pro obě kabelová vedení jako:

$$Z_{V_{Cu}} = \frac{\sqrt{L/l_{Cu}}}{\sqrt{C/l_{Cu}}} = \frac{\sqrt{4,01 \cdot 10^{-4}}}{\sqrt{1,93 \cdot 10^{-7}}} = 45,6 \Omega \quad (4.37)$$

$$Z_{V_{Al}} = \frac{\sqrt{L/l_{Al}}}{\sqrt{C/l_{Al}}} = \frac{\sqrt{3,88 \cdot 10^{-4}}}{\sqrt{2,15 \cdot 10^{-7}}} = 42,5 \Omega \quad (4.38)$$

Pokud bychom porovnávali velikosti vlnové impedance kabelového zemního vedení a venkovního nadzemního vedení, jsou hodnoty vlnové impedance venkovního nadzemního vedení až 10 krát větší. Známe-li hodnotu vlnové impedance, je možné vypočítat přirozený výkon vedení jako:

$$P_P = \frac{U_S^2}{Z_V} \quad [\text{W}; \text{V}, \Omega] \quad (4.39)$$

kde P_P je přirozený výkon vedení, U_S je sdružené napětí neboli napětí mezi fázemi a Z_V je již zmíněná vlnová impedance. Bez dosazení do rovnice 4.39 je již možné konstatovat, že přirozený výkon je nepřímo úměrný vlnové impedanci. Z tohoto faktu a vzhledem až k desetinásobně menší vlnové impedanci kabelových zemních vedení, je možné konstatovat, že přirozené výkony u kabelových zemních vedení dosahují 10 krát větších hodnot.

Výpočet pro porovnávaná kabelová vedení je proveden v rovnicích 4.40 a 4.41:

$$P_{P_{Cu}} = \frac{U_S^2}{Z_{V_{Cu}}} = \frac{110\,000^2}{45,6} = 265,4 \text{ MW} \quad (4.40)$$

$$P_{P_{Al}} = \frac{U_S^2}{Z_{V_{Al}}} = \frac{110\,000^2}{42,5} = 284,7 \text{ MW} \quad (4.41)$$

4.3.4 Úbytek napětí na vedení

Již bylo zmíněno, že vedení má své materiálové vlastnosti, a tím pádem svou impedanci. Přesněji se tato impedance nazývá podélná a její komplexní zápis lze vyjádřit jako:

$$\hat{Z}_l = R_k + jX_k \quad [\Omega; \Omega, \Omega] \quad (4.42)$$

kde \hat{Z}_l je podélná impedance v komplexním tvaru, R_k je rezistence vedení při provozní teplotě při průchodu střídavého proudu a X_k je induktivní reaktance při provozní teplotě při průchodu střídavého proudu. Pro oba druhy porovnávaných kabelů známe jak rezistenci, tak reaktanci (Tab. 4.7), takže je možné zapsat jejich podélné reaktance jako:

$$\hat{Z}_{l_{Cu}} = R_{AC-90_{Cu}} + jX_{l_{Cu}} = (0,0322 + j0,126) \Omega \quad (4.43)$$

$$\hat{Z}_{l_{Al}} = R_{AC-90_{Al}} + jX_{l_{Al}} = (0,0323 + j0,122) \Omega \quad (4.44)$$

Známe-li podélnou impedanci a proud, který vedením prochází, je možné získat úbytek napětí jako:

$$\Delta\hat{U} = \hat{Z}_l \cdot \hat{I} \quad [V; \Omega, A] \quad (4.45)$$

kde $\Delta\hat{U}$ je komplexní tvar úbytku napětí na daném vedení, \hat{Z}_l je již zmíněná podélná impedance a \hat{I} je komplexní tvar proudu, který vedením prochází. Doposud jsme počítali pouze s celkovou velikostí zátěžného proudu, který je roven 680 A. Výše byl ovšem zaveden účinník, se kterým je výkon přenašen. Pomocí tohoto účinníku a již známých parametrů je možné vyjádřit proud v komplexním tvaru jako (za předpokladu že zátěž je induktivního charakteru):

$$\hat{I} = \left(\frac{P + jQ}{U_S} \right)^* \quad [A; W, \text{VAr}, V] \quad (4.46)$$

kde \hat{I} je již zmíněný komplexní tvar proudu, P je činný výkon, Q je jalový výkon a U_S je sdružené napětí. Pro výpočet proudu postrádáme hodnotu jalového výkonu, kterou lze dostat z výrazu zobrazeného v rovnici 4.47:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad [\text{VAr}; \text{VA}, W] \quad (4.47)$$

kde Q je již zmíněný jalový výkon, S je zdánlivý výkon, a P je činný výkon. Hodnoty zdánlivého a činného výkonu byly již vypočteny v rovnicích 4.4 a 4.6. Dosadíme-li je do rovnice 4.47, dostaneme hodnotu jalového výkonu:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{129,56^2 - 123,08^2} = 40,46 \text{ MVar} \quad (4.48)$$

Nyní lze dosadit vše potřebné do rovnice 4.46 a získat zátěžný proud v komplexním tvaru jako:

$$\hat{I} = \left(\frac{P+jQ}{U_S}\right)^* = \left(\frac{123,08+j40,46}{110\,000}\right)^* = (645,583 - j212,193) \text{ A} \quad (4.49)$$

Vypočtený proud je nyní společně s podélnou impedancí obou kabelů možné dosadit do rovnice 4.45 a získat tak úbytky napětí pro jednotlivé kabely jako:

$$\begin{aligned} \Delta\hat{U}_{Cu} &= \hat{Z}_{l_{Cu}} \cdot \hat{I} = (0,0322 + j0,126) \cdot (645,583 - j212,193) = \\ &= (47,524 + j74,511) \text{ V} \end{aligned} \quad (4.50)$$

$$\begin{aligned} \Delta\hat{U}_{Al} &= \hat{Z}_{l_{Al}} \cdot \hat{I} = (0,0323 + j0,122) \cdot (645,583 - j212,193) = \\ &= (46,74 + j71,91) \text{ V} \end{aligned} \quad (4.51)$$

Pro lepší přehlednost bude vyjádřena velikost komplexního zápisu úbytku napětí:

$$\Delta U = |\Delta\hat{U}| = \sqrt{\text{Re}\{\Delta\hat{U}\}^2 + \text{Im}\{\Delta\hat{U}\}^2} \quad [\text{V}; \text{V}, \text{V}] \quad (4.52)$$

kde $|\Delta\hat{U}|$ je označení velikosti komplexně vyjádřeného úbytku napětí, $\text{Re}\{\Delta\hat{U}\}$ vyznačuje reálnou složku komplexně vyjádřeného úbytku napětí a $\text{Im}\{\Delta\hat{U}\}$ vyjadřuje složku imaginární. Dosadíme-li jednotlivé složky úbytků pro oba kabely, dostaneme velikosti úbytků jako:

$$\Delta U_{Cu} = \sqrt{\text{Re}\{\Delta\hat{U}_{Cu}\}^2 + \text{Im}\{\Delta\hat{U}_{Cu}\}^2} = \sqrt{47,54^2 + 74,511^2} = 88,39 \text{ V} \quad (4.53)$$

$$\Delta U_{Al} = \sqrt{\text{Re}\{\Delta\hat{U}_{Al}\}^2 + \text{Im}\{\Delta\hat{U}_{Al}\}^2} = \sqrt{46,74^2 + 71,91^2} = 85,77 \text{ V} \quad (4.54)$$

4.4 Zhodnocení výpočtů a výběr vhodného kabelu

První porovnání obou zvolených kabelů je možné provést již po nahlédnutí do Tab. 4.7, ze které můžeme vidět, že elektrické parametry jsou velice podobné a předem je možné očekávat i podobné výsledky v porovnávacích výpočtech. Toto potvrzuje i první výpočet poměrných ztrát výkonu, který vychází z hodnoty odporu vedení při provozní teplotě, a rozdíl tohoto parametru byl mezi dvěma druhy pouze jedna desetitisícina.

Výsledné poměrné ztráty se liší pouze o 139 W na kilometr délky, což je zanedbatelný rozdíl. Pro zjištění celkové hodnoty z hodnoty poměrné je níže uvedený obecný vzorec, pomocí kterého jsou v této práci přepočteny veškeré poměrné veličiny na celkové:

$$X = \Delta x \cdot l \quad [-; \text{km}^{-1}, \text{km}] \quad (4.55)$$

kde X představuje celkovou hodnotu, Δx je poměrná hodnota vztažená na kilometr délky a l je celková délka (pro náš případ se jedná o délku vedení 2725 m). Celkové hodnoty od veškerých poměrných veličin jsou zobrazeny níže v Tab. 4.8 a byly získány pomocí uvedené rovnice 4.55.

Dále vypočtené poměrné kapacitní proudy udávají, jak velký proud by byl odebírán při provozu naprázdno na kilometr délky, tedy jakým proudem by se nabíjela provozní kapacita kabelového vedení. Zde opět vyšel kabel s hliníkovým jádrem s větším poměrným kapacitním proudem, a to o 0,44 A na kilometr délky, což je o 11,4 % větší hodnota než u kabelu s jádrem z mědi. Stejně je tomu tak i u dielektrických ztrát, které jsou u hliníkového kabelu o 11,4 % větší. Toto by bylo možné říci i bez provedení výpočtu v rovnicích 4.31 a 4.32, jelikož se ve své podstatě jedná pouze o násobení jinými konstantami stejné provozní kapacity, jako tomu bylo u výpočtu poměrného kapacitního proudu v rovnicích 4.28 a 4.29. Hodnotově se jedná o rozdíl 27,88 W na kilometr délky.

U výpočtu přirozeného výkonu se ukázalo kabelové vedení s jádrem z hliníku jako lepší varianta, když pro ni vyšel přirozený výkon 284,7 MW což je o 19,3 MW větší přirozený výkon než u kabelového vedení s jádrem z mědi. Tvrzení, že přirozený výkon bude pro vedení s jádrem z hliníku větší, bylo možné vyhodnotit již po zjištění vlnové impedance, jelikož přirozený výkon je nepřímě úměrný vlnové impedanci, která byla pro hliníkové vedení menší.

Posledním porovnávacím výpočtem byl výpočet úbytku napětí na dané délce vedení. Z tohoto výpočtu vyšel lépe znovu kabel s hliníkovým jádrem, na kterém byl úbytek menší o 2,62 V, tato hodnota je společně s předešlými vynesena do již zmíněné Tab. 4.8 níže.

Parametr	ΔP [kW]	I_C [A]	ΔW_d [W]	Z_V [Ω]	P_P [W]	ΔU [V]
Cu jádro	121,7	10,5	666,4	45,6	265,4	88,4
Al jádro	122,1	11,7	742,4	42,5	284,7	85,8

Tab. 4.8 – Přehled vypočtených hodnot

Z přehledu vypočtených hodnot je patrný největší rozdíl u dielektrických ztrát, kde se lišíme o již zmíněných 11,4 %, a to díky větší provozní kapacitě kabelu s hliníkovým jádrem. Dále je z Tab. 4.8 patrné, že celkové výkonové ztráty jsou větší, což znamená, že výběrem kabelu s Al jádrem ztratíme za určitý čas větší množství energie. Se ztrátou energie, která je vyrobená zdrojem elektrické energie, je možné vyjádřit finanční rozdíl oproti ztrátám, které by vznikly s výběrem kabelu s jádrem z mědi. Známe celkový rozdíl na celé délce vedení, tedy 0,4 kW. Pokud bychom uvažovali průběh výkonových ztrát v čase konstantní po celý rok, tak je možné vypočítat celkovou ztracenou energii jako:

$$W_e = \int_t \Delta P(t) dt \quad [\text{J}; \text{W}, \text{s}] \quad (4.56)$$

kde W_e je celková ztracená energie za čas t , $\Delta P(t)$ jsou výkonové ztráty v čase, dt je element času. Po integraci výkonových ztrát upravíme rovnici 4.56 na rovnici 4.57.

$$W_e = \Delta P \cdot t \quad [\text{J}; \text{W}, \text{s}] \quad (4.57)$$

Do této rovnice nyní můžeme dosadit a celkové ztráty vyjádřené v kWh za rok získáme z rovnice 4.58:

$$W_e = \Delta P \cdot t = 0,4 \cdot 24 \cdot 365 = 3504 \text{ kWh} \quad (4.58)$$

Známe-li ztracenou energii, tak pro vyčíslení peněžních ztrát chybí jen cena za vyrobenou kWh. Tu si určíme na hodnotu 4,8 Kč²⁸ za kWh. Celkové finanční náklady vzniklé výběrem kabelu s jádrem z hliníku za rok zobrazuje rovnice 4.59 na další straně.

²⁸ Jedná se o přibližnou výkupní cenu energie v místě Brno – Ponava od dodavatele EG.D, a.s.

$$L_f = W_e \cdot m_{W_e} = 3504 \cdot 4,8 = 16\,819 \text{ Kč} \quad (4.59)$$

kde L_f představuje finanční ztrátu za rok, W_e je již zmíněná celková ztracená energie za rok a m_{W_e} představuje cenu za jednu kWh. Z doposud zmíněného vychází, že kabely mají velice podobné elektrické parametry s mírnou výhodou pro kabel s jádrem z mědi. Ovšem vyrovnanost těchto parametrů je dosažena jen díky většímu průřezu hliníkového jádra vzhledem k obecně horším elektrickým vlastnostem hliníku oproti mědi. Na druhou stranu je ale kabel s jádrem z mědi výrazně těžší, což bylo zobrazeno v Tab. 4.7. Po přepočtení udávané hmotnosti na kilometr délky na celkovou délku vedení (8750 m) vychází hmotnost kabelu s jádrem z mědi na 119,4 t a u kabelu s jádrem z hliníku 91,6 t. Tyto hmotnosti budou hrát roli při dopravě kabelového vedení na místo pokládky.

Posledním důležitým výběrovým faktorem je cena kabelu. Jedná se v tuto chvíli o směrodatnou položku, a to vzhledem k vyrovnanosti spočtených elektrických parametrů obou kabelů. Zjištěné orientační sumy na metr délky jsou zobrazeny v Tab. 4.9.

Kabel	2XS(FL)2Y 1×800 RM/225	A2XS(FL)H 1×1200RMS/235
Cena za m [Kč]	3 251	3 350

Tab. 4.9 – Cena kabelů na metr délky bez DPH²⁹

V počátku se rozdíl necelých 100,- Kč, nezdá být nijak směrodatný. Ovšem po přepočtení na celkovou délku vedení (viz Tab. 4.10) dostaneme o situaci větší přehled.

Kabel	2XS(FL)2Y 1×800 RM/225	A2XS(FL)H 1×1200RMS/235
Celková suma [Kč]	28 446 250	29 312 500

Tab. 4.10 – Celkové ceny kabelu na délku navrhované trasy bez DPH

Pro celkovou délku vedení se tedy jedná o rozdíl 866 250,- Kč ve prospěch kabelového vedení s jádrem z mědi. Na základě výše uvedených výpočtů a závěrů navrhuji provést připojení transformační stanice Brno – Sever (Klusáčkova) k DS prostřednictvím kabelu s jádrem z mědi s označením 2XS(FL)2Y 1×800 RM/225.

²⁹ Jedná se o přibližné ceny získané ze zakázek předešlého roku poskytnuté společností ENSLO CZ, s.r.o.

5 NÁVRH TRASY KABELU

Tato kapitola slouží pro seznámení s prací projektanta při návrhu trasy a bude zahrnovat i právní část spojenou s návrhem trasy. Jedná se o část, která je v praxi směrodatná. Právní aspekty řešené problematiky vychází ze stavebního zákona³⁰, zákona o vyvlastnění³¹, liniového zákona³² a zákona o posuzování vlivů na životní prostředí (EIA)³³.

5.1 Legislativní a normové požadavky návrhu

Navrhuje-li se trasa vedení elektrické energie, jedná se ve své podstatě o stavbu, která bude v trase prováděna. Pro možnost zhotovit stavbu je potřebné dodržet stavební zákon, který upravuje ve věcech územního plánování zejména cíle a úkoly územního plánování, dále také upravuje podmínky pro projektovou činnost a provádění staveb, obecné požadavky na výstavbu, účely vyvlastnění, vstupy na pozemky a do staveb a ochranu veřejných zájmů. Stavba musí odpovídat územnímu plánu a nijak nenarušovat pravidla, které územní plánování nastavuje. Problémem návrhu trasy není její reálné navržení, ale spíše vyhotovení potřebných dokumentací a následné reakce k dokumentacím od potřebných orgánů. Velkým problémem jsou vždy majetkoprávní záležitosti. Jedná se o přímé (kabel pozemkem přímo vede a má na pozemku i své ochranné pásmo), nebo také nepřímé (kabel přímo pozemkem nevede, ale zasahuje do něj jeho ochranné pásmo) zasahování vedením do jednotlivých pozemků, které jsou většinou ve vlastnictví veřejnosti. Od této veřejnosti (různých fyzických či právnických osob) je potřebné získat souhlas s realizací stavby na jejich pozemku. Tyto procesy zabírají velké množství času,

³⁰ ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 183/2006 Sb., o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon). In: *Sbírka zákonů*. Praha: Ministerstvo vnitra ČR, 2006, částka 63. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2006-183>

³¹ ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 184/2006 Sb., o odnětí nebo omezení vlastnického práva k pozemku nebo ke stavbě (zákon o vyvlastnění). In: *Sbírka zákonů*. Praha: Ministerstvo vnitra ČR, 2006, částka 63. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2006-184>

³² ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 416/2009 Sb., o urychlení výstavby dopravní, vodní a energetické infrastruktury a infrastruktury elektronických komunikací (liniový zákon). In: *Sbírka zákonů*. Praha: Ministerstvo vnitra ČR, 2009, částka 135. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2009-416>

³³ ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 100/2001 Sb., o posuzování vlivů na životní prostředí a o změně některých souvisejících zákonů (zákon o posuzování vlivů na životní prostředí). In: *Sbírka zákonů*. Praha: Ministerstvo vnitra ČR, 2001, částka 40. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-100>

prodlužují a často komplikují celkovou výstavbu vedení. Ovšem vedení elektrické energie je zákonem řazeno do energetické infrastruktury, a pro toto pojetí je možné se řídit dle liniového zákona. Liniový zákon upravuje postupy v případech urychlování získání práv k pozemkům a stavbám potřebných pro uskutečnění uvedených staveb a uvádění těchto staveb do užívání s cílem urychlit jejich majetkoprávní přípravu, umístování, povolování a povolování jejich užívání. Dále také upravuje výkon státní správy a postup při povolování projektů společného zájmu. V případech, kdy není možné se s dotčenou osobou za žádných podmínek dohodnout, nebo osobu zastihnout a dostat svolení a právní náležitosti k vykonání stavby vedení, je tak možné využít zákon o vyvlastnění. Zákon o vyvlastnění upravuje podmínky odnětí nebo omezení vlastnického práva nebo práva odpovídajícího věcnému břemeni, dále také upravuje podmínky poskytnutí náhrady za zmíněná odnětí.

5.2 Postup návrhu trasy kabelového vedení

Společnosti zajišťující přenos a distribuci elektrické energie mají pro komunikaci a zhotovování potřebných dokumentů interní postupy, kterými se řídí, a snaží se proces co nejvíce urychlit. Orientace ve všech bodech stavebního zákona nemusí být jednoduchá a na první pohled pochopitelná. Níže popsané postupy jsou čerpány z interních dokumentů společnosti E.ON Česká republika, s.r.o. Na konci této podkapitoly je zobrazen vývojový diagram návrhu trasy, který zjednodušuje níže nastíněnou problematiku.

5.2.1 Zadání stavby a práce projektanta

Každý projekt začíná zadáním, které vypracuje příslušný technik, a kde stanoví základní parametry stavby. Jedná se zejména o stanovení, jakým způsobem bude projekt potřeba projednávat. Zpracované zadání stavby se následně postoupí technikovi výstavby, který zajišťuje výběr zhotovitele projektové dokumentace (dále jen „PD“). Zhotovitelem bude projektant, který vypracuje PD pro územní řízení včetně majetkoprávního projednání s vlastníky dotčených nemovitých věcí. Projektant následně odpovídá za správnost, celistvost, úplnost, proveditelnost a bezpečnost stavby jím zpracované PD.

Dále je v případě staveb VVN vždy nutno zajistit:

- oznámení o realizaci záměru příslušnému úřadu životního prostředí (dále jen „ŽP“), který sdělí, zda bude stavba podléhat zjišťovacímu řízení (dále jen „ZŘ“).
- ZŘ dále stanoví, zda má být záměr posuzován podle zákona EIA, který upravuje posuzování vlivů na životní prostředí a veřejné zdraví. Účelem posuzování vlivů na životní prostředí je získat objektivní odborný podklad pro vydání rozhodnutí.

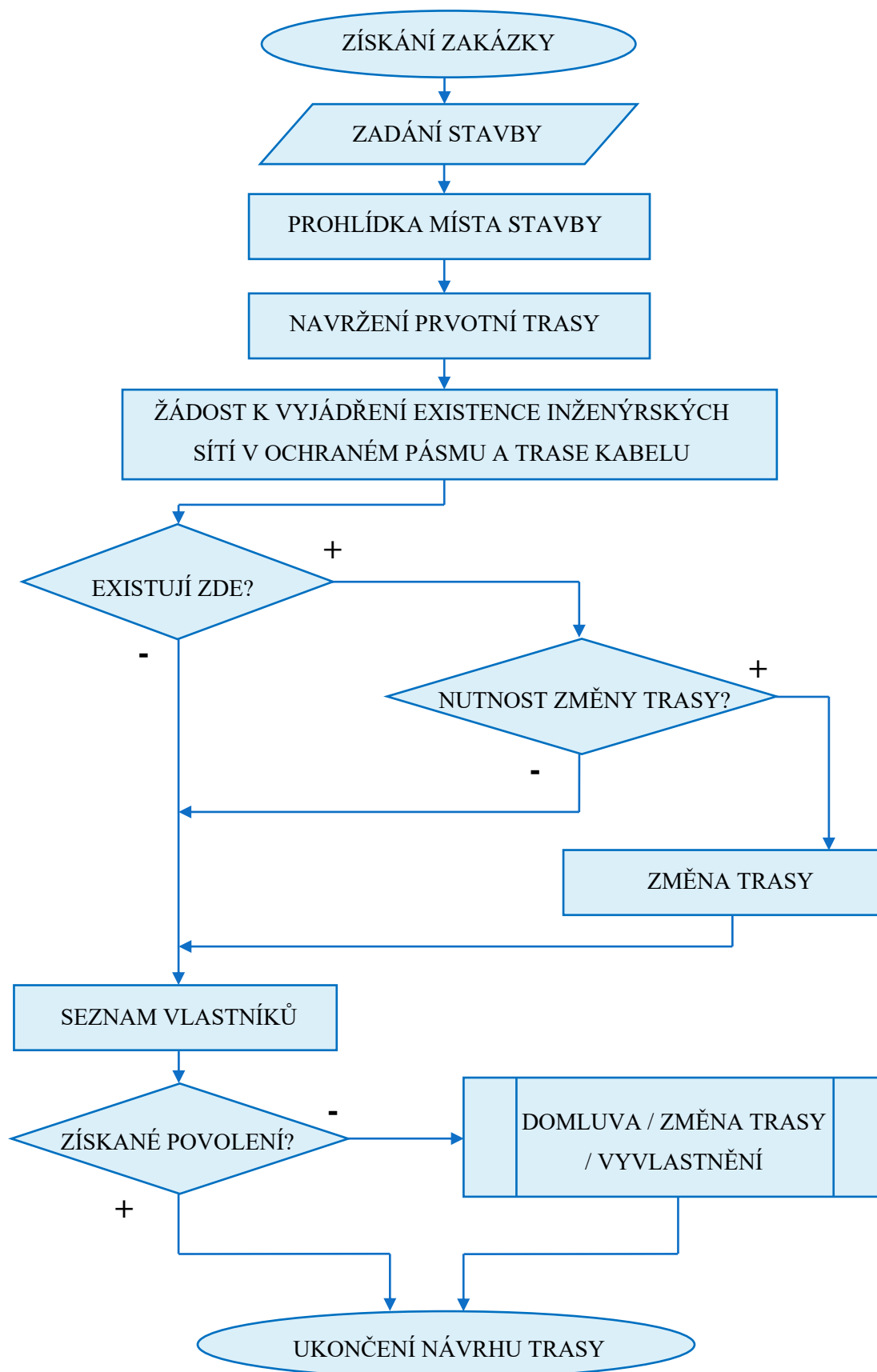
Následné postupy jsou dané podle majetkoprávních vypořádání. Jedná-li se o případ bez majetkoprávního vypořádání, je tomu uzpůsobena i PD, kterou zajistí projektant, a s tím i pravomocné územní rozhodnutí (dále jen „ÚR“). Pro stavby vyžadující majetkoprávní vypořádání je dle současné legislativy možné vydat ÚR bez prokázání věcně právního vztahu k dotčeným nemovitostem, přičemž pravomocné územní rozhodnutí je předpokladem pro následné vyvlastnění.

5.2.2 Věcná břemena a vyvlastnění

Jak již bylo poznamenáno, projektant zajišťuje majetkoprávní projednání stavby s vlastníky dotčených nemovitostí. Uzavírá smlouvy o smlouvách budoucích na věcná břemena (dále jen „SBVB“). Povinností projektanta je evidovat všechny dotčené vlastníky nemovitostí. Vlastníkem může být jakákoliv fyzická či právnická osoba nebo stát. Každý pozemek je definován parcelním číslem a katastrálním územím. Projektant je povinen s majiteli uvedenými v katastru nemovitostí jednotlivých území osobně projednat umístění vedení (zařízení DS). Majitel nemovitosti může vznést své požadavky, které je následně nutné projednat a nechat odsouhlasit společností, která chce stavbu realizovat. Po dohodě se podepisuje SBVB, která obsahuje i výši náhrady za zřízení věcného břemene. Výše náhrad za věcná břemena je určována podle interních kalkulací. Nesouhlasí-li majitel nemovitosti s cenou, lze o ceně jednat a určit cenu znaleckým posudkem. Není-li dohoda s vlastníkem nemovitosti možná, přistupuje se k vyvlastnění pozemku, eventuálně stavby, prochází-li kabel stavbou.

Pro vyvlastnění je potřebné vyhotovit další potřebné dokumentace. Následně je zahájeno vyvlastňovací řízení, jehož minimální doba je tři měsíce, pro neznámé vlastníky a pro vlastníky nemovitostí, kteří nesouhlasí se smlouvou na věcné břemeno, jde o lhůtu šesti měsíců.

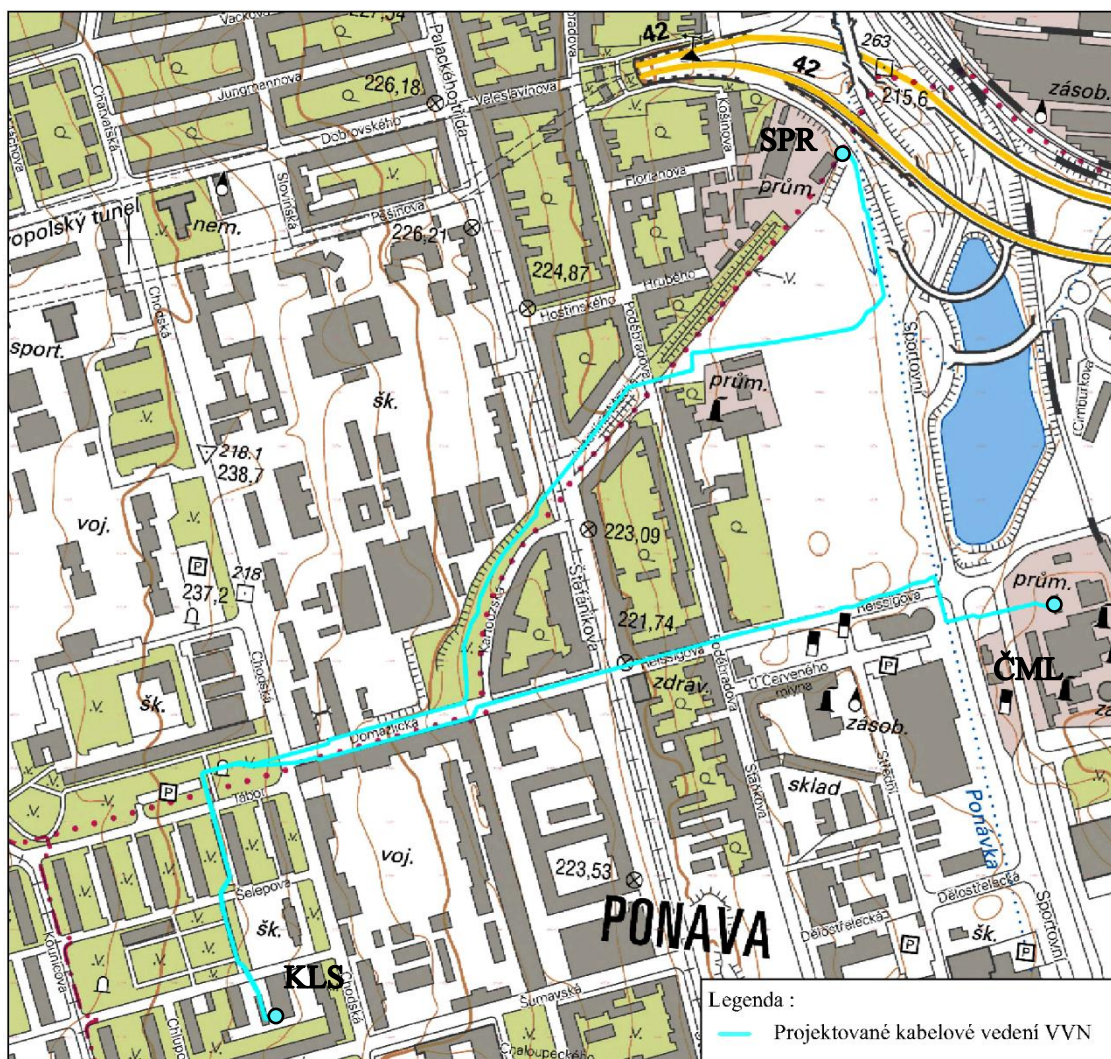
Proces návrhu trasy kabelového vedení zobrazený vývojovým diagramem:



Obr. 5.1 – Vývojový diagram návrhu trasy kabelového vedení

5.3 Navržená trasa kabelového zemního vedení pro zakázku Brno – Sever (Klusáčkova)

Jak již bylo uvedeno v kapitole 4.1, celkové projektované vedení se dělí na dvě trasy. První trasa má délku 1285 m a druhá trasa 1440 m. Jedná se tedy celkově o 2725 m kabelového vedení, které ve své trase prochází více než osmdesáti pozemky a do více než sto dvaceti pozemků zasahuje svým ochranným pásmem. Situace širších vztahů je zobrazena na Obr. 5.1, kde jsou označena místa začátků a konců vedení.



Obr. 5.2 - Situace širších vztahů³⁴

³⁴ Union Grid s.r.o., Situace širších vztahů projektovaný kabel 110 kV. Zakázka č. 18-70-001. 1:5000. Praha, 2019.

6 ROZPOČET

V této kapitole je vytvořen rámcový rozpočet výstavby kabelového vedení. Jedná se pouze o rámcový rozpočet vzhledem k obtížnosti zhotovení trasy v hustě zastavěné oblasti Brna. Jedná se o velmi náročnou trasu, která je potřeba z velké části řešit individuálně se zhotovitelem zemních prací, a to hlavně kvůli množství protlaků a hloubce jednotlivých šachet.

6.1 Podrobný popis trasy

V předešlých kapitolách již byla zobrazena trasa kabelu a problematické úseky, které se v trase nacházejí. Pro vytvoření rozpočtu je potřebné si trasu přiblížit více. Pro lepší představu způsobu uložení v celé trase kabelu bude níže v popisu trasy odkazováno na přílohu F, která obsahuje řezy jednotlivých způsobu uložení. Tyto řezy jsou zpracované společností Union Grid s.r.o.

Trasa ČML – KLS

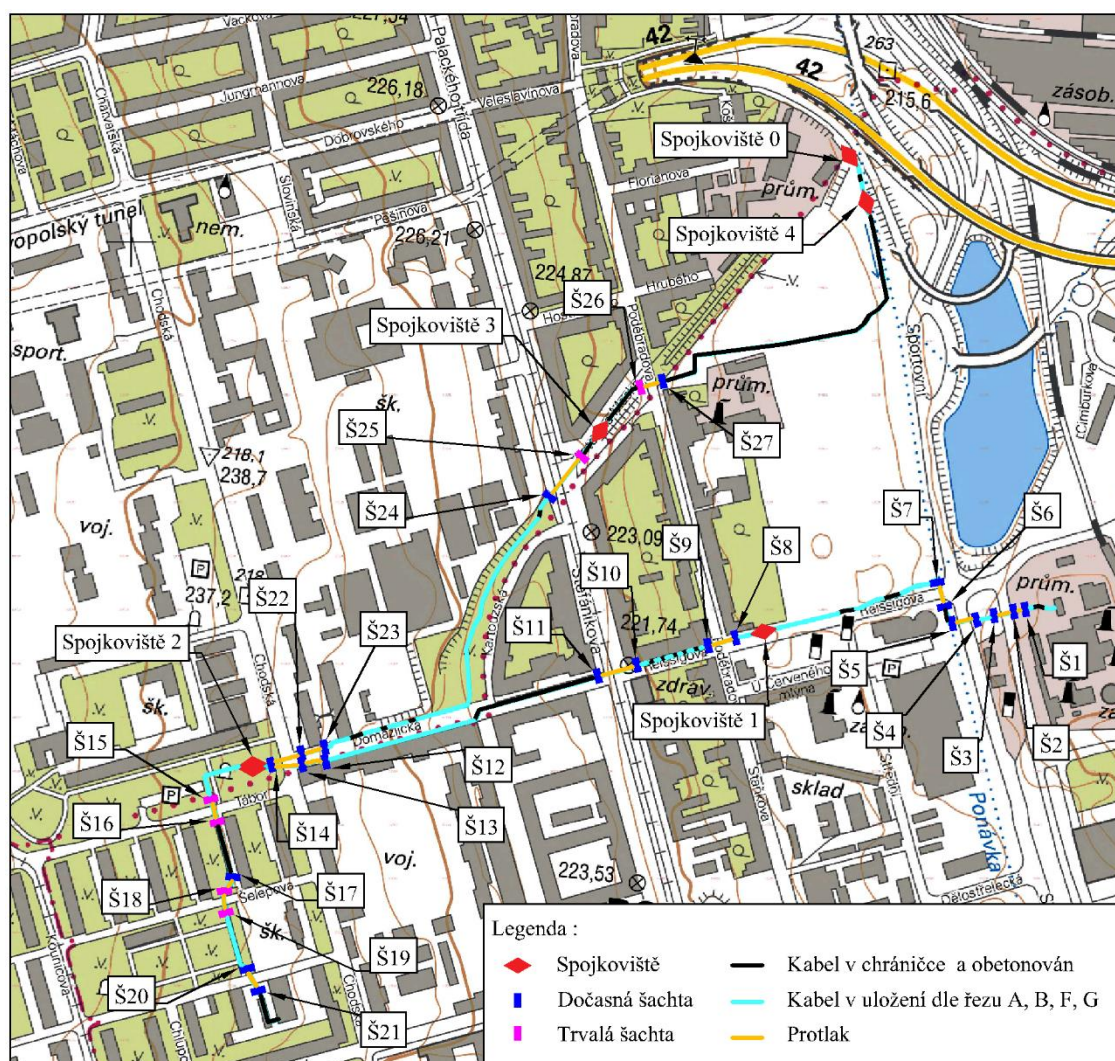
Kabel začíná v zeleném pásu před budovou, kam bude zaústěn, v teplárně ČML. V tomto pásmu bude uložen v zapaženém výkopu dle řezu A z přílohy F (veškeré následující zmiňované řezy jsou zobrazené také v příloze F). Následně překopem přejdeme komunikace uvnitř areálu teplárny dle řezu C. Po překopu půjdeme opět v zeleném pásmu k šachtě 1, do které bude prováděn protlak 1 z šachty 2 před areálem teplárny, která je částečně v zeleném pásmu a částečně v chodníku ze zámkové dlažby. Protlak je zde proveden kvůli místnímu teplovodu. Zároveň se z šachty před areálem provede protlak 2 opačným směrem přes komunikaci do zeleného pásu, kde bude šachta 3 (rozměry zmíněných šachet v této kapitole jsou zobrazené v příloze G). V zeleném pásmu jdeme opět v uložení dle řezu A než dojdeme k šachtě 4, ze které bude proveden protlak 3 přes ulici Sportovní do šachty 5 v zeleném pásmu. Od šachty 5 půjdeme k šachtě 6 v uložení dle řezu C. Šachta 6 se nachází v zeleném pásmu a je cílovou šachtou protlaku 4 přes ulici Reissigova, který začíná v šachtě 7 v zeleném pásmu. Od šachty 7 jdeme podél ulice Reissigova částečně v zeleném pásmu a v chodníku ze zámkové dlažby. Dále jsme na této trase překopali vjezd ze zámkové dlažby a asfaltový vjezd v uložení dle řezu C. Mimo tyto vjezdy jdeme v uložení dle řezu A (pro zelený pás) a dle řezu B (pro chodník),

než dojdeme k spojovacímu 1. Od spojovacího 1 jdeme k šachtě 8 u ulice Poděbradova, která se nachází v chodníku ze zámkové dlažby. Ulici Poděbradova projdeme protlakem 5 do šachty 9, která je opět v chodníku ze zámkové dlažby. Od šachty 9 jdeme v chodníku ze zámkové dlažby až k šachtě 10 u ulice Štefánikova, která se nachází také v chodníku ze zámkové dlažby. Přechod ulice Štefánikova bude proveden protlakem 6 do šachty 11 v asfaltové komunikaci, ve které kabel půjde až k ulici Kartouzská, a následně přejde na druhou stranu silnice na ulici Domažlická do chodníku ze zámkové dlažby. Uložení kabelu v komunikaci je zobrazeno v řezu C. V chodníku ze zámkové dlažby je kabel uložen dle řezu B a pokračuje takto až k šachtě 12, která je částečně v zeleném pásu a asfaltové komunikaci. Šachta 12 je cílová šachta protlaku 7, který startuje v šachtě 13, která je také částečně v zeleném pásu a asfaltové komunikaci. Protlak 7 je zde proveden pro podchod horkovodu. Z šachty 13 je proveden protlak 8 přes ulici Chodská do šachty 14, která se nachází v zeleném pásu u ulice Tábor. Za šachtou 14 se zároveň nachází spojovací 2. Od vyústění protlaku 8 půjdou nyní zeleným pásem dva kabely v souběhu v uložení dle řezu F. Takto v souběhu jdou přes jeden asfaltový chodník do druhého, ve kterém jdou ke komunikaci na ulici Tábor v uložení dle řezu G. Přechod této ulice bude proveden protlakem 9 z šachty 15 v chodníku ze zámkové dlažby do šachty v asfaltovém parkovišti. Od šachty 16 vedou kabely parkovištěm v uložení dle řezu H na konec, kde bude šachta 17, odkud bude proveden protlak 10 do šachty 18 v zeleném pásu vedle parkoviště. Z šachty 18 bude dále proveden protlak přes ulici Šelepova do šachty 19 v chodníku z kostek. V chodníku z kostek následně kabely v souběhu pokračují dle řezu G. Před koncem chodníku kabel odbočí do zeleného pásu u ulice Klusáčkova, kde bude šachta 20, která bude cílovou šachtou protlaku 12. Start protlaku 12 bude v šachtě 21 v areálu současné spínací stanice.

Trasa KLS – SPR

Až ke spojovacímu 2 byla trasa již popsána. Od spojovacího 2 jde druhý z kabelů protlakem 13 ze šachty 14 do šachty 22, která se nachází na ulici Domažlická. Šachta 22 se nachází částečně v zeleném pásu a asfaltové komunikaci. Z této šachty je proveden protlak 14 pod horkovodem do šachty 23 a zároveň se jím vystoupá do hloubky pro běžný výkop. Dále kabel pokračuje chodníkem ze zámkové dlažby v uložení dle řezu B až k ulici Kartouzská, kde přejde z chodníku do zeleného pásu. V zeleném pásu bude následně kabel uložen dle řezu A. Následně kabel přejde do asfaltového chodníku, kde bude uložen opět dle řezu B. Takto kabel dojde až k šachtě 24, která se nachází

v zeleném pásu u ulice Štefánikova. Pod touto ulicí bude proveden protlak 15 do šachty 25. Šachta 25 se nachází částečně v zeleném pásu a asfaltové komunikaci. Od této šachty pokračuje kabel v asfaltové komunikaci (uložen tedy dle řezu C) přes spojovací 3 do šachty 26 u ulice Poděbradova. Z této šachty je proveden protlak 16 přes komunikaci do šachty 27 v zeleném pásu. Od této šachty pokračuje kabel dle Obr. 6.1 v developerské lokalitě v uložení podle řezu D, ale nikoliv v celé trase. Trasu následně kříží ve dvou místech kanalizace, která změní způsob uložení v místě křížení. Pro tyto dvě místa bude uložení provedeno dle řezu E. Následně ke konci trasy kabel projde nově vybudovaným spojovací 4 do již vybudovaného spojovací 0, kde bude naspojován na aktuální kabel 110 kV. Obr. 6.1 uvedený níže ilustruje výše popsanou trasu. Dále je pro lepší představu popsané trasy v příloze G přiložen podélný profil.



Obr. 6.1 - Zobrazení protlaků, šachet a podobných situací v trase kabelu

Závěrem jsou k podrobnému popisu trasy v Tab. 6.1 zobrazeny vzdálenosti v jednotlivých typech povrchu.

Vzdálenost trasy [m]			
Zeleň ³⁵	Asfalt ³⁶	Chodník ze zámkové dlažby	Chodník z kostek
920	885	540	50

Tab. 6.1 – Vzdálenost trasy v různých typech povrchu

Typy povrchu mají na rozpočet vliv vzhledem k způsobu uložení kabelu. Jsou-li kabely ve volném terénu (zeleň), nemusí být jednotlivé kabely uloženy samostatně v chráničkách a nemusí být obetonované, jak je tomu v případě, kdy vede kabel pod komunikacemi a jinými oblastmi, které budou více zatěžovány.

6.2 Tvorba rozpočtu

Rozpočet zde bude rozdělen do tří základních položek. První položku rozpočtu tvoří zemní práce, další položkou jsou elektromontáže a poslední, třetí položka, je materiálové vybavení. Podrobnější rozpis každé položky je uveden v kapitolách níže.

6.2.1 Zemní práce

Velikost této položky v rozpočtu je velice závislá na obtížnosti trasy. Obtížnostmi jsou myšleny prostory, kde jsou vykopávky prováděny, jaké třídy těžitelnosti je zemina, zda dochází ke křížení s jinými inženýrskými sítěmi a podobně. Z výše popsaného je patrné, že navržená trasa pro dimenzovaný kabel je velice obtížná a zemní práce budou tvořit velkou část rozpočtu. Pod pojmem zemní práce, které budou zahrnuty v rámcovém rozpočtu, zde rozumíme:

- Hloubení rýh.
- Zřízení pažení.
- Odstranění pažení.
- Provedení protlaků.
- Hloubení šachet.
- Tvorba kabelového lože.
- Vytvoření spojovacího místa.
- Zakrytí spojovacího místa

³⁵ Jedná se o veškeré zelené pásy zmíněné v podrobném popisu trasy.

³⁶ Zde je zahrnuta trasa jak v asfaltovém chodníku, tak asfaltové komunikaci.

Tyto položky byly vybrány z důvodu cenové náročnosti. Tvoří tedy hlavní tělo rozpočtu pro zemní práce. V níže uvedené Tab. 6.2 je zobrazený soupis jednotlivých položek zemních prací s jednotkovou cenou a celkovou částkou bez DPH.

Zemní práce:				
Položka	MJ	Množství	Cena [Kč]	
			Jednotková	Celková
Hloubení nezapažených rýh šířky do 800 mm strojně	m ³	2 378,02	450,00	1 070 110,80
Hloubení nezapažených rýh šířky do 2000 mm strojně	m ³	876,97	291,00	255 198,42
Zřízení pažení do hloubky 2 m	m ²	2 886,34	126,00	363 678,84
Zřízení pažení od hloubky 2 m do 4 m	m ²	450,72	228,00	102 764,16
Zřízení pažení od hloubky 4 m do 8 m	m ²	190,00	312,00	59 280,00
Odstranění pažení do hloubky 2 m	m ²	2 886,34	75,60	218 207,30
Odstranění pažení od hloubky 2 m do 4 m	m ²	450,72	114,00	51 382,08
Odstranění pažení od hloubky 4 m do 8 m	m ²	190,00	151,00	28 690,00
Protlak pro délky do 20 m	m	115,50	25 300,00	2 922 150,00
Protlak pro délky nad 20 m	m	278,90	20 600,00	5 745 340,00
Příplatek za práci v blízkosti inženýrských sítí	m ³	375,86	553,00	207 848,37
Hloubení šachet	m ³	1 631,61	798,00	1 302 023,58
Kabelové lože	m	996,00	760,00	756 960,00
Deska krycí betonová	ks	7 178,00	45,30	325 163,40
Spojkořiště kabelu 3 × 110 kV	ks	5,00	223 300,00	1 116 500,00
Zakrytí spojkořiště včetně materiálu	ks	5,00	18 500,00	92 500,00
Beton C25/30 frakce 0/22	m ³	1 179,30	2 950,00	3 478 920,25
CELKEM + 6 % VON³⁷				19 182 520 Kč

Tab. 6.2 – Rozpočet zemních prací

Celková suma je necelých dvacet milionů korun. Tato cena odpovídá náročnosti navržené trasy a byla očekávaná.

³⁷ Označení „VON“ v této i následujících tabulkách představuje náklady vzniklé k zařízení staveniště, příjezdové cesty, likvidace škod a konečné úpravy terénu.

6.2.2 Elektromontáže

Do sekce elektromontáží řadíme akce, které je nutné provést ke správné pokládce kabelu. Kabel, který je dopraven k místu uložení namotaný na kabelových bubnech, je z tohoto bubnu následně svíjen do rýhy. Rýha musí mít vyhlazené dno s vrstvou písku o minimální mocnosti 80 mm. Do této rýhy se rozmístí kladky, po kterých je kabel tažen v rýze. Tažení je provedeno navijákem na jedné straně a již zmíněným bubnem na druhé straně zatahované oblasti. Tažení kabelu se provádí za stálého tahu, kterým je kabel možné táhnout. Hodnota maximální tažné síly, kterou může být kabel tažen, nesmí být při zatahování kabelu do trasy překročena, aby nedošlo k poškození kabelu. Dále je před započítáním tažení nutné zajistit, aby při tažení nedošlo k jakémukoliv porušení pláště kabelu. Jedná se o technologickou akci, u které musí být přítomen technik, který provádí supervizi. Celková trasa se rozdělí na přímé úseky, kde se tažení provede, a v místech trasy, kde dochází k lomu přímé trasy, je nutné nepřekročit maximální poloměr ohybu kabelu. Výrobce obvykle udává dvě hodnoty maximálního poloměru ohybu, kde jedna z hodnot je maximální poloměr, kterého je možné dosáhnout při zatahování kabelu, a druhá je hodnota maximálního poloměru ohybu ve stavu, kdy je kabel uložen v kabelové trase. Po zatažení kabelu do trasy se provádějí plášťové zkoušky, kterými se potvrzuje neporušení kabelu.

Úvod této podkapitoly byl vyhrazen pro nastínění technologie ukládání kabelu, pro kterou bylo volně čerpáno z učebního materiálu³⁸, který sepsal doc. Ing. Václav Hrazdil, CSc. Následující Tab. 6.3 na další straně obsahuje přehled hlavních položek, které jsou při elektromontážích potřebné.

³⁸ HRAZDIL, Václav. *Studijní opora kombinovaného studia - Technologie stavebních prací II, BW02, Modul 11: Inženýrské sítě a komunikace* [online]. In: . ÚAIU, s. 33-34 [cit. 2021-07-29]. Dostupné z: <https://adoc.pub/technologie-stavebnich-praci-ii-e16cc653a9e0f65fb8b792150d65956c53566.html>

Elektromontáž:				
Položka	MJ	Množství	Cena [Kč]	
			Jednotková	Celková
Přípravy trasy kladkováním pro kabel 3×110 kV	SADA	1 748,00	285,00	498 180,00
Demontáž kladkové trasy	SADA	1 748,00	142,00	248 216,00
Montáž kabelu 110 kV 1 × 800 mm ² volně uloženého	m	996,00	340,00	338 640,00
Montáž kabelu 110 kV 1 × 800 mm ² pevně uloženého	m	1 623,00	660,00	1 071 180,00
Plášťová zkouška	ks	1,00	120 615,00	120 615,00
Spojka 110 kV s vyvedeným stíněním	ks	3,00	83 976,60	251 929,80
Spojka přímá 110 kV	ks	12,00	69 242,70	830 912,40
Formátování kabelu do trojúhelníku	m	996,00	187,00	186 252,00
Šéfmontáž při pokládce kabelu a při montáži spojek a koncovek	ks	1,00	294 649,95	294 649,95
Kabelové koncovky pro ČML	ks	3,00	122 869,20	368 607,60
Kabelové koncovky pro KLS	ks	6,00	45 670,50	274 023,00
CELKEM + 6 % VON				4 752 198 Kč

Tab. 6.3 – Rozpočet elektromontáží (bez DPH)

6.2.3 Materiálové vybavení

Uvedený materiálový soupis v této podkapitole bude znovu obsahovat pouze hlavní materiál tvořící největší položky do rozpočtu. Jedná se o dimenzovaný kabel, zemnicí kabel, optický kabel a chráničky, ve kterých jsou kabely uloženy v částech trasy, které budou zatěžovány. Přesné množství a ceny jednotlivých položek jsou uvedeny v Tab. 6.4 níže.

Materiálové vybavení:				
Položka	MJ	Množství	Cena [Kč]	
			Jednotková	Celková
Chránička HDPE 200	m	6 172,00	48,00	296 256,00
Chránička HDPE 110	m	1 543,00	32,00	49 376,00
Chránička HDPE 50/42	m	4 629,00	15,00	69 435,00
Výstražná červená fólie (1 ks odpovídá 125 m)	ks	22,00	765,65	16 844,30
Kabel 800mm ²	m	8 750,00	3 251,25	28 448 437,50
Zemnicí kabel – Cu 240 mm ² (ČML-KLS)	m	1 375,00	589,05	809 943,75
Zemnicí kabel – Cu 240 mm ² (ČML-KLS)	m	1 540,00	589,05	907 137,00
Optický kabel	m	5 500,00	50,00	275 000,00
CELKEM + 6 % VON				32 724 775 Kč

Tab. 6.4 – Rozpočet materiálu (bez DPH)

6.2.4 Celkový rozpočet

Celkovou hodnotu rozpočtu dostaneme sečtením všech tří hlavních položek rozpočtu, a to zemních prací, elektromontáží a materiálového vybavení. Rekapitulace jednotlivých sum a zobrazení celkového rozpočtu je provedeno v Tab. 6.5 níže (celkovou tabulku je možné nalézt v příloze H).

Zemní práce	19 182 520 Kč
Elektromontáže	4 752 198 Kč
Materiálové vybavení	32 724 775 Kč
Celkový rozpočet	56 659 494 Kč

Tab. 6.5 – Celkový rozpočet (veškeré uvedené ceny jsou bez DPH)

Celkové rozpočtové náklady stavby jsou necelých padesát sedm milionů korun. Více než polovinu celkové částky tvoří materiálové vybavení. Hlavním důvodem pro takto vysokou částku je cena kabelu 2XS(FL)2Y 1×800 RM/225 o ceně 28 448 438,- Kč, kterého je potřeba téměř devět kilometrů. Samostatný kabel tvoří celkovou největší položku v celém rozpočtu, což bylo vzhledem k jeho délce očekáváno. Velkou část rozpočtu tvoří také zemní práce, a to vzhledem k nutnosti provést 16 protlaků a vyhloubit 27 šachet. K celkové sumě přispěla i potřeba ve většině trasy kabely pevně uložit v chráničkách do betonu. Není tomu tak jen při podchodech komunikací, ale hlavně v developerské oblasti. V této oblasti nepůjde kabel v komunikaci, ale je zde v budoucnu očekáváno projíždění těžké techniky, což také vyžaduje pevné uložení v chráničkách s obetonováním. Také se očekává, že reálné výkopové práce budou ještě nákladnější, a to vzhledem k tomu, že pro zhotovení rámcového rozpočtu bylo předem obecně určeno, že třída těžitelnosti zeminy je v místě výkopových prací třídy I. a skupiny 3³⁹. Dále bylo do rozpočtu použito hloubení rýh strojně, což v reálném provedení nemusí být v celé trase možné, vzhledem k obtížnostem dostat strojní vybavení k místu výkopu. Rozpočet potřebný pro elektromontáže vyšel ze zmíněných třech hlavních položek jako nejméně nákladný. Znovu se jedná o očekávaný výsledek, jelikož elektromontáže nejsou z velké části ovlivněny náročností trasy, ale spíše její délkou.

³⁹Označení třídy těžitelnosti zeminy dle ČSN 73 3055. *Zemní práce při výstavbě potrubí*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2018.

7 ZÁVĚR

Pro lepší orientaci je tato kapitola rozdělena do jednotlivých podkapitol. V první podkapitole je krátce popsán obsah práce, dále na tuto kapitolu navazuje podkapitola, která se věnuje výsledkům a závěrům, kterých bylo v práci dosaženo. Poslední kapitola se věnuje přínosu práce pro autora společně s doporučením, jak s prací dále nakládat.

7.1 Shrnutí obsahu práce

V práci se zabýváme problematikou dimenzování kabelového vedení. Před samotným dimenzováním je čtenáři předložen potřebný teoretický základ k dané problematice, a to pro lepší orientaci v tématu. Společně s dimenzováním popisujeme i průběh dimenzování v projektové praxi, a na závěr této kapitoly je vybrán vhodný typ kabelu pro navrženou trasu kabelového vedení. Bližší uvedení do postupů v praxi zajišťuje kapitola návrhu trasy, kde ukazujeme postupné kroky, které provádí projektant pro návržení trasy kabelového vedení. Z navržené trasy je následně zhotoven rámcový rozpočet. K hlavnímu záměru návrhu dimenzování bylo v práci dále řešeno porovnávání venkovního nadzemního vedení s kabelovým vedením z pohledu vlivů na okolí a problémů při jeho výstavbě. Tímto strohým popisem obsahu práce je zároveň potvrzeno splnění zadání této bakalářské práce, které je zobrazeno v úvodu práce.

7.2 Shrnutí výsledků a závěrů práce

Z dimenzování kabelového vedení bylo zjištěno, že základní normativní podmínky většinou neurčují výsledný průřez, ale slouží jako kontrola zvoleného kabelu. Výsledný průřez kabelu je určen pomocí přepočtů jmenovitého zatížení. Jednotlivé přepočty a koeficienty s tím spojené, jsou dané způsobem uložení kabelu a okolními podmínkami. Pro zadaný jmenovitý krátkodobý proud 31,5 kA s trváním 1 s byl vypočten nejmenší dovolený průřez pro kabel s jádrem z mědi 240 mm², pro hliníkové jádro minimálně 400 mm². Jmenovitá proudová zatížení kabelů těchto průřezů ovšem nebyla dostačující. Z tohoto důvodu se v praxi postupuje od přepočtu jmenovitých proudových zatížení kabelů pro dané způsoby uložení v kabelové trase. Výsledkem výpočtu je maximální proudové zatížení, které nám udává průřez kabelu. Následně je tento kabel kontrolován výpočty, jako je například výpočet minimálního průřezu elektrovedné části.

Dále bylo při rozhodování, zda použít kabelové vedení s jádrem z mědi nebo z hliníku zjištěno, že rozhodujícím faktorem nejsou elektrické parametry vedení vzhledem k jejich podobnosti, ale spíše cena daného druhu vedení. Očekávalo by se, že cena u vedení s jádrem z hliníku bude oproti kabelu s jádrem z mědi menší, ale v práci je ukázáno, že tomu tak není. A to vzhledem k nutnosti navýšit průřez jádra u kabelu s jádrem z hliníku na průřez 1200 mm^2 , kde je již jádro segmentové. Zde vyšla cena kabelu s jádrem z hliníku na 3 350,- Kč za metr délky. Tato cena za metr délky byla o 99,- Kč větší, než cena za metr délky u kabelu s jádrem z mědi. Po přepočtu na celkovou délku vedení se rozdíl pořizovacích nákladů dostal až k sumě 866 250,- Kč. Dalším zjištěním bylo, že celkové ztráty energie, které vzniknou za rok provozu kabelového vedení s jádrem z hliníku, jsou o 3504 kWh větší. Po zvolení ceny za vyrobenou kWh dojde každým rokem k finanční ztrátě spojené s volbou kabelu s hliníkovým jádrem oproti jádru z mědi ve výši 16 819,- Kč. Tyto závěry společně s mírně lepšími elektrickými parametry vedly k výběru kabelu s jádrem z mědi s označením 2XS(FL)2Y 1×800 RM/225.

Z kapitoly návrhu trasy a rozpočtu vzešly důvody převahy využití venkovního nadzemního vedení oproti kabelovému vedení v zemi. Hlavním důvodem jsou náklady pro realizaci, které jsou u kabelového vedení výhradně vyšší. Případy, kdy je ekonomicky výhodnější volbou kabelové zemní vedení, nenastávají. V případech, kdy je využití přenos elektrické energie pomocí kabelového zemního vedení je hlavním důvodem ve většině případů spíše dosažení větší bezpečnosti, nebo je přímo určeno zákonem využít pouze tento způsob přenosu elektrické energie. Dalšími důvody převahy využití venkovního nadzemního vedení jsou problémy spojené s návrhem trasy a jejím provedením. U návrhu jsou problémy velice podobné u obou druhů rozvodu elektrické energie, až na nutnost zasahovat výkopovými pracemi v celé délce vedení, což je nutné pouze u kabelového zemního vedení. U venkovního nadzemního vedení je do pozemků v trase zasahováno stavbou pouze v případech výstavby podpěrných bodů. Větší rozdíly ovšem nastávají při realizaci navržené trasy. Tento aspekt byl zobrazen v této práci, kdy řešená trasa byla velice náročná a přinesla s tím i technologicky náročná řešení, jako jsou například protlaky ocelového potrubí mocnosti 800 mm v hloubce téměř 8 m. Zmíněné problémy, které přicházejí s volbou kabelového zemního vedení, nejsou doposud převáženy jinými výhodami, které by způsobily častější realizaci tohoto druhu přenosu elektrické energie.

7.3 Přínos práce pro autora

Tvorba této práce mi přinesla vhled do reálného projektování v praxi. A to hlavně v ohledech naceňování prací a materiálů potřebných k realizaci zakázky. Dále také vhled do právních aspektů, které jsou s prací projektanta spjaty. Veškeré načerpané poznatky použiji a budu dále rozšiřovat při práci na pozici projektanta ve společnosti Union Grid s.r.o., se kterou bylo na řešené zakázce přestavby spínací stanice a její připojení k distribuční soustavě spolupracováno.

Vytvořená bakalářská práce může dále sloužit jako ilustrativní příklad postupu při dimenzování kabelového zemního vedení a společně s tím i jako příklad návrhu trasy kabelového zemního vedení s vytvořením rozpočtu.

8 SEZNAM LITERATURY

- [1] CYME INTERNATIONAL. *CYME Power Engineering Software: CYMCAP* [online]. [cit. 2021-8-9]. Dostupné z: <https://www.cyme.com/software/cymcap/>
- [2] ČEPS - Údaje o PS. *ČEPS* [online]. Praha, 2020 [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/udaje-o-ps>
- [3] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 100/2001 Sb., o posuzování vlivů na životní prostředí a o změně některých souvisejících zákonů (zákon o posuzování vlivů na životní prostředí). In: *Sbírka zákonů*. Praha: Ministerstvo vnitra ČR, 2001, ročník 2001, částka 40. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-100>
- [4] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 183/2006 Sb., o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon). In: *Sbírka zákonů*. Praha: Ministerstvo vnitra ČR, 2006, ročník 2006, částka 63. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2006-183>
- [5] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 184/2006 Sb., o odnětí nebo omezení vlastnického práva k pozemku nebo ke stavbě (zákon o vyvlastnění). In: *Sbírka zákonů*. Praha: Ministerstvo vnitra ČR, 2006, ročník 2006, částka 63. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2006-184>
- [6] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 416/2009 Sb., o urychlení výstavby dopravní, vodní a energetické infrastruktury a infrastruktury elektronických komunikací (liniový zákon). In: *Sbírka zákonů*. Praha: Ministerstvo vnitra ČR, 2009, ročník 2009, částka 135. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2009-416>

- [7] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 458/2000 Sb., o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon). In: *Sbírka zákonů*. Praha: Ministerstvo vnitra ČR, 2000, ročník 2000, částka 131. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-458/zneni-20210101>
- [8] České vysoké učení technické Praha - *Katedra elektroenergetiky: Přednášky z předmětu BIB15EN1*. Fakulta elektrotechnická v Praze, 2020.
- [9] ČEZ, a.s., Energetika zblízka: Kabelová vedení. *Svět energie: Vzdělávací portál ČEZ* [online]. Praha [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/distribuce-elektriny/distribuce-elektricke-energie-podrobne/kabelova-vedeni/vyklad>
- [10] ČEZ, a.s., Energetika zblízka: Stožáry linek VVN, VN a NN. *Svět energie: Vzdělávací portál ČEZ* [online]. Praha: ČEZ [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/distribuce-elektriny/distribuce-elektricke-energie-podrobne/stozary-linek-vvn-vn-a-nn/vyklad>
- [11] ČEZ, a.s. - *Svět energie: Vzdělávací portál ČEZ* [online]. Praha: ČEZ [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/>
- [12] ČSN 33 2000-4-43 ed. 2 *Elektrické instalace nízkého napětí - Část 4-43: Bezpečnost - Ochrana před nadproudy*. Druhá edice. Praha: Česká agentura pro standardizaci s.p.o., 2010.
- [13] ČSN 33 2000-5-52 ed.2 *Elektrické instalace nízkého napětí - Část 5-52: Výběr a stavba elektrických zařízení - Elektrická vedení*. Druhá edice. Praha: Česká agentura pro standardizaci s.p.o., 2012.
- [14] ČSN 73 3055. *Zemní práce při výstavbě potrubí*. Praha: Česká agentura pro standardizaci s.p.o., 2018.

- [15] ČSN 73 6005 - *Prostorové uspořádání vedení technického vybavení*. Praha: Česká agentura pro standardizaci s.p.o., 2020.
- [16] ČSN IEC 60287-1-1+A1 - *Výpočet dovolených proudů: Část 1-1: Rovnice pro výpočet dovolených proudů a výpočet ztrát - Obecně*. Praha: Česká agentura pro standardizaci s.p.o., 2017.
- [17] HRAZDIL, Václav. *Studijní opora kombinovaného studia - Technologie stavebních prací II, BW02, Modul 11: Inženýrské sítě a komunikace* [online]. In: . ÚAIU, 2005, s. 33-34 [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <https://adoc.pub/technologie-stavebnich-praci-ii16cc653a9e0f65fb8b792150d65956c53566.html>
- [18] KOSTKA, Tomáš. *Elektroenergetika: Přenos a rozvod elektrické energie* [online]. In: . 2012, s. 36 [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: https://www.ssph.cz/vyuka/wp-content/uploads/2020/03/ee-prenos_rozvod_ee.pdf
- [19] NOVOTNÝ, Karel. *Teorie elektromagnetického pole I*. Dotisk prvního vydání. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002, 187 s. ISBN 80-0101774-5.
- [20] OEnergetice. Jsou podzemní kabelová vedení řešením pro českou krajinu? *OEnergetice* [online]. Třebíč: OM Solutions, 2015, 11. května 2018 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/prenos-elektriny/jsou-podzemni-kabelova-vedeni-remenim-ceskou-krajinu>
- [21] ORSÁGOVÁ, Jaroslava. *Rozvodná zařízení* [online]. 2015. VUT v Brně [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/16989703-Rozvodna-zarizeni-autor-textu-ing-jaroslava-orsagova.html>
- [22] PNE 33 3300 - *Navrhování a stavba venkovních vedení nad AC 45 kV*. Druhé vydání. Praha: ČSRES, 2019.

- [23] PNE 33 3042 - *Příklady výpočtu zkratových proudů ve střídavých sítích*. Praha: ČSRES, 2003.
- [24] PNE 34 1050. *Kladení kabelů NN, VN a 110 kV v distribučních sítích energetiky*. Třetí vydání. Praha: ČEZ Distribuce, a.s., EG.D, a.s., E.ON Česká republika, s. r. o., ČEPS, a.s., 2020.
- [25] TOMAN, Petr. *Provoz distribučních soustav*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [26] Union Grid s.r.o., *Vzorové příčné řezy protlaku. Zakázka č. 18-70-001*. Praha. 2020.
- [27] Union Grid s.r.o., *Situace širších vztahů projektovaný kabel 110 kV. Zakázka č. 18-70-001*. 1:5000. Praha, 2019.
- [28] ÚRS - *Cenová soustava: Cenová soustava ÚRS online* [online]. Praha, 2021, 2. pololetí 2021 [cit. 2021-8-1]. Dostupné z: <https://app.urs.cz/>

9 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A: Přehledové schéma – kabelové propojení

Příloha B: Katalog – kabel s Cu jádrem NKT

Příloha C: Katalog – kabel s Al jádrem NKT

Příloha D: CYMCAP – kritické místo trasy

Příloha E: Vzorové příčné řezy

Příloha F: Podélný profil

Příloha G: Rozpočet – souhrnná verze