



# FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ ČVUT V PRAZE

---

Fakulta elektrotechnická  
Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

## **Systémová analýza místa připojení objektu k bleskovému výboji**

**System analysis of the connection point, where the object is connected to the lightning discharge**

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Ekonomika a řízení elektrotechniky

Vedoucí práce: Ing. Jan Mikeš, Ph.D.

**Bc. Radim Fořt**

---

Praha 2019



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Fořt** Jméno: **Radim** Osobní číslo: **420159**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávací katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Studijní obor: **Ekonomika a řízení elektrotechniky**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Systémová analýza místa připojení objektu k bleskovému výboji**

Název diplomové práce anglicky:

**System analysis of the connection point, where the object is connected to the lightning discharge**

Pokyny pro vypracování:

- Charakterizujte současný stav fyzikálně-technických metod determinujících u objektu místo zásahu bleskovým výbojem
- U konkrétní případové studie prokažte reálnou analýzu místa připojení
- Proveďte ekonomicko-technické zhodnocení posuzovaných metod i doporučení na jejich zpřesnění

Seznam doporučené literatury:

Rakov, V.A. Lightning: physics and effects. New York: Cambridge University Press, 2002, ISBN 0-521-58327-6  
Řezáčová, D. et al.: Fyzika oblaků a srážek, Praha: Academia, 2007, ISBN 978-80-200-1505-1

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Jan Mikeš, Ph.D., ČVUT FEL**

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

Datum zadání diplomové práce: **13.02.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **08.01.2019**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2019**

Ing. Jan Mikeš, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů pro vypracování závěrečných prací, a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Praze dne .....

.....

(podpis autora)

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Janu Mikešovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, jeho cenný čas a podnětné návrhy k práci.

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá problematikou přímých ochran před bleskovým výbojem, konkrétně optimalizací vnější ochranné soustavy. V úvodu práce je popsán vznik, průběh a důležité parametry bleskových výbojů. V další části práce jsou popsány možné vzniklé škody po zásahu bleskovým výbojem a metody pro návrh ochran dle příslušných norem. Hlavní částí práce je optimalizační řešení ochran, zejména jímací soustavy na konkrétním objektu. Tento optimalizační návrh je porovnán s konvenčním řešením ochran. Komparace je provedena jak z technického, tak ekonomického hlediska. Celkem jsou v práci porovnány 3 druhy návrhu, jeden striktně dle souboru norem ČSN EN 62305 – *Ochrana před bleskem* a další dva optimalizační, které z normy vycházejí, ale vhodně ji doplňují.

## **Klíčová slova**

Blesk, bleskový výboj, úder blesku, ochrana před bleskem, přímá ochrana, hromosvod, návrh ochran před bleskem, analýza rizik, volba ochran, pravděpodobnostní model, optimalizace jímací soustavy

## **Abstract**

The diploma thesis deals with the problems of direct protection against lightning discharge, specifically with optimization of external system. At the beginning of the thesis the lightning discharges, their origin, process and their typical key parameters are described. The next part of the thesis describes the possible damages done by lightning strikes and the methods for designing protection against lightning strikes. The main part of the thesis is about optimization of the protection, mainly the rods system on a definite building. This optimization solution of protection is compared with conventional solutions for protection. The comparison is made from technical and economic aspects. Overall, 3 solutions are compared, one which strictly accords to the standard ČSN EN 62305 - Lightning protection and two other solutions which are based on the standard but appropriately supplemented it.

## **Keywords**

Lightning, lightning discharge, lightning strike, protection against lightning, direct protection, lightning conductor, solution of protection, risk analysis, protection option, probability model, optimization of rods system

## Obsah

Úvod .....	6
1 Bleskové výboje .....	7
1.1 Vznik bouří.....	7
Nefrontální bouře.....	7
Frontální bouře.....	7
Geografická bouře .....	7
1.2 Zajímavé lokality.....	9
1.3 Průběh bleskového výboje .....	10
1.4 Důležité parametry bleskových výbojů .....	12
2 Ochrany před bleskovým výbojem .....	13
2.1 Základ ochran .....	13
2.1.1 Části vnější ochrany .....	14
2.1.2 Typy škod po úderu bleskem.....	14
2.1.3 Používané materiály .....	17
2.1.4 Nároky na ochrany .....	18
2.2 Metoda valivé koule .....	19
2.3 Metoda mřížové soustavy .....	20
2.4 Metoda vrcholového úhlu .....	21
2.5 Revize.....	22
3 Parametry bleskových výbojů .....	23
3.1 Způsoby měření.....	23
3.2 Data z normy .....	23
3.2.1 Data .....	23
3.2.2 Logaritmicko-normální rozdělení .....	26
3.3 Zpřesnění vstupních dat .....	26
Polarita výbojů.....	27
Velikost bleskového proudu.....	27
Výsledné parametry bleskového výboje .....	29
4 Optimalizační metoda .....	30
4.1 Důvody pro použití optimalizační metody .....	30
4.2 Dynamická valivá koule .....	31
4.4 Výhody a důvody pro její použití.....	32
5 Konkrétní analýza místa .....	34
Představení objektu.....	34
Požadavky na ochranu.....	36
5.1 Návrh dle normy (GN Hromosvody).....	41
5.2 Optimalizační.....	43

Řešení A .....	44
Řešení B .....	47
Ověření výsledků .....	50
6 Ekonomické srovnání navržených ochran .....	52
NPV (Čistá současná hodnota) .....	52
Norma .....	52
6.1 Výsledky pro navržené ochrany .....	53
Porovnání pomocí NPV.....	55
Porovnání pomocí normy .....	55
Kombinace porovnání .....	57
Závěr .....	61
Reference .....	63
Seznam příloh.....	65



## Úvod

Bleskovým výbojům se věnují odborníci, technici, vědci či fyzikové exaktně již od poloviny osmnáctého století. I přes tuto dlouhou dobu neexistuje v současné době metoda, která by tento přírodní jev zcela zkontrolovala. Přes sto let probíhají exaktní technicko-fyzikální měření, která se věnují a přinášejí o něm přesnější představy. Poznatky jsou zpracovávány do souboru technických norem zabývajících se ochranou před úderem bleskového výboje a škod vzniklých po tomto úderu. Normy pomáhají s návrhem ochranných opatření implementovaných na i do objektů, ale i s rozhodováním, zda je ochrana nezbytná. Stanovují také požadavky na materiály použité pro ochranné řešení. Konkrétně se jedná o soubor norem **ČSN EN 62305 – Ochrana před bleskem**. [3], [9], [10]

Bleskový výboj je atmosférický jev – výboj o velkém impulzním napětí a proudu. S jeho zásahem jsou úzce spjaté ztráty ekonomické, hospodářské i na lidských životech. Proto je v mnoha případech nutné objekty a další infrastrukturu, kde existuje riziko zásahu bleskového výboje, chránit. V normě [9] existuje postup, díky kterému lze ocenit rizika na objektu a rozhodnout, jestli je ochrana pro tento objekt nutná. Rizika se dělí do čtyř druhů, jedná se o riziko ztrát na lidských životech, ztrát veřejných služeb, ztrát kulturního dědictví a ekonomických ztrát. Dle normy [9] se jednotlivá rizika ohodnotí, určí se nutnost ochrany, případně její třída. Tato norma definuje pojem **LPS - Lighting protection systém (systém ochrany před bleskem)**. Systém se skládá z **vnitřní** a **vnější části**, používají se pojmy **vnitřní LPS** a **vnější LPS**. Každá z těchto částí i celek LPS se dělí do čtyř tříd, a to dle preciznosti ochrany (I. třída nejlepší ochrana, IV. třída základní ochrana). Pro snížení rizika pod požadovanou hodnotu se nejprve určuje třída ochrany, která je pro objekt nutná. Tato práce se zabývá vnější částí ochrany. Pro kompletní ochranu objektu je nutný soulad vnějšího a vnitřního systému.

Vnější ochrana se skládá ze **tří částí**. Jedná se o jímací soustavu, o soustavu svodů a uzemňovací soustavu. Tento celek má za účel zachytit a svést po uměle vytvořené vodivé dráze bleskový výboj tak, aby se následně rozptýlil v zemi.

Pro návrh vnějších ochranných norem [3] v současné době definuje celkem **tři metody**. Jedná se o metodu valivé koule, metodu mřížové soustavy a metodu ochranného úhlu. Každá z těchto metod má svoje přednosti a hodí se na určité typy objektů. V ideálním případě je vhodné všechny tři metody kombinovat dohromady. Metody spojuje fakt, že se v jakémkoliv případě objektu stanovují části, které je nutné chránit, nebo vymezují prostor, který je před účinky bleskových výbojů chráněn. Pro ochranu splňující požadavky z normy [3] musí být celý objekt chráněn. Metody tak nepracují s pravděpodobností zásahu do jednotlivých částí, ale jen vymezují místa, která se musí chránit, nebo jsou chráněna. Dle dostupných dat z normy [3] lze sestavit model založený na statistických údajích a pro konkrétní objekt určit pravděpodobnost bleskového zásahu do jeho jednotlivých částí. Norma [3] také umožňuje vyčíslit požadavky, kolik procent pravděpodobnosti zásahu bleskového výboje pro danou ochranu třídu musí soustava pokrýt a stanovuje procentuální spolehlivost pro použité materiály. Na základě těchto údajů lze odvodit **pravděpodobnostní model** a dále s ním pracovat.

Důležitou částí práce je návrh řešení vnější ochrany pro vybraný objekt na základě pravděpodobnostního modelu. Návrh je proveden v souladu s normou [3] a je kladen důraz, aby se mohl prakticky využít. Tento návrh je poté v práci porovnán s návrhem dle normy [3] za použití výše jmenovaných tří metod. Je provedeno porovnání vhodnosti návrhů pro daný objekt, kde je kladen důraz na odlišnosti návrhů, stránku technické náročnosti a ekonomické výhodnosti.

# 1 Bleskové výboje

Pro popis a pochopení současných fyzikálně-technických metod determinujících u objektu místo zásahu bleskovým výbojem je důležité popsat samotný princip vzniku a průběh bleskového výboje. Jelikož se jedná o poměrně obsáhlou vědeckou oblast, provedl jsem největší zestručnění tak, aby byla tato část vhodným úvodem do dále zkoumané problematiky.

## 1.1 Vznik bouří

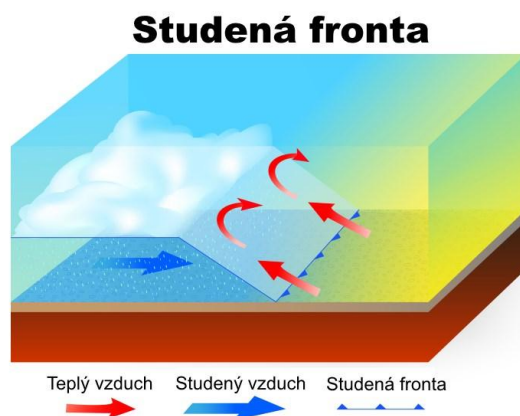
Bleskový výboj vzniká v typických bouřkových mracích. V našich zeměpisných šířkách bouře vznikají převážně v letních měsících při teplém a vlhkém počasí právě tehdy, když jsou teploty na zemském povrchu a teploty ve výšce několika kilometrů nad zemí výrazně rozdílné. Bouře mohou vzniknout na základě tří scénářů vývoje počasí; podle nich se pak dělí na bouře nefrontální, frontální a geografické.

### Nefrontální bouře

Tento typ bouří vzniká z důvodu zahřátí vzduchu nad zemským povrchem. Vzduch je prohřátý přímým slunečním zářením, nebo rozehřátým zemským povrchem. Zahřátý vzduch se tak díky menší hustotě stává lehčím a díky přirozené cirkulaci vstoupá vzhůru. Tyto bouře vznikají zpravidla v létě, a to v nočních, nebo večerních hodinách.

### Frontální bouře

Frontální bouře vzniká při příchodu studené fronty do sledované oblasti. Jak se studená fronta posouvá, vytlačuje teplejší vzduch vzhůru. Takto vzniklé bouře se vyznačují velkou bleskovou aktivitou, bývají také velmi dobře organizované a mohou se spojovat do takzvaných multicel. [1], [2], [3]



Obrázek 1: Frontální bouře [25]

### Geografická bouře

Tyto bouře vznikají z důvodu nerovnoměrného rozdělení zemského povrchu. Díky přirozené cirkulaci vzduchu nad zemským povrchem je teplý vzduch nucen v oblasti hor a pohoří stoupat po návětrných stranách vzhůru a vzniká tak nebezpečný kontrast mezi teplým a studeným vzduchem, a stejně jako v předešlých dvou případech vzniká bouřkový mrak. [1]

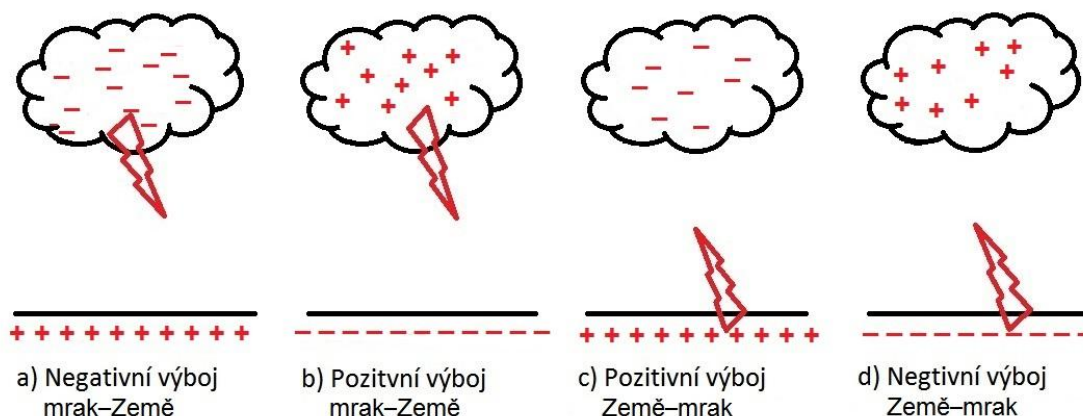
Bouřkový mrak má typický tvar kovadliny a dosahuje výšky až několik kilometrů. Na základě pohybů teplých a studených proudů vzduchu uvnitř mraku dochází i k pohybu malých částeczek vody a ledu, tyto částecčky dosahují rychlosti kolem 5 m/s. Díky vzájemnému tření si částecčky navzájem předávají elektrický náboj, podle gravitační teorie pro nejobvyklejší rozložení náboje mají těžší částecčky zápornou polaritu, lehčí částecčky kladnou polaritu. V mraku se tak tvoří elektrický náboj, dle rozložení částecček na dolní straně mraku vzniká oblast se záporným nábojem. Horní část mraku je nabitá

kladně, může se stát, že určitá část kladných částic zůstane ve spodní části mraku. Takto vzniklý mrak si pak můžeme představit jako veliký elektrostatický generátor (zpravidla pro hodnoty intenzity elektrického pole v řádech stovek kV/m), ze kterého vystupují bleskové výboje. [1], [2], [3]



Obrázek 2: Bouřkový mrak [27]

Tak, jako se bouře dělí na několik typů, dělí se i samotné bleskové výboje. Rozdělit bleskové výboje můžeme podle směru úderu blesku (vzestupný, nebo sestupný bleskový výboj), ale také dle jeho polarit. Bleskové výboje se dělí na 4 typy, znázorněné na následujícím obrázku č. 3. [2]

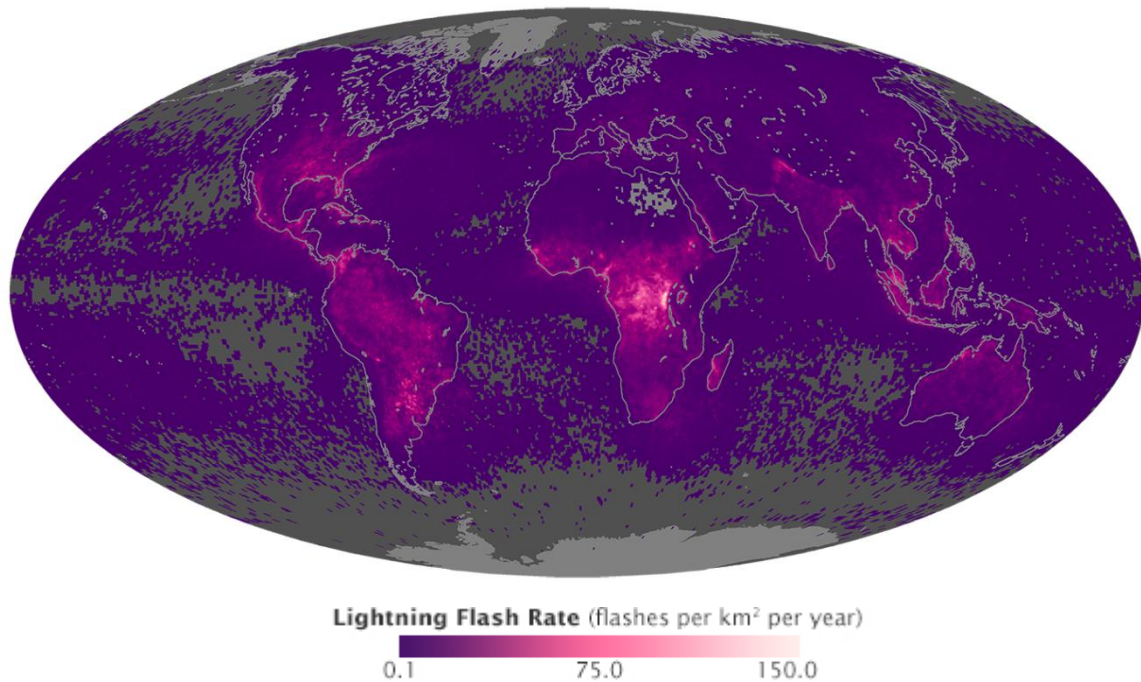


Obrázek 3: Typy bleskových výbojů

Díky tomu, že krajina v České republice není extrémně členitá, drtivá většina bleskových výbojů na našem území jsou výboje sestupné. Výjimkou jsou výboje do vysokých objektů, nebo v horských oblastech, kde můžeme pozorovat jejich opačný směr. Podle statistického zkoumání je celosvětovým průměrem 90 % výbojů s negativní polaritou, na území České republiky se tato čísla pohybují kolem 80 až 85 %. Výboje s pozitivním nábojem, mohou vzniknout ze zbylé části pozitivně nabitých částic v dolní části mraku, nebo posunutím vrstev mraku tak, že na části území je přímo nad zemským povrchem kladně nabitá část mraku (vrchní část). Z těchto důvodů bude pro obecný popis průběhu bleskového výboje dostačující popsat nejčastější typ výboje, a to sestupný negativní. Za zmínku však stojí, že výboje s kladnou polaritou mají schopnost přenášet velké energie, a jsou tak při jejich výskytu velmi nebezpečné. [1], [3], [4]

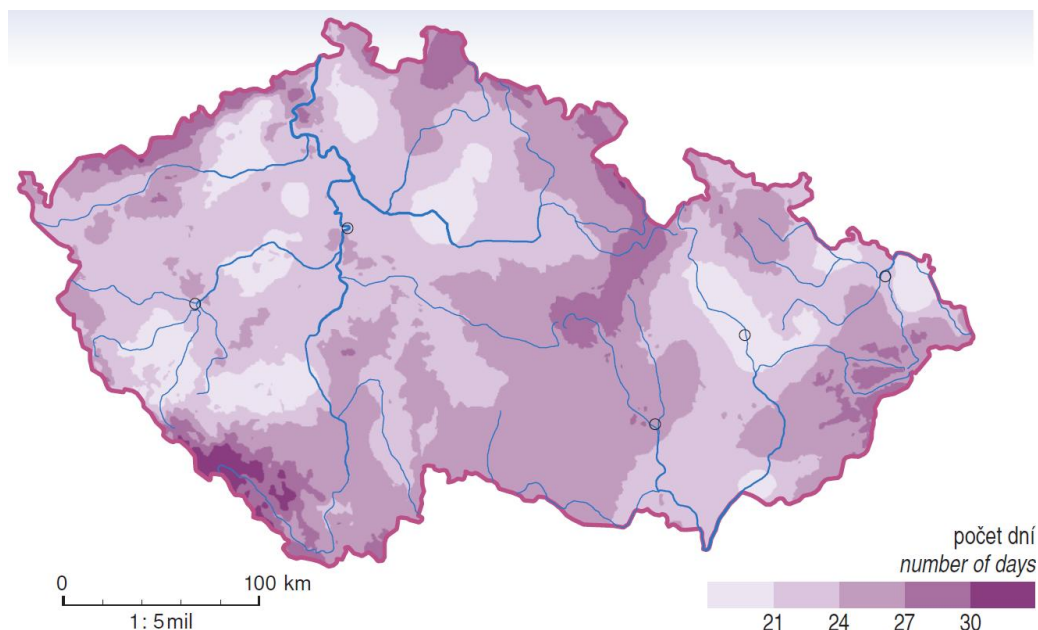
## 1.2 Zajímavé lokality

Na základě popisu vzniku bouřkových mraků by se daly z hlediska bleskové aktivity vyhledat zajímavé lokality. Existují takové lokality, kde je blesková aktivita výrazně větší a kde je naopak výrazně menší. Pro popsání bleskové aktivity na daném území se v současné době dají nalézt dva parametry. Buď počet bleskových výbojů na  $\text{km}^2$  ( $N_g$ ), nebo počet bouřkových dnů v roce ( $T_d$ ), který se používá například v normě. [3] Mezi těmito parametry existuje přepočítání, dané vztahem  $N_g = \frac{T_d}{10}$ . Na následujícím obrázku č. 6 je pomocí satelitních měření zaznamenán počet bleskových výbojů v roce na  $\text{km}^2$  pro území celé zeměkoule. [3]



Obrázek 4: Hustota bleskových výbojů na zeměkouli [6]

Můžeme pozorovat, že výrazně větší blesková aktivita je nad pevninou, než nad oceány, a také že největší blesková aktivita je kolem rovníku. Tyto dva jevy jsou způsobeny tím, že se půda slunečním zářením zahřívá rychleji, než voda, a kolem rovníku dopadají sluneční paprsky s největší intenzitou. [6] Na obrázku č. 4 jsou prezentována data naměřená mezi lety 1995 až 2013, tento poměrně dlouhý měřený interval ukazuje průměrný stav a neměl by být ovlivněn případnými sezónními výkyvy (extrémy). Při pohledu na Evropu můžeme pozorovat, že počet bleskových výbojů v neaktivnějších oblastech se pohybuje v dolní polovině z rozsahu v obrázku č. 4. Přesto to není nějak zanedbatelný počet a je důležité věnovat mu pozornost. Pro území České republiky je udáván údaj s počtem bouřkových dnů v roce  $T_d$ , jeho rozložení je znázorněno na následujícím obrázku č. 5.



Obrázek 5: Průměrný roční počet dní s bouřkou na území ČR v letech (1981–2000) [28]

Můžeme pozorovat, v jakých oblastech se vyskytuje zvýšená bouřková aktivita, dána geografickými vlastnostmi, například existence větší aktivity v blízkosti hor. Dále můžeme pozorovat, že se počet bouřkových dnů v roce pro oblast České republiky pohybuje v rozmezí od 18 do 33 bouřkových dnů, což je oproti celosvětovému hledisku v extrémních případech až **padesátkrát** menší aktivita (pokud v obou případech akceptujeme maximální hodnoty). Po přepočtu na hustotu bleskových výbojů za rok na  $\text{km}^2$  se v ČR pohybujeme přibližně s počtem 2 až 3,3 bleskových výbojů v roce na  $\text{km}^2$ . Ve srovnání s celosvětovým měřítkem se tento údaj opravdu jeví jako poměrně malý, pokud se ale dále podrobněji zaměříme na konkrétní jeden  $\text{km}^2$ , nemusí se tento závěr jevit konečný. Musíme si uvědomit, že takovéto rozložení bleskových výbojů by platilo pro konzistentní  $\text{km}^2$ , bez rozdílných výšek jeho profilu, obsahu stromů a porostu v něm a jeho zastavení. Na základě výškových rozdílů profilu na daném  $\text{km}^2$  bude pravděpodobnost zásahu růst s vyšší nadmořskou výškou. Podobně bude větší pravděpodobnost úderu do stavebních objektů, které se vyskytují nad zemským povrchem a mohou tak umocňovat, nebo vyrovnávat výškové rozdíly. Pokud se podrobně zaměříme na daný  $\text{km}^2$ , můžeme ve většině případů poměrně jednoduše konkretizovat a vybrat jeho část, nebo části, kde bude větší riziko zásahu.

### 1.3 Průběh bleskového výboje

Pro běžného pozorovatele je bleskový výboj doprovázený hromem zcela jistě zajímavá podívaná. Z fyzikálního hlediska je bleskový výboj však ještě zajímavější. Jedná se totiž o jev, jehož vrcholové hodnoty proudu dosahují hodnot desítek až několika stovek kA. Po jedné z výše zmíněných příčin vznikne bouře s typickým bouřkovým mrakem, jeho kladně nabitá část je výše a záporně nabitá část níže. Při dosažení intenzity elektrického pole okolo 50 až 100 kV/m se postupně začíná vytvářet bleskový výboj. Finální kritická hodnota intenzity elektrického pole je vždy ovlivněna lokálními dielektrickými vlastnostmi ovzduší, jako je teplota a vlhkost. Od spodní (záporné) části mraku se ionizuje vzduch a vytváří se tak vodivý kanál výboje, který má velmi elektricky vodivé jádro a blíží se k zemskému povrchu. Ve výšce několik desítek metrů nad povrchem země dochází v místech s největším gradientem intenzity elektrického pole k přerušení elektrické pevnosti vzduchu. Z povrchu země vyráží vzhůru vstříčný výboj. Po spojení vstříčného výboje s vodivým kanálem vzniká celistvá vodivá dráha, po níž postupuje vstříčný výboj dále vzhůru, téměř rychlostí světla. Vytváří se vodivý ionizovaný kanál, v němž dochází k extrémnímu nárůstu proudové hustoty a teploty, která dosahuje 20 000 °C až 30 000 °C. [1], [2], [3]



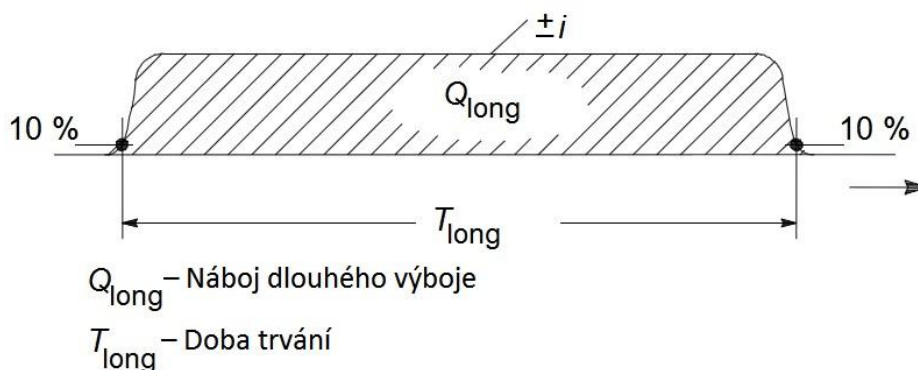
Při tvoření bleskového kanálu postupuje vždy nejprve vyhledávací výboj, který v podstatě hledá nejvodivější dráhu pro další rozvoj bleskového výboje. Vyhledávací část lze popsat jako kouli, na jejímž obvodu se uskuteční bleskový výboj. Tento popis výboje je v současné době základem nepoužívanější metody pro návrh vnějších ochran objektů před zásahem bleskovým výbojem. [1], [2]

Vysoká teplota ve vodivém kanálu způsobuje termickou ionizaci, která díky tepelné setrvačnosti částic udržuje kanál nadále ionizovaný a může dojít i k více výbojům za sebou. Následné výboje mají oproti hlavnímu výboji menší amplitudu a kratší dobu trvání. Vysoká teplota kanálu má i další projev, tím je již zmiňovaný zvukový efekt, hrom. V důsledku zahřátí kanálu zvýší vzduch až stonásobně svůj tlak, což zapříčiní rozpínání jeho objemu a utvoří se tak tlaková vlna, která způsobí silný akustický projev. [1], [2]

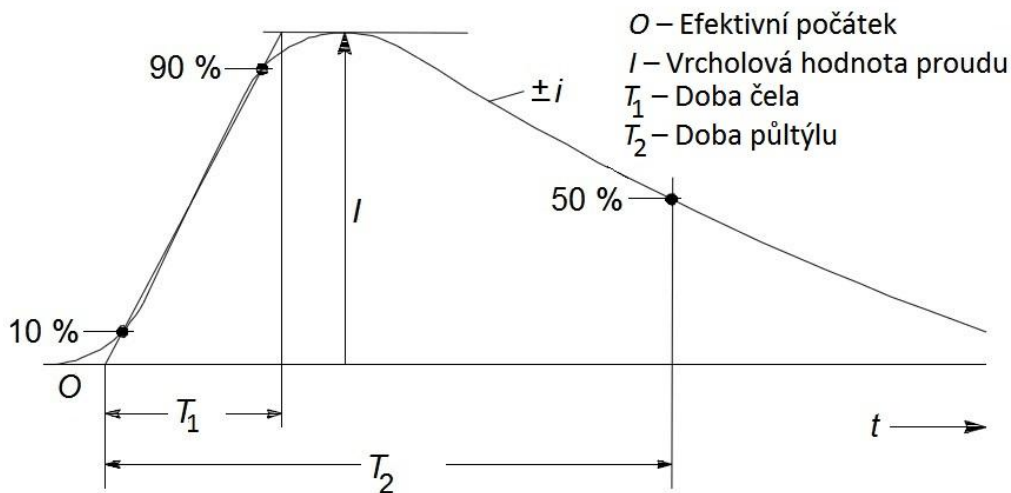
Signalizací pro možný bleskový výboj je sršení modré, nebo modro-zelené barvy, tzv. Eliášův oheň. Jedná se o nitkovitý projev s malou energií vznikající například na hrotech stožárů, vrcholcích skal aj. Pro člověka nejsou nebezpečné, signalizují však možný výskyt vstřícného výboje, a tedy i možnost úderu blesku. [1], [2]

V současné době jsou průběhy bleskových výbojů poměrně dobře matematicky popsány. Asi nejdůležitějším a nejsledovanějším parametrem u bleskových výbojů je velikost jeho proudu v čase. Když známe časový průběh bleskového proudu, je možné odvodit další důležité parametry bleskových výbojů, jako je velikost náboje  $Q$ , nebo specifické energie  $W/R$ . Drtivá většina ze zde uvedených veličin byla precizována na základě usnesení sjezdů CIGRE (International Council on Large Electric Systems) publikovaných v časopise Electra v roce 1975 a 1980. [11], [12] Data byla získána na základě dlouhodobých měření a pozorování pod záštitou CIGRE.

Bleskové výboje se mohou lišit také svojí délkou trvání. Rozlišujeme dlouhé a krátké bleskové výboje. Krátké bleskové výboje mají trvání zpravidla do 2 ms, dlouhé delší než 2 ms, ale kratší než 1 vteřina. Na následujících obrázcích č. 6 a č. 7 jsou znázorněny průběhy obou typů průběhů bleskových výbojů. Je běžné, že se vyskytne i jejich kombinace. Ve vysokonapěťovém zkušebnictví se standardně používá model krátkého bleskového výboje 10/350  $\mu$ s. Hodnoty 10/350  $\mu$ s znamenají časové průběhy výboje, dle obrázku č. 7,  $T_1$  je čas, kdy stoupne hodnota proudu z 10 % na 90 %,  $T_2$  za jakou dobu klesne hodnota proudu na polovinu maximální hodnoty. [3]



Obrázek 6: Dlouhý bleskový výboj [3]



Obrázek 7: Krátký bleskový výboj [3]

Pro sledování parametrů bleskových výbojů jsou důležité jak maximální, tak i minimální hodnoty. Maximální jsou klíčové pro představení možných škod, neboť velikost škod a účinků bleskového výboje jsou spjaté jak s velikostí proudu, náboje, tak i specifické energie  $W/R$ . Minimální hodnoty jsou důležité pro účinnost systému pro ochranu před bleskovým výbojem (LPS). Účinnost závisí na velikosti minimální hodnoty bleskového vrcholového proudu, který určuje poloměr valící se koule, který se využívá v jedné v současné době z nejpoužívanějších a nejkompaktnějších metod. [3]

Je důležité si uvědomit, že bleskové výboje vznikají z bouřkových mraků, které se mohou tvořit různými způsoby, na základě daných geografických podmínek a stavu počasí. Princip vzniku bleskového výboje je pak podobný pro všechny jeho 4 typy. Samostatný bleskový výboj se zpravidla skládá z několika po sobě jdoucích bleskových výbojů, má různé hodnoty sledovaných parametrů.

#### 1.4 Důležité parametry bleskových výbojů

Mezi čtyři nejdůležitější parametry bleskových výbojů patří:

- **Proud**

Proud tekoucí v místě úderu, nebo v určitých částech výboje.

$I$  [A]

- **Náboj**

$$Q = \int i dt,$$

kde je  $Q$  náboj [C],

$i$  hodnota proudu [kA].

- **Specifická energie**

Časový integrál z druhé mocniny proudu za celou dobu trvání. Vyjadřuje energii rozptýlenou bleskovým proudem v jednotkovém odporu.

$$\frac{W}{R} = \int i^2 dt,$$

kde je  $W/R$  specifická energie [kJ/Ohm],

i hodnota proudu [kA].

- **Strmost proudu**

Veličina, která udává nárůst velikosti proudu v průběhu času.

$$\frac{d_i}{d_t} \text{ [kA}/\mu\text{s]},$$

kde je  $d_i$  změna proudu,

$d_t$  jednotka času. [3]

Tyto parametry jsou důležité především z hlediska možných škod způsobených po zásahu bleskového výboje. Škodám se podrobněji věnuje podkapitola 2.1.2. Škodám se věnuje podrobněji jedna z dalších kapitol práce.

## 2 Ochrany před bleskovým výbojem

V této kapitole bude věnována pozornost ochranám tak, jak je definuje současná norma. [3], [10] Budou zde uvedeny hlavní parametry, podle kterých se ochrany navrhují a stanovují jejich jednotlivé třídy. Dále budou představeny konvenční metody, které definuje a uznává norma. [3], [10] Pro každou metodu bude uveden konkrétní příklad vhodného objektu tak, aby byly zřejmé rozdíly výsledných řešení pro různé objekty.

### 2.1 Základ ochran

Norma zabývající se ochranou před úderem bleskového výboje, soubor norem EN ČSN 62305-1 až 4 definuje pojem ochrana před bleskem (LP – lightning protection). Obecně se dá říci, že se jedná o soubor opatření pro zamezení úderu blesku do stavby, případně opatření vedoucí k minimalizaci škod po zásahu bleskem. V těchto dokumentech se definují dva důležité pojmy:

- LPL je **hladina ochrany před bleskem** (*lightning protection level*) – LPL určuje číslo vztažené k souboru hodnot parametrů bleskového proudu, odpovídající pravděpodobnosti, že příslušné maximální a minimální návrhové hodnoty nebudou u blesků vyskytujících se v přírodě překročeny.
- LPS je **systém ochrany před bleskem** (*lightning protection system*) – LPS kompletní technický systém používaný pro snížení hmotných škod způsobených úderem blesku do stavby.

Oba tyto pojmy mají čtyři různé třídy (hladiny), které určují požadavky na kvalitu a provedení daných ochran, případně třídu ochrany, v jaké je provedena. [3]

Systém **LPS** se skládá z **vnitřního**, tak i z **vnějšího** systému ochrany před bleskem. **Vnější část**, obecně nazývaná hromosvod, se skládá z dalších několika částí, jsou jimi jímací soustava, soustava svodů a uzemňovací soustava. **Vnitřní část** se skládá z ekvipotenciálního pospojování proti blesku, nebo elektrické izolace od vnější části LPS. Do vnitřní části by se dala připojit opatření k zamezení vstupu přepětí po úderu bleskem do inženýrských sítí (elektrické vedení, telefonní vedení, atd.). Mezi tato opatření patří zejména různé přepětové ochrany nad rámec běžné elektroinstalace. Norma definuje pojem vztažený právě k těmto ochranám (svodičům přepětí, bleskojistkám), jedná se o pojem ochranné přepětové zařízení (SPD – surge protective device), podobně jako u LPS a LPL se dělí SPD na čtyři třídy: I. třída nejlepší ochrana až IV. třída nejmenší hladina ochrany definovaná normou. [3]



### 2.1.1 Části vnější ochrany

Norma [3], [10] definuje všechny prvky vnější ochrany před bleskem následovně:

- **Jímací soustava** (*air-termination system*) část vnějšího LPS, která používá kovové prvky, jako jsou tyče, mřížovou soustavu, nebo zavěšená lana, které jsou určeny k zachycení úderu blesku.
- **Soustava svodů** (*down-conductor system*) část vnějšího LPS určená ke svedení bleskového proudu z jímací soustavy do uzemňovací soustavy.
- **Uzemňovací soustava** (*earth-termination system*) část vnějšího LPS určená ke svedení a rozptýlení bleskového proudu do země. [3]

Pro moji práci jsou nejdůležitější komponenty z vnější části ochranné soustavy, a to zejména jímací soustava a soustava svodů.

Na tyto různé části vnější ochrany mohou působit různé nežádoucí účinky, na které musí být pro splnění dané třídy ochrany dimenzovány.

U **jímací soustavy** se může objevit:

- eroze v místě připojení,
- odporový ohřev,
- mechanické účinky.

Na **soustavu svodů** mohou působit následující účinky:

- odporový ohřev,
- mechanické účinky.

Na **uzemňovací soustavu** působí zejména:

- eroze v místě připojení, kde se jedná především o korozi, která je dána mechanickými a chemickými vlastnostmi dané půdy.

Jednotlivé součásti vnější ochrany jsou samozřejmě mezi sebou propojovány a jsou důležité i **spojovací součásti**, na které působí:

- **kombinované účinky**, do této kategorie patří tepelné, mechanické a obloukové účinky. [3]

Při návrhu ochran je důležitá spolehlivost použitého materiálu na jejich jednotlivé části, proto v následující části této kapitoly je proveden bližší rozbor výše zmíněných nežádoucích účinků na vnější systém ochrany před bleskem.

### 2.1.2 Typy škod po úderu bleskem

Při bližším zkoumání nežádoucích účinků na vnější systém ochrany by se měly objevit parametry, případně jejich hodnoty, na které je důležité se při návrhu zaměřit. Může se jednat o použité materiály, o jejich průřezy, ale také o jejich uspořádání.

Při uvažování o zásahu bleskem je důležité zaměřit se podrobněji na klíčový parametr, kterým je proud ( $I$  [A]) bleskového výboje. Všechny možné škody vzniklé bleskovým výbojem vznikají v důsledku jeho vrcholových hodnot, jeho průběhu v čase, délky jeho trvání atd. Jelikož systém ochrany není z pravidla tvořen jen jedním svodem, ale je tvořen jejich určitou kombinací, kde počet použitých svodů záleží zejména na velikosti a členitosti daného objektu, dá se předpokládat rozdělení proudu. Rozdělení proudu se dá uvažovat i v důsledku existence náhodných vodičů, jako jsou elektrická vedení vstupující do objektu a i další inženýrské sítě.

- **Rozdělení proudu**

V praxi tento pojem znamená, že z důvodu existence více svodů ve vnějším systému ochrany nepoteče jednotlivými svody maximální hodnota proudu, ale jen určitá jeho část. Tento fakt je důležitý z hlediska rozhodnutí, jaký vhodný typ materiálu pro ochrany použít, případně jaké zvolit parametry.

Norma definuje koeficient uspořádání  $k_c$ , tento koeficient umožňuje odhadnout rozdělení proudu, který poteče svody po zásahu bleskem. V normě existuje samostatná příloha (C ve 3. části normy) zabývající se určením hodnoty tohoto koeficientu, kde výsledná hodnota koeficientu závisí na rozložení a počtu svodů, také na vzdálenosti  $c$  jednotlivých svodů [m] a výšce  $h$  [m] (délka svodu od jímače k uzemňovací soustavě). Koeficient  $k_c$  pak velikost důležitých parametrů v jednotlivých svodech ovlivní následovně:

$$I_s = k_c * I;$$

$$Q_s = k_c * Q;$$

$$\left(\frac{d_i}{d_t}\right)_s = k_c * \frac{d_i}{d_t};$$

kde parametr s indexem  $s$  znamená hodnotu parametru v jednom svodu a parametr bez indexu znamená maximální hodnotu. [3]

Koeficient  $k_c$  nabývá hodnot od 0 do 1. Pro jednoduchý případ objektu ve tvaru krychle, s počtem svodů větším nebo rovným čtyřem a s parametry  $c$ ,  $h$  v intervalu od 3 do 20 metrů, platí přibližně následující rovnice. Pro komplikovanější stavby je vhodné pracovat i s přílohou normy.

$$k_c = \frac{1}{2n} + 0,1 + 0,2 * \sqrt[3]{\frac{c}{h}};$$

kde  $n$  je počet všech svodů, případně i vnitřních. [3]

- **Tepelné účinky**

Tepelné účinky, které mohou poškodit jednotlivé části vnější ochrany před bleskem, se dají rozdělit na dva způsoby. Jedná se o tepelné účinky vzniklé **odporovým ohřevem** vodičů po průchodu proudem a na **tepelné účinky vzniklé patou oblouku výboje k místu připojení** (jímač, jiskřiště).

### **Odporový ohřev**

Odporový ohřev se projevuje v každé části ochrany, která přenáší část bleskového proudu. Teplotní poškození v místě připojení bleskového oblouku, plocha průřezu vodiče musí být dostatečná, aby se zabránilo riziku požáru v okolí vodiče. Teplotní aspekty návrhu musí být v kombinaci s dalšími možnými riziky, jako jsou mechanické vlastnosti a životnost materiálu, to jsou například povětrnostní podmínky a koroze. Okamžitá energie rozptýlená ve vodiči daná průchodem proudu, odpovídá vzorcům Joulových ztrát a vypadá následovně:

$$P = I^2 * R \text{ [J]};$$

kde je,  $R$  odpor [ $\Omega$ ],

$I$  proud [A].

Celková tepelná energie uvolněná bleskovým výbojem se určí dle následujícího vzorce:

$$W = R * \int i^2(t) * dt,$$

kde je,  $R$  odpor [ $\Omega$ ],

$I$  proud [A]. [3]

Jev ohřívání součástí ochran vlivem průchodu bleskového proudu, kde jsou jednotlivé fáze velmi krátké a jakékoliv vzniklé teplo se nestačí rozptýlit do okolí, se považuje za adiabatický. Oteplení vodičů po průchodu bleskovým proudem se pak dá určit z následující rovnice:

$$\theta - \theta_0 = \frac{1}{\alpha} \left[ \exp \left( \frac{W}{R} \cdot \frac{\alpha \cdot \rho_0}{q^2 \cdot \gamma \cdot C_W} \right) - 1 \right];$$

kde je,  $\theta - \theta_0$  oteplení vodičů [K],

$\alpha$  teplotní součinitel [1/K],

$W/R$  specifická energie impulsu (J/ $\Omega$ ),

$\rho_0$  měrný ohmický odpor vodiče při teplotě okolí [ $\Omega \cdot m$ ],

$q$  plocha průřezu vodiče [ $m^2$ ],

$\gamma$  hustota materiálu ( $kg/m^3$ ),

$C_W$  tepelná kapacita (J/ $kg \cdot K$ ). [3]

Tato rovnice umožňuje posoudit, zda je daná součást ochrany vhodná k použití na základě odporového ohřevu, jestli je nutné zvolit jiný průřez použitého materiálu, případně jiný druh materiálu.

### Teplotní poškození v místě připojení

V místě připojení hrozí riziko tavení materiálu a jeho případná eroze. Místo připojení ohřívá jak vysoká hustota proudu, tak i samotná vysoká teplota oblouku, většina energie se generuje na povrchu kovu a v jeho blízkosti. Vzniklé teplo je větší než teplo, které může být absorbováno do kovu a jeho přebytek je ztracen v tavení, nebo ve vypaření kovu. Existuje několik přístupů, jak určit teplotní účinky na povrchu kovu. Jako nejjednodušší se používá v normě **model anodového a katodového úbytku**, vzorec pak vypadá následovně:

$$W = \int_0^\infty u_{a,c}(t) \cdot i(t) \cdot dt ;$$

jedná se v podstatě o anodový/katodový úbytek násobený nábojem bleskového výboje, kde úbytek napětí  $u_{a,c}$  pro rozmezí uvažovaných proudů je celkem konstantní, nejdůležitějším parametrem je náboj výboje. Hodnota úbytku napětí  $u_{a,c}$  dosahuje několika desítek voltů. Při zjednodušení, že veškerá energie vyvinutá v patě oblouku, je využita pouze k tavení kovu, vypadá rovnice, pro určení množství roztaveného kovu v patě oblouku, následovně:

$$V = \frac{u_{a,c}}{\gamma} \cdot \frac{1}{C_W \cdot (\theta_s \cdot \theta_u) + C_S};$$

kde  $V$  je objem roztaveného materiálu [ $m^3$ ],

$u_{a,c}$  anodový nebo katodový úbytek napětí (předpokládá se, že je konstantní a nabývá hodnoty desítek V),

$Q$  náboj bleskového proudu [C],

$\gamma$  hustota materiálu [ $kg/m^3$ ],

$C_W$  tepelná kapacita [J/kg\*K]

$\theta_s$  teplota tavení [°C],

$\theta_u$  okolní teplota [°C],

$C_s$  skupenské teplo tavení [J/K]. [3]

- **Mechanické účinky**

Mechanické účinky jsou způsobeny především elektrodynamickými silami působícími v zasažených materiálech. Při průchodu bleskového proudu může docházet k uvolňování svorek, vytrhávání úchytů a dalším mechanickým destrukcím. Mechanické účinky jsou závislé, jak na velikosti a délce trvání proudu, stejně tak na poloze a pružnosti zasažené mechanické konstrukce. [2], [3]

**Elektrodynamická síla** – tato síla převážně působí v místech, kde vodič vytváří smyčku, kříží se, nebo je ohnutý. Prochází-li takovým místem vodiče bleskový proud, elektrodynamická síla se snaží tuto smyčku roztáhnout, oblouk narovnat. Elektrodynamická síla se dá vyjádřit pomocí následujícího vzorce:

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} * I^2 * \frac{l}{d} = 2 * 10^{-7} * I^2 * \frac{l}{d},$$

kde je,  $F$  elektrodynamická síla [N],

$I$  proud [A],

$\mu_0$  magnetická permeabilita volného prostoru (vakua) ( $4\pi * 10^{-7}$  H/m),

$l$  délka vodičů [m],

$d$  vzdálenost mezi rovnými paralelními sekcemi vodiče [m]. [3]

Tento vzorec platí pro uspořádání vodičů naproti sobě. U ochran je nejčastěji používané uspořádání ohnutí vodiče o 90°, v tomto případě je výsledná síla úměrná druhé mocnině procházejícího proudu a je svázána s převrácenou hodnotou vzdálenosti mezi vodiči.

Ve skutečnosti vznikají škody při současném působení obou typů účinku. Při zahřátí komponentu může způsobit mechanické působení větší škody než při samostatném působení. Tyto účinky mají vliv na jednotlivé výše zmíněné součásti ochran, ale také na jejich spojovací součásti, které jsou považovány za mechanické a teplotní slabá místa. Vzniká tak vysoké namáhání, že v nich hrozí například vytržení vodičů ze svorek, v místech dotyků hrozí vznik oblouku a velké ohřívání v okolí styčných ploch.

### 2.1.3 Používané materiály

Z hlediska možných škod zmíněných v předešlé kapitole je vhodné uvést nejčastěji používané materiály na součásti ochran a jejich klíčové parametry, které vstupují do výše zmíněných rovnic. Budou zde uvedeny čtyři typy materiálu, a to **hliník, měkká ocel, měď a nerezová ocel** (austenitická nemagnetická). V následující tabulce jsou představeny pro tyto materiály hodnoty důležitých veličin.

Veličina	Hliník	Měkká ocel	Měď	Nerezová ocel
$\rho_0$ měrný ohmický odpor vodiče [ $\Omega \cdot m$ ]	$2,9E^{-08}$	$1,2E^{-07}$	$1,78E^{-08}$	$8,0E^{-09}$
$\alpha$ teplotní součinitel [1/K]	0,004	0,0065	0,00392	0,0008
$\gamma$ hustota materiálu [ $kg/m^3$ ]	2 700	7 700	8 920	8 000
$\theta_s$ teplota tavení [ $^{\circ}C$ ]	658	1 530	1 080	1 500
$C_s$ skupenské teplo tavení [J/kg]	$3,97E^{+05}$	$2,72E^{+05}$	$2,09E^{+05}$	---
$C_W$ tepelná kapacita [J/kg $\cdot$ K]	908	469	385	500

Tabulka 1: Parametry používaných materiálů [3]

#### 2.1.4 Nároky na ochrany

Jak už bylo zmíněno v úvodu práce, existují čtyři třídy hladin ochrany. U bleskových výbojů je třeba sledovat maximální a minimální hodnoty důležitých parametrů. Maximální hodnoty parametrů mají hlavní vliv na způsobené škody. U každé z hladin je určena maximální uvažovaná hodnota daného parametru. Minimální hodnoty jsou důležité pro účinnost ochrany z hlediska zachycení bleskového výboje. V následující tabulce jsou uvedeny maximální hodnoty parametrů pro všechny možné třídy ochrany a pro důležité části bleskového výboje.

Hodnoty parametrů dle třídy	LPL		
	I	II	III-IV
<b>První kladný proudový impuls</b>			
Vrcholová hodnota proudu I [kA]	200	150	100
Náboj proudového impulsu Q [C]	100	75	50
Specifická energie W/R [kJ/Ohm]	10 000	5 600	2 500
Časové hodnoty $T_1/T_2$ [ $\mu s/\mu s$ ]	10/350		
<b>První záporný proudový impuls</b>			
Vrcholová hodnota proudu I [kA]	100	75	50
Střední strmlost $di/dt$ [kA/ $\mu s$ ]	100	75	50
Časové hodnoty $T_1/T_2$ [ $\mu s/\mu s$ ]	1/200		
<b>Následné proudové impulzy</b>			
Vrcholová hodnota proudu I [kA]	50	37,5	25
Střední strmlost $di/dt$ [kA/ $\mu s$ ]	200	150	100
Časové hodnoty $T_1/T_2$ [ $\mu s/\mu s$ ]	0,25/100		
<b>Dlouhá proudová vlna</b>			
Náboj dlouhé vlny Q [C]	200	150	100
Časové hodnoty $T_{long}$ [ $\mu s/\mu s$ ]	0,5		
<b>Celkový náboj</b>			
Celkový náboj blesku Q [C]	300	225	150

Tabulka 2: Hodnoty parametrů bleskových výbojů dle tříd LPS [3]

Odolnost proti těmto maximálním parametrům je důležitá z hlediska odolnosti a životnosti použitých komponentů. Určitá hladina ochrany musí být odolná proti parametrům v daném sloupci tabulky. V následující tabulce jsou uvedeny minimální hodnoty parametrů (kritéria zachycení) pro jednotlivé třídy ochrany.

Kritéria zachycení	LPL			
	I	II	III	IV
Minimální vrcholový proud [kA]	3	5	10	16

Tabulka 3: Kritéria zachycení [3]

Mimo těchto dvou tabulek č. 3 a č. 4 stanovujících minimální a maximální hodnoty parametrů norma [3] udává ještě zajímavější informaci, která pochází ze statistického pohledu na ně. Dle obrázku č. 13, který ukazuje statistické rozdělení popisovaných parametrů, lze též určit pravděpodobnost, že daný parametr nepřesáhne maximální hodnotu nebo že hodnota parametru bude větší než minimální hodnota stanovená pro dané třídy ochrany. Tyto pravděpodobnosti vypadají následovně.

Pravděpodobnost, že parametry bleskového proudu jsou	LPL			
	I	II	III	IV
menší, než maximální hodnoty stanovené v tabulce 2	0,99	0,98	0,95	0,95
větší, než minimální hodnoty stanovené v tabulce 3	0,99	0,97	0,91	0,84

Tabulka 4: Pravděpodobnostní hodnot bleskových výbojů [3]

Využitím výše zmíněných poznatků můžeme stanovit celkovou účinnost dané třídy ochrany na základně pravděpodobnostních údajů tím, že zkombinujeme maximální a minimální hodnoty. To je provedeno v následující tabulce.

Třída ochrany LPS	I	II	III	IV
Maximální hodnota proudu [kA]	200	150	100	100
Minimální hodnota proudu [kA]	3	5	10	16
Účinnosti dimenzování komponentů LPS	0,99	0,98	0,95	0,95
Účinnost zachycení	0,99	0,97	0,91	0,84
Celková účinnost	0,98	0,95	0,9	0,8
Pravděpodobnost poškození	0,02	0,05	0,1	0,2

Tabulka 5: Pravděpodobnostní nároky na ochrany [15]

Pro určitou třídu můžeme vždy pozorovat, jaké se jí týkají minimální či maximální parametry a také pravděpodobnosti, se kterými by jim měla ochrana odolat (zachytit pro minimální parametry, odolat pro maximální parametry). Důležitý parametr je **celková účinnost**, což je kombinace účinnosti zachycení a účinnosti parametrů.

Je třeba si uvědomit, že při použití určité hladiny ochrany, statistický přístup definuje pravděpodobnost poškození. Tato pravděpodobnost se pohybuje od 20 % pro LPS IV. Třídy, až k 2 % LPS I. třídy. Pro návrh ochrany je důležité se zaměřit na účinnost zachycení a účinnost použitých komponentů (jejich spolehlivost).

## 2.2 Metoda valivé koule

Jedná se o nejkompexnější a nejpoužívanější metodu, která je vhodná pro všechny typy budov. Princip metody spočívá v tom, že se kolem celého objektu ovaluje koule s daným poloměrem. Tento poloměr je dán minimální hodnotou vrcholové hodnoty proudu bleskového výboje. Aby byl objekt chráněn, koule se smí dotýkat pouze dvou částí jímací soustavy, nebo jímací soustavy a země. V případě, že se koule dotýká části jímací soustavy a nechráněné části objektu, může dojít k zásahu objektu stejně tak, když se dotýká nechráněné části objektu a země. Velikost poloměru valivé koule je určen podle následujícího vzorce:

$$r = 10 * I^{0,65},$$

kde je,  $r$  poloměr valící se koule [m],

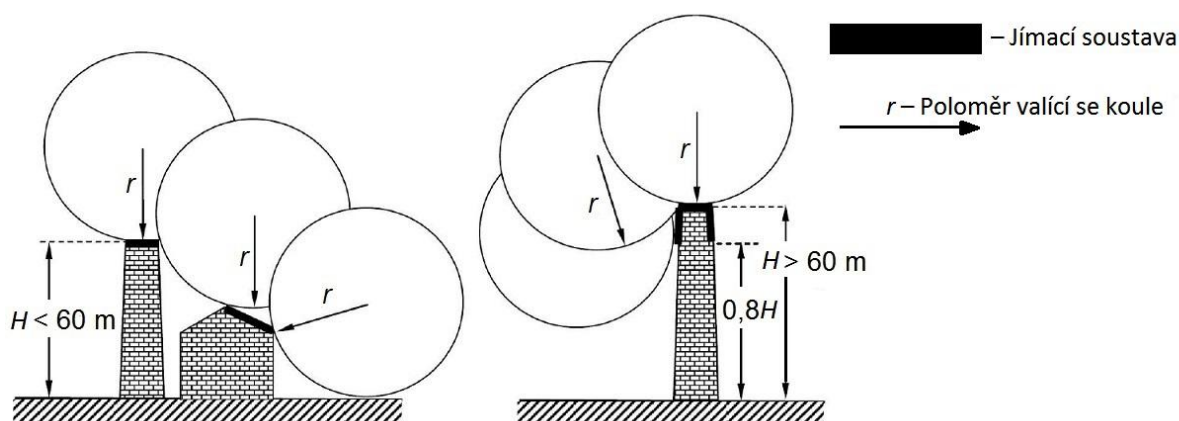
$I$  vrcholová hodnota proudu [kA]. [3]

V následující tabulce jsou hodnoty pro poloměry valivé koule dle jednotlivých tříd LPS.

Třída LPS	Poloměr valící se koule $r$ [m]	Vrcholová hodnota proudu $I$ [kA]
I	20	3
II	30	5
III	45	10
IV	60	16

Tabulka 6: Metoda valivé koule [3]

Pro bližší pochopení metody je metoda naznačena na následujícím obrázku. [3]



Obrázek 8: Metoda valivé koule [3]

#### Typický příklad využití:

Tato metoda je vhodná pro všechny typy budov a objektů, pokud se nejeví jednodušší použít jednu z následujících metod.

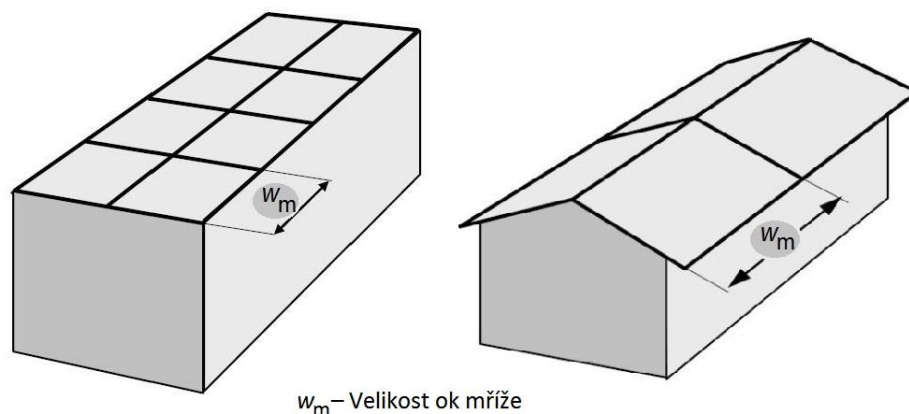
### 2.3 Metoda mřížové soustavy

Tato metoda je nejvhodnější pro objekty s rovnou střechou, nebo se střechou s velmi malým sklonem. Prostor, který je chráněn pomocí této metody, je vymezen tak, že jímací vodiče jsou umístěny na převislech a okrajích střechy. U objektů se sklonem větším jak 10 % také na jejich hřebenech. Další podmínkou je, že žádné kovové předměty nesmí vystupovat nad jímací soustavu. Rozměry ok jsou dány podle následující tabulky, kde jsou uvedené velikosti ok pro jednotlivé třídy LPS.

Třída LPS	Velikost ok $w_m$ [m]
I	5x5
II	10x10
III	15x15
IV	20x20

Tabulka 7: Metoda mřížové soustavy [3]

Problém při využití této metody může nastat v případě, kdy je výška objektu vyšší, než poloměr valivé koule pro danou třídu LPS. V tomto případě pak hrozí úder do objektu z boku. Dle výzkumů v této problematice se však ukazuje, že pravděpodobnost úderu do objektu z boku, který je nižší než 60 m, je zanedbatelná. Největší pravděpodobnost úderu pro objekty vyšší než 60 m je úder do horní části objektu, u těchto objektů tak postačí chránit 20 % horní části dle příslušné třídy LPS. Na následujícím obrázku je naznačen princip této metody. [3]



$w_m$  – Velikost ok mříže

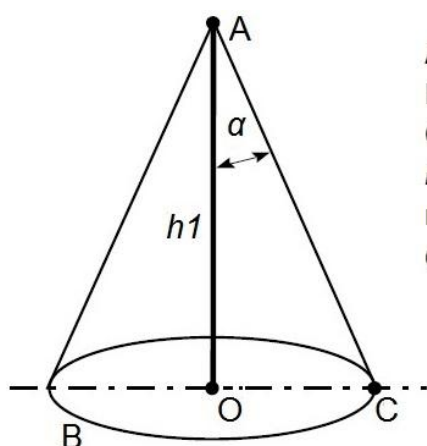
Obrázek 9: Metoda mřížové soustavy [3]

#### Typický příklad využití:

Využití této metody je nevhodnější a nejjednodušší pro objekty s rovnou střechou, nebo s jejím velmi malým sklonem. Jako typické objekty se jeví nižší panelové domy, nemocnice, dále také velké výrobní haly případně sklady. V některých případech nemusí být samotná metoda mřížové soustavy dostatečná. Pokud se na střeše chráněného objektu vyskytují doplňkové technologie, jako je vzduchotechnika, nebo fotovoltaické panely, je nutné doplnit mřížovou soustavu jímacími tyčemi, které v principu dále zmíněné metody vrcholového úhlu ochrání technologie vystupující nad jednodílnou část střechy.

#### 2.4 Metoda vrcholového úhlu

Tato metoda je nevhodnější pro tvarově jednoduché objekty, případně pro samostatně stojící menší objekty. Princip metody spočívá v tom, že objekt je chráněn, nachází-li se objekt v prostoru vytyčeném ochranným úhlem. Tento chráněný prostor je definován úhlem  $\alpha$  (polovina vrcholového úhlu) a výškou jímací soustavy nad referenční rovinou. Chráněný prostor pak tvoří rotační kužel, který vznikl rotací pravoúhlého trojúhelníku AOC kolem osy  $h_1$ . Vrchol A je umístěn na špičce jímací soustavy. Na následujících obrázcích je přiblížen princip metody a v grafu je určen ochranný úhel pro danou budovu v závislosti na její výšce a třídě ochrany. [3]

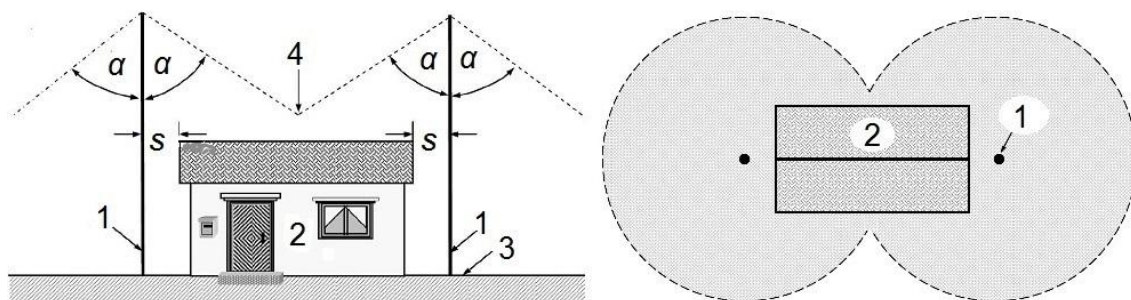


- A – Vrchol jímací tyče
- B – Referenční rovina
- OC – Poloměr ochranného úhlu
- $h_1$  – Výška jímací tyče nad referenční rovinou chráněného prostoru
- $\alpha$  – Ochranný úhel

Obrázek 10: Metoda ochranného úhlu princip [3]

V případě potřeby se může vytvořit větší chráněný prostor pomocí kombinace více kuželů, nebo s použitím jímacího vodiče, jak je naznačeno na následujícím obrázku.

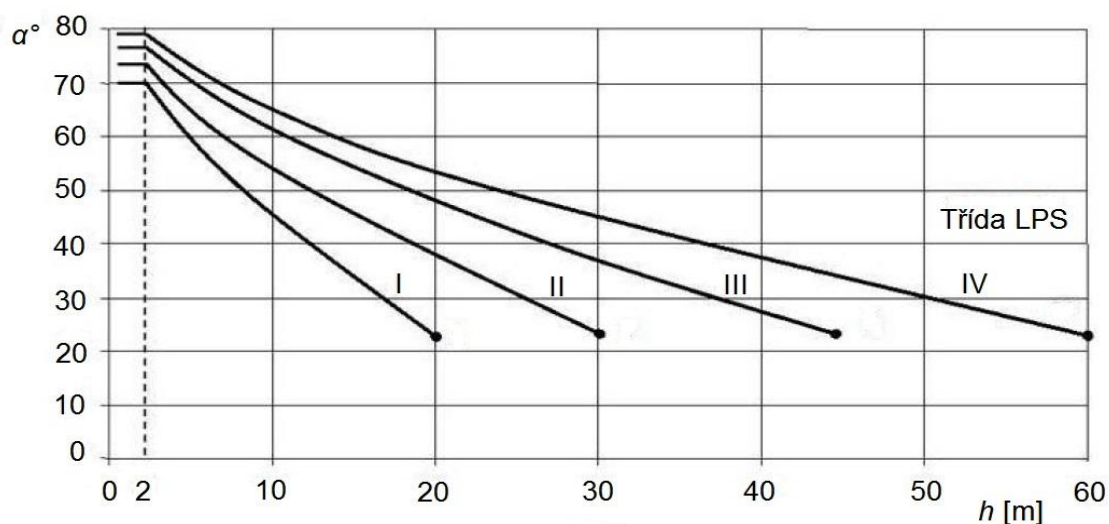




- 1 – Jímací stožár
- 2 – Chráněný objekt
- 3 – Úroveň terénu je referenční rovina
- 4 – Průsečnice mezi ochrannými kužely
- s – Dostatečná vzdálenost
- $\alpha$  – Ochranný úhel

Obrázek 11: Metoda ochranného úhlu příklad [3]

Pro stanovení ochranného úhlu pro daný objekt se vychází z následujícího grafu, kde se úhel liší v závislosti na použité ochranné třídě LPS, ale také na výšce objektu.



Obrázek 12: Metoda ochranného úhlu rozdělení tříd LPS [3]

#### Typický příklad využití:

Použití této metody je nejvhodnější pro samostatně stojící rodinné domy, chalupy případně pro další objekty, které nejsou rozměrově příliš rozsáhlé a tvarově příliš složité. Dále se tato metoda používá pro doplnění ochranné oblasti například, jak bylo zmíněno v popisu předchozí metody.

## 2.5 Revize

Každá z výše uvedených ochranných opatření má své výhody a nedostatky. Vhodnost jejich využití vždy závisí na vlastnostech a parametrech konkrétního objektu a jeho okolí. Tato vhodnost se může projevit mimo bezpečnost daného systému, také jako zjednodušení návrhu samotného systému ochrany před bleskem. Zjednodušení celého systému má za důsledek menší pořizovací náklady, náklady na realizaci ochrany, dále také náklady na následné povinné revizní prohlídky v normou daných intervalech, jejich popis je uveden v následující tabulce.

Hladina ochrany	Vizuální kontrola [rok]	Úplná revize [rok]	Kritické systémy a), b) úplná revize [rok]
I a II	1	2	1
III a IV	1	4	1

a) Systém ochrany před bleskem v aplikacích zahrnující stavby s rizikem způsobovaným výbušnými materiály by měl být vizuálně kontrolován každých 6 měsíců. Elektrická měření instalace by měla být prováděna ve lhůtách 14 až 15 měsíců tam, kde je účelné provádět měření zemního odporu v různých obdobích roku, aby se získaly údaje o sezonních změnách.

b) Kritické systémy mohou zahrnovat stavby obsahující citlivé vnitřní systémy, kancelářské budovy, obchodní budovy, nebo místa, kde může být přítomno velké množství lidí.

Tabulka 8: Revize ochran [10]

Největší položkou na revize z pohledu vlastníka je úplná revize, která se koná jednou ročně. Případně u méně náročných aplikací jednou za dva, nebo čtyři roky. Výsledná cena revize se v tomto případě odvíjí od instalovaných běžných metrů systému (vodičů, svodů). Je zřejmé, že vhodná volba metody návrhu ochrany může výrazně snížit náklady na projektování, stavbu a provoz soustavy.

### 3 Parametry bleskových výbojů

V této části práce jsou zmíněny a rozebrány parametry bleskových výbojů, které mají vliv na možné škody na objektech. Některé parametry mají pro škody a samotný návrh ochran různou důležitost. Jelikož se jedná o data, která aktualizují hodnoty používané v normě takřka 40 let, bude věnována pozornost i těm ve výsledku méně důležitým parametrům. Tam, kde to bude vhodné, porovnáme hodnoty z normy se současnými („novými“) hodnotami ze současné literatury.

#### 3.1 Způsoby měření

Před popisem samotných vlastností bleskových výbojů bude zajímavé zmínit samotné metody, kterými se parametry bleskových výbojů měří a stanovují. Existují metody přímé i nepřímé.

##### Přímé metody měření:

Přímé měření proudu a vlastností bleskových výbojů (1).

##### Nepřímé metody měření:

Změny magnetických změn na přenosovém vedení (2).

Měření změn v elektromagnetickém poli v okolí úderu (3).

Měření magnetických změn na uměle vyrobeném vedení (například na vyvýšených místech) (4). [11], [12]

### 3.2 Data z normy

#### 3.2.1 Data

Hodnoty parametrů používané v normě vycházejí z experimentálních měření parametrů bleskových výbojů. Konkrétně z pozorování z roku 1975, případně 1980, které publikuje CIGRE prostřednictvím časopisů *Electra*, konkrétně se jedná o Berger, K., Anderson, R.B., and Kroninger, H. 1975. *Parameters of lightning flashes. Electra, No. 41, pp. 23-37* a Anderson, R.B., and Eriksson, A.J. 1980. *Lightning parameters for engineering application. Electra, No. 69, pp. 65-102*. [11], [12] Je důležité si uvědomit, že tyto měření, z kterých norma vychází, jsou již přes 40 let staré. V následující části práce jsou uvedeny tabulky a graf představující parametry bleskových výbojů a jejich statistické hodnoty, tak jak je definuje norma. [3] V následující tabulce č. 9 jsou vyznačeny hodnoty výbojů pro jeho různé typy, vyčteny z grafu pro 3 hodnoty, a to pro 95%, 50% a 5% hodnotu daného grafu

z pravděpodobnostního rozdělení. Na základě těchto dat, může být přijato, že tato data mají logaritmicko-normální rozdělení, což je důležitý fakt pro další postup v této práci. Ještě je důležité zmínit, že v oblastech, kde nejsou dány přesnější údaje, se uvažuje rozdělení polarit 90 % ku 10 % pro záporné výboje. [3]

Parametr	Hodnoty stanovené pro LPL I	Hodnoty			Typ výboje	Přímka na obrázku
		95%	50%	5%		
I [kA]		4	20	90	První záporný krátký	1A + 1B
	50	4,9	11,8	28,6	Následný záporný krátký	2
	200	4,6	35	250	První kladný krátký jednotlivý	3
Q <sub>Flash</sub> [C]		1,3	7,5	40	Záporný blesk	4
	300	20	80	350	Kladný blesk	5
Q <sub>Short</sub> [C]		1,1	4,5	20	První záporný krátký	6
		0,22	0,95	4	Následný záporný krátký	7
	100	2	16	150	První kladný krátký	8
W/R [kJ/Ω]		6	55	550	První záporný krátký	9
		0,55	6	52	Následný záporný krátký	10
	10 000	250	650	15000	První kladný krátký	11
$\frac{d_i}{d_{rmax}}$ [kA/μs]		9,1	24,3	65	První záporný krátký	12
		9,9	39,9	161,5	Následný záporný krátký	13
	20	0,2	2,4	32	První kladný krátký	14
$d_i/d_{t_{30\%}}^{90\%}$ [kA/μs]	200	4,1	20,1	98,5	Následný záporný krátký	15
Q <sub>Long</sub> [C]	200				Dlouhý	
T <sub>Long</sub> [s]	0,5				Dlouhý	

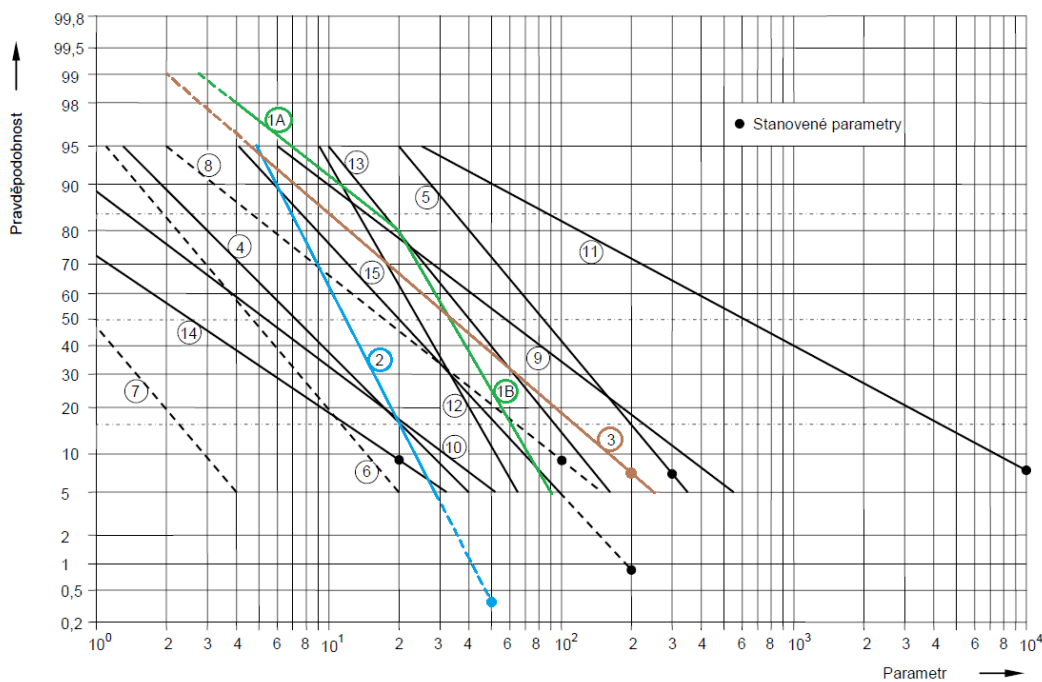
Tabulka 9: Hodnoty parametrů bleskových výbojů [3]

V následující tabulce jsou uvedeny průměrné hodnoty a rozptyly pro jednotlivé parametry výbojů na základě pravděpodobnostního rozdělení, které je částečně zobrazeno v předchozí tabulce (5%, 50%, 95% hodnoty) a dále je vyneseno do následujícího grafu.

Parametr	Střední hodnota	Rozptyl	Typ výboje	Přímka na obrázku
$I$ [kA]	61,1	0,576	První záporný krátký (do 200 kA)	1A
	33,3	0,263	První záporný krátký (od 200 kA)	1B
	11,8	0,233	Následný záporný krátký	2
	33,9	0,527	První kladný krátký jednotlivý	3
$Q_{Flash}$ [C]	7,21	0,452	Záporný blesk	4
	83,7	0,378	Kladný blesk	5
$Q_{Short}$ [C]	4,69	0,383	První záporný krátký	6
	0,938	0,383	Následný záporný krátký	7
	17,3	0,57	První kladný krátký	8
$W/R$ [kJ/ $\Omega$ ]	57,4	0,596	První záporný krátký	9
	5,35	0,6	Následný záporný krátký	10
	612	0,844	První kladný krátký	11
$\frac{d_i}{d_{tmax}}$ [kA/ $\mu$ s]	24,3	0,26	První záporný krátký	12
	40	0,369	Následný záporný krátký	13
	2,53	0,67	První kladný krátký	14
$d_i/d_{t_{30\%}}^{90}$ [kA/ $\mu$ s]	20,1	0,42	Následný záporný krátký	15
$Q_{Long}$ [C]	200		Dlouhý	
$T_{Long}$ [s]	0,5		Dlouhý	

Tabulka 10: Statistické vlastnosti parametrů bleskových výbojů [3]

V tabulce jsou uváděny kompletní parametry bleskových výbojů vstupující do škod, které může úder blesku způsobit. Pro ukázkou jsou hodnoty proudů prvních výbojů v tabulkách a grafech barevně označeny. Můžeme pozorovat, jak se jednotlivé typy bleskových výbojů liší ve velikostech určitých parametrů, velký rozdíl je například v energiích, které blesky přenášejí u kladných blesků je tato hodnota přibližně 10x větší.



Obrázek 13: Pravděpodobnostní rozdělení parametrů bleskových výbojů [3]

### 3.2.2 Logaritmicko-normální rozdělení

Distribuce hodnot parametrů bleskových výbojů odpovídá logaritmicko-normálnímu rozdělení, proto je vhodné pro další použití hodnot, představit si právě toto rozdělení. Jedná se o poměrně často objevující se rozdělení v přírodě, zejména u biologických procesů a jevů. V našem případě popisuje, jak již bylo zmíněno, rozložení hodnot důležitých parametrů u bleskových výbojů. Logaritmicko-normální rozdělení je takové, pro které platí, že náhodná veličina  $X$  má logaritmicko-normální rozdělení právě tehdy, když veličina  $Y=\ln(X)$  má normální rozdělení, kde  $\ln$  značí přirozený logaritmus. Hustota pravděpodobnosti tohoto rozdělení je dána následujícím vztahem. [7]

$$f(x, \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2x}} * e^{-\frac{(\ln\frac{x}{\mu})^2}{2\sigma^2}},$$

kde je  $\mu$  průměr,

$\sigma^2$  rozptyl,

$x$  hodnota sledované veličiny, kde její hodnoty nabývají od 0 do nekonečna, jinak se  $f(x, \mu, \sigma^2)$  rovná nule. [7]

**Hustota pravděpodobnosti** je funkce, jejíž hodnotu pro zvolený prvek z množiny možných vzorků lze interpretovat jako relativní četnosti daného prvku z celé množiny a platí, je-li  $\rho(x)$  hustota pravděpodobnosti spojité veličiny  $x$  pak platí,  $\int \rho(x) dx=1$ , přes definiční obor hodnot. [7]

### 3.3 Zpřesnění vstupních dat

V této části jsou uvedena zpřesněná data k důležitým parametrům (pro tuto práci), která buď vznikla podrobnějším studiem zdrojových dokumentů (Electra [11], [12]), z kterých vychází norma [3], nebo, je zde věnován prostor nově získaným parametrům z publikace CIGRE, a to konkrétně *Lightning Parameters for Engineering Applications*. [13] Tato publikace [13] na základě nových měření rozšiřuje, upravuje a aktualizuje poznatky zmíněné v časopisech Electra č. 41 a č. 69. [11], [12] Může se tak jednat o aktuální data vhodná pro získání vstupů do statistického modelu v této práci. Některé naměřené hodnoty se od původních měření (normy) neliší a lze je použít i nyní, některé se liší poměrně výrazně. Tyto rozdíly pravděpodobně vznikly nepřesnými měřicími metodami, což má původ v rozdílných technologických možnostech s odstupem téměř více jak 40 let. Druhým důvodem pro nepřesnosti je poměrně malé množství počtu pozorování.

Při pohledu na výsledné poznatky z publikace CIGRE z roku 2013 je zřejmé, že nejsou pro tuto práci nějak zvláště zajímavé. Pro tuto publikaci jsou klíčové minimální a maximální hodnoty bleskových parametrů. V této publikaci [13] se objevují největší zpřesnění v pozorováních zejména ve zkoumání fyziologických parametrů bleskových výbojů. Publikace [13] se zaměřuje také na to, z kolika výbojů se průměrně skládá bleskový výboj, případně na jeho časové průběhy a časy mezi jednotlivými dílčími výboji. Tato publikace například poměrně výrazně upravuje údaj o složení negativního bleskového výboje mrak-Zem, kde původní měření uvádějí, že tento typ je složen ze dvou a více výbojů s pravděpodobností 55 %, nová měření ukazují až 80 %, což je poměrně velký rozdíl. [13]

Co se týče rozdělení bleskových parametrů, publikace [13] potvrzuje, že toto rozdělení odpovídá **logaritmicko-normálnímu** a dá se tedy v dalších částech práce použít. Co se týče minimálních a maximálních parametrů, důležitých pro aplikaci v této práci, ty nejsou nějak zvláště aktualizované a nebude to znamenat v novém vydání normy nějakou výraznou úpravu parametrů. Nyní nastává čas představit a zpřesnit důležité parametry k optimalizaci na konkrétní oblast, kde se bude objekt nacházet.

## Polarita výbojů

Jako první parametr bleskových výbojů zde bude rozebrána polarita výbojů vyskytující se při úderech mrak-země. Tento parametr je důležitý především z důvodu, že při různých polaritách se vyskytují jiné hodnoty důležitých parametrů bleskových výbojů, jako je velikost maximálního proudu, ale nejdůležitějším parametrem je velikost přenášené energie, ta je u pozitivních výbojů výrazně větší a to může mít vliv při výběru použitého materiálu.

V následující tabulce jsou uvedeny naměřené údaje v různých světových oblastech. Údaje byly naměřeny různými metodami, čísla u autorů měření odpovídají způsobu použité metody.

Pozorovatel	Oblast	Počet bleskových výbojů			% pozitivních
		Negativní	Pozitivní	Celkem	
Berger (1)	Švýcarsko	0	129	129	0
Anderson a Jenner (2)	Rhodesie	131	9	140	6,4
Anderson (3)	Rhodesie	1 181	122	1 303	9,4
Popolanský (4)	Československo	169	40	209	19,1
Popolanský (2)	Československo	834	161	995	16,2
Mackerras (3)	Austrálie	147	20	167	12
Halliday (3)	Jižní Afrika	267	16	183	5,7
<b>Kombinovaný výsledek</b>		<b>2 858</b>	<b>368</b>	<b>3 226</b>	<b>11,4</b>

Tabulka 11: Rozdělení polarit u bleskových výbojů [11]

Norma [3] definuje jako obecnou hladinu pozitivních výbojů 10 % a pokud existuje měření pro konkrétní oblast má se použít toto přesnější. Můžeme pozorovat, že dnes užívané 10% zastoupení pozitivních bleskových výbojů z normy odpovídá a vychází z výše uvedených naměřených údajů. Dále lze pozorovat, že v určitých oblastech světa se výsledky poměrně liší, v Jižní Africe se číslo pohybuje kolem 6 %, na území bývalého Československa se pohybujeme kolem 16 % až 20 %, což je při návrhu ochrany dobré zvážit. [3], [11]

Dále jsou možné poměrně velké rozdíly v rozložení polarit u bleskových výbojů na základně ročního období, ve kterých se měří. Například při měření v Japonsku se liší zastoupení výbojů poměrně výrazně, pohybuje se v létě a zimě od 3 % (léto) do 73 % (zima), tyto rozdíly jsou pravděpodobně vzniklé různými meteorologickými vlastnostmi bouří. [13]

Je tedy nutné zvážit meteorologické vlastnosti dané oblasti, pro kterou budují ochranu a tomu jí přizpůsobit. Tyto rozdíly v polaritě mohou mít vliv na výsledný model, neboť různé polaritativy mají různé hodnoty všech parametrů.

Pro objekt v České republice je tedy vhodné použít větší zastoupení pozitivní polarity, než doporučuje obecně norma. Ve výpočtech v práci je použit průměr z dostupných hodnot z tabulky výše.

**% pozitivních výbojů = 17,65 %.**

Jedná se čistě o poměr naměřených hodnot pro České území, kde se vyskytují bouře, ve kterých vznikají bleskové výboje v drtivé většině případů v letních měsících.

## Velikost bleskového proudu

Velikosti proudů u bleskových výbojů jsou důležité z hlediska zachycení bleskových výbojů danou ochranou a také pro odolnost ochran. Při použití pravděpodobnostního přístupu, který bude objasněn v další části práce, je nutné znát, jakému typu rozdělení odpovídá rozložení hodnot, a pak znát důležité statistické hodnoty pro pozorovaný parametr. Stěžejními hodnotami jsou, střední hodnota a rozptyl, případně směrodatná odchylka. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty z normy [3] pro první záporný a první negativní výboj.

Střední hodnota [kA]	Rozptyl [kA*kA]	Typ výboje
61,1	0,576	První záporný krátký (do 20 kA)
33,3	0,263	První záporný krátký (od 20 kA)
33,9	0,527	První kladný krátký jednotlivý

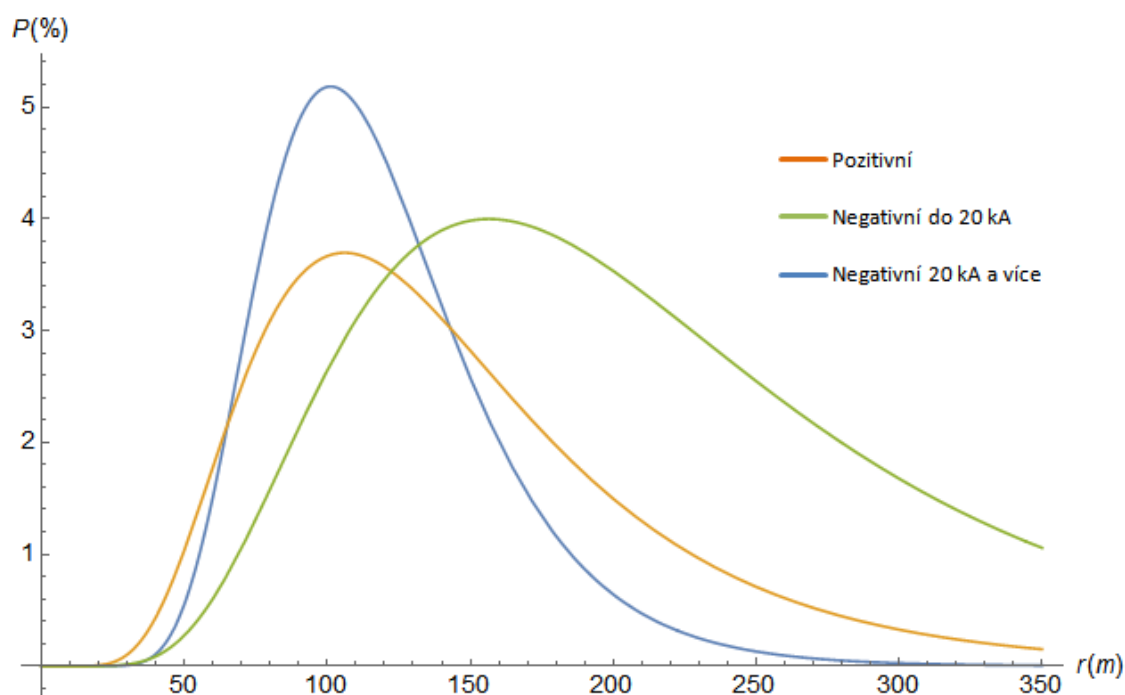
Tabulka 12: Střední hodnota a rozptyl proudů bleskových výbojů [3]

Pro porovnání těchto hodnot, v tomto případě grafickém porovnání, je nutné připravit si výslednou rovnici. Jako nejvhodnější grafické porovnání se jeví vyjádření hustoty pravděpodobnosti. V našem případě, kde nás nyní zajímá minimální hodnoty, pro zachycení bleskových výbojů budeme vycházet z rovnice pro učení poloměru valivé koule. Z této rovnice vyjádříme vztah pro proud.

$$r = 10 * I^{0,65} \gg I = \frac{r^{1/0,65}}{10} \quad [3], [17]$$

Po dosazení tohoto výrazu do funkce pro hustotu pravděpodobnosti logaritmicke-normálního rozdělení získáme následující funkci, jejímž výstupem je, po dosazení hodnot bleskového proudu a použití statistických hodnot z tabulek výše, následující graf.

$$f(r) = \frac{\frac{1}{0,65} * \left(\frac{1}{10}\right)^{\frac{1}{0,65}} * r^{\left(\frac{0,65}{0,35}\right)}}{\left(\frac{r}{10}\right)^{\frac{1}{0,65}} * \sigma \sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{\left(\ln \frac{r}{10} - \mu\right)^2}{2 * \sigma^2}} \quad [5], [17]$$



Obrázek 14: Hustota pravděpodobnosti pro jednotlivé typy bleskových výbojů, vychází z [3]

V grafu můžeme pozorovat, jak se liší jednotlivé typy výbojů.

Při bližším rozboru těchto typů výbojů nastává otázka, jaký předpis pro další účely této práce zvolit. U kladného výboje je situace zřejmá, je k dispozici pouze jeden soubor hodnot. Pro negativní výboj je to již složitější, neboť je složen ze dvou křivek, viz obrázek výše (norma). První hodnoty v tabulce jsou

pro vrcholové hodnoty proudu do 20 kA, druhý údaj pro hodnoty od 20 kA výše. Pro nejpřesnější výsledky by se daly použít oba soubory hodnot a změnit je v hodnotě 20 kA, kde se oba typy mění. To je ale pro konečnou realizaci poměrně složité. V této práci je uveden jiný způsob, jak získat co nejpřesnější hodnoty, ale tak aby byly co nejjednodušeji použitelné. Dle již výše zmíněného obrázku, se hodnoty do 20 kA vyskytují ve 20 % všech případů, vyšší v 80 % ostatních případů. Pokud dáme tyto údaje čistě s pravděpodobnostmi výskytu těchto dvou odlišných křivek dohromady, měli bychom tímto způsobem určit průměrné hodnoty pro záporný výboj.

Pro střední hodnotu proudu:  $0,2 * 61,1 + 0,8 * 33,3 = 38,86 \text{ kA}$

Pro rozptyl:  $0,2 * 0,576 + 0,8 * 0,263 = 0,326 \text{ kA} * \text{kA}$

Takto připravené hodnoty můžeme porovnat s novými hodnotami z CIGRE *Lightning parameters for Engineering Applications*. [13] Samotné nově určené výsledky se nějak výrazným způsobem neliší od v normě [3] používaných hodnot. V následující tabulce bude provedeno porovnání pro upravené velikosti proudů z normy a nové hodnoty.

Data z normy		Nová data		Typ výboje
Střední hodnota [kA]	Rozptyl [kA*kA]	Střední hodnota [kA]	Rozptyl [kA*kA]	
38,9	0,326	30,1	0,265	Negativní
33,9	0,527	35	0,544	Pozitivní

Tabulka 13: Porovnání hodnot proudů [3], [13]

Je nutné zmínit, že nová data na místo střední hodnoty uvádějí medián, tím se do jisté míry komplikuje možné porovnání. Při pohledu do tabulek v této části práce můžeme pozorovat určité rozdíly. Hodnoty dané normou pro horních 80 % negativních výbojů se poměrně shodují s novými daty, ještě více se shodují data pro pozitivní výboje. Na místě je nyní potřeba určit jaké hodnoty proudů budou použity pro další výpočty v práci. Pokud se zamyslíme nad rozdílnými hodnotami pro prvních 20 % pravděpodobnosti a zbylých 80 % z normy, je důležité uvědomit si, že z hlediska tříd ochrany se používají hodnoty pro určení poloměru do 16 kA. Z těchto předpokladů se jeví jako nejrozumnější varianta použít data z normy, která jsou upravená o jejich pravděpodobnostní výskyt. Pro negativní výboj se tedy použijí hodnoty střední hodnoty 38,86 kA a 0,326 kA\*kA pro rozptyl, pro pozitivní původní hodnoty z normy.

### Výsledné parametry bleskového výboje

V první části této kapitoly bylo určeno procentuální rozdělení negativních a pozitivních výbojů, přichází čas pro použití této hodnoty společně s výsledky z druhé části této kapitoly. Výsledek se určuje stejným způsobem jako v předešlém případě, jen nyní používáme procentuální zastoupení negativních a pozitivních výbojů.

Pro střední hodnotu proudu:  $0,833 * 38,86 + 0,167 * 33,3 = 37,93 \text{ kA}$

Pro rozptyl:  $0,833 * 0,326 + 0,167 * 0,263 = 0,315 \text{ kA} * \text{kA}$

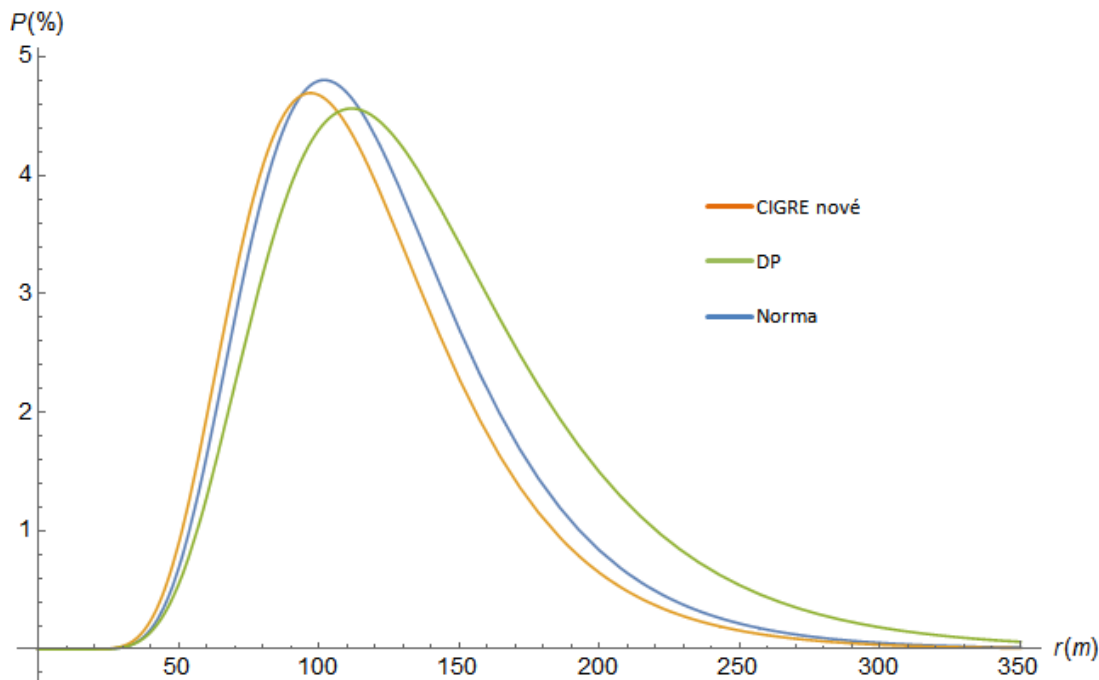
Tyto vzniklé hodnoty budou dále v této práci používány. V následujícím grafu budou porovnány hodnoty v této práci určené s v této práci hodnotami z normy a z nové publikace CIGRE. [13] V následující tabulce jsou zmíněné tyto hodnoty pro výše zmíněné rozdělení negativních a pozitivních výbojů.

Střední hodnota [kA]	Rozptyl [kA*kA]	Typ dat
33,4	0,307	Norma (hodnoty pro negativní výboj od 20 kA a výše) [3]
30,92	0,312	Lightning parameters for engineering (CIGRE) [13]
37,93	0,315	Vypočtené v této práci (DP)

Tabulka 14: Složení negativních a pozitivních bleskových výbojů [3], [13]



Graf vypadá následovně.



Obrázek 15: Hustota pravděpodobnosti pro uvažované rozdělení

Můžeme pozorovat, že všechny tři průběhy se nějak výrazně neliší. Dále používaný průběh v této práci by měl co nejlépe zohledňovat charakter bleskových výbojů na našem území a tvořit tak co nejpřesnější soubor hodnot pro návrh ideálních ochran pro daný objekt na českém území.

## 4 Optimalizační metoda

Mimo vhodné volby základní metody pro návrh ochrany (3 metody z normy [3]) může být další možností, jak snížit náklady na celkové řešení ochrany před úderem bleskového výboje použití nekonvenční metody. V tomto případě metodu založenou na použití naměřených hodnot bleskových parametrů a jejich statistické zpracování. Ideální je pak jejich použití pro konkrétní oblast, ve které se zabýváme ochranou. Mezi důležité parametry patří zejména rozdělení jejich polarit a s tím spjaté velikosti jednotlivých parametrů, zejména bleskových proudů (zachycení + škody) a specifické energie  $W/R$  (škody).

Na základě zpracování dat se pak dá vzniklý model použít při vhodné matematické simulaci k návrhu ochrany před bleskovým výbojem. Jedná se tedy o rozšíření konvenčních metod, kde by měly být zachovány základní postupy a pravidla. V ideálním případě se díky této metodě podaří optimalizovat ochranné řešení, snížit náklady na návrh, výstavbu a následné revize při zachování stejné účinnosti systému jako při použití konvenčních metod.

### 4.1 Důvody pro použití optimalizační metody

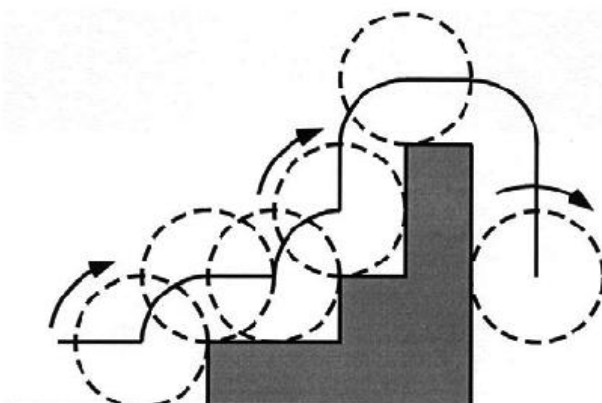
Metody pro návrh ochran pracují s určením možných míst na objektu, kam by mohl bleskový výboj objekt zasáhnout, nebo vymezují prostor, který je chráněn, pokud ochrana splňuje normou dané parametry. Mimo míst takto určených se musí upřednostnit chránění **vyvýšených míst** na objektech a také jeho **rohů**. Kompletní návrh ochrany je pak složen z chránění těchto exponovaných míst na objektu společně s kombinací v souladu s výsledky z jedné ze tří použitých metod v normě. Norma tak určí místa, která je potřeba chránit, ale nebere v potaz pravděpodobnost zásahu do těchto míst. Na objektu zcela jistě existují místa, kde je pravděpodobnost zásahu výrazně větší, než na ostatních místech. Chránění právě těchto míst s vysokou pravděpodobností zásahu může mít význam například

při rozsáhlejší komplexní budově, která se skládá z několika částí. Z hlediska postupů v normě by měl být chráněn celý objekt, například i části, u kterých z hlediska uspořádání objektu není možné, aby byly zasaženy, nebo je to jen velmi málo pravděpodobné. [3]

Tento postup je již zmiňován v několika odborných článcích, ale není k němu dostupný ekonomický kontext ochrany pro konkrétní (ukázkový objekt). Postup se nazývá **dynamická valivá koule**. Jak název napovídá, jedná se o rozšíření metody valivé koule z normy. [3] Používá se v podstatě stejný princip jako u metody valivé koule, na rozdíl od něj používá všechny možné velikosti průměrů valivé koule. Průměry jsou určeny na základě velikostí vrcholových proudů tak, jak se mohou vyskytovat dle jejich pravděpodobnostního rozdělení. Při vhodném použití této metody tak mimo lokalizování míst, kde hrozí zasažení bleskovým výbojem, můžeme i určit pravděpodobnost zásahu do těchto míst a vybrat tak nejefektivnější umístění ochranných komponentů. [14], [19]

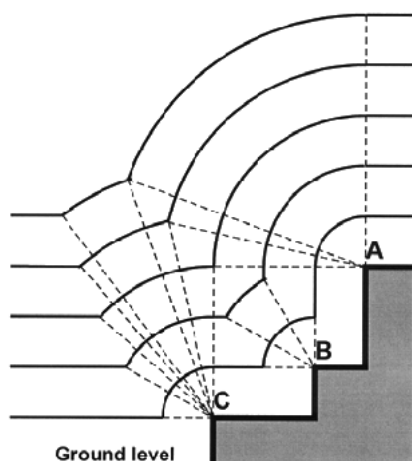
## 4.2 Dynamická valivá koule

Všechny potřebné vstupy pro použití této metody jsou již v této práci představeny. Jedná se o vztah pro určení poloměru valivé koule na základě vrcholové hodnoty proudu bleskového výboje a pravděpodobností rozdělení tohoto proudu. Pokud dáme tyto dva vzorce dohromady, vytvoří se výsledná rovnice pravděpodobnostního rozdělení poloměru valivé koule. Tuto rovnici můžeme použít v samotném modelu. Ve vhodném prostředí je možné naprogramovat model tak, aby na základě vstupů dokázal vypočítat a znázornit požadované výstupy. Na následujících obrázcích jsou ukázány rozdíly mezi metodou valivé koule a metodou dynamické valivé koule.



Obrázek 16: Princip metody valivé koule 2 [14]

Na tomto obrázku můžeme pozorovat princip valivé koule z normy [3], objekt je prověřen pomocí jednoho rozměru valivé koule, tak jak její rozměr definuje norma pro potřebnou hladinu ochrany. Tam, kde dojde k doteku části objektu a země nebo dvou částí objektu, je nutné tyto části chránit.



Obrázek 17: Základní princip metody dynamické valivé koule [14]

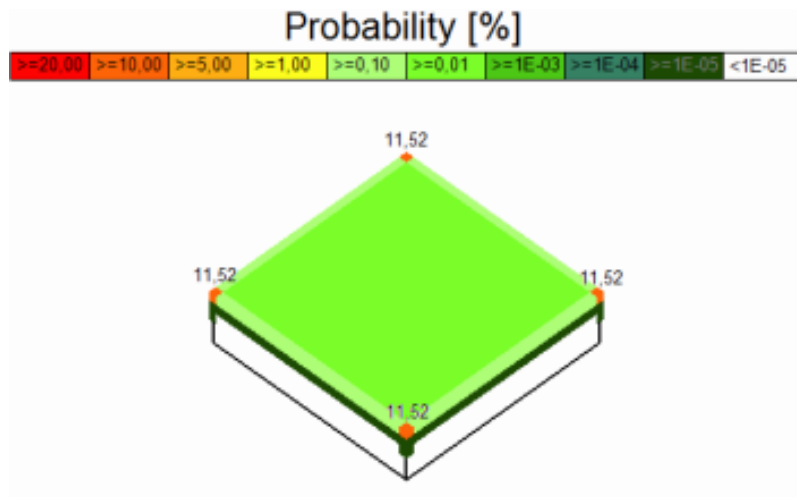
Na obrázku č. 17 můžeme pozorovat, že s dynamickou valivou koulí vznikne více možných doteků do objektu. Je to dáno tím, že se zvětšujícím se poloměrem valivé koule se objevují místa, která splňují princip zásahu i pro další poloměry. S tím, jaké je statistické rozložení velikostí proudů/poloměrů, se dá určit pravděpodobnost zásahu pro konkrétní místa.

Pro vytvoření kódu, který by se dal využít k určení pravděpodobností zásahu bleskového výboje pro daný objekt, existuje několik vhodných programových prostředí. Samotný postup, jak daný kód napsat a použít, je do jisté míry popsán v odborné literatuře. Touto problematikou se zabýval Bc. Tibor Stökl v bakalářské práci [17] a sestavil funkční kód v programu *Wolfram Mathematica*, který se dá v této práci s drobnými úpravami využít. V této práci nebude tvořen vlastní program, ale bude použit právě již existující kód. Díky tomuto kódu v programu *Mathematica* se po zadání rozměrů dané budovy vytvoří 3D model této budovy a program kolem ní vytvoří velké množství bodů, které simulují vzduch kolem budovy. Každý z těchto bodů pak představuje možný střed valivé koule. Pro valivou kouli s jinou velikostí poloměru pak existuje jiné nejbližší místo na objektu, tedy místa, kam by bleskový výboj udeřil. Různé velikosti poloměrů se vyskytují s pravděpodobnostmi dle v práci zmíněné rovnice (str. 28). Pro každý bod na objektu se z možných zásahů bleskových výbojů určí, s jakou pravděpodobností může být daný bod zasažen. Pro celkové porovnání se pravděpodobnost jednotlivého bodu musí podělit celkovou hodnotou pravděpodobností zásahu do dané budovy; vzniknou tak procentuální hodnoty možného zásahu do objektu.

Díky tomuto kódu by se mělo pro konkrétní případovou studii určit nejefektivnější ochranné opatření.

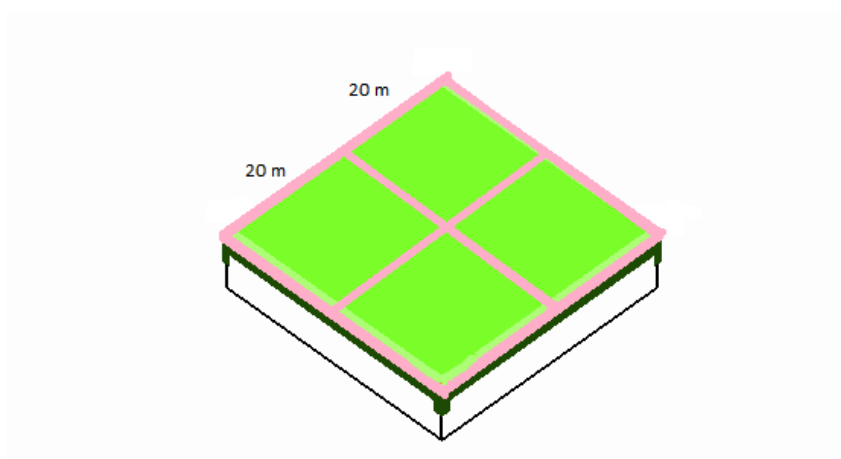
#### 4.4 Výhody a důvody pro její použití

Po popsání principu metody a zmínění důvodů pro její použití, bude dobré ukázat na jednoduchém příkladu význam použití tohoto přístupu. Bude zde uveden příklad z odborného článku [5]. V článku je význam použití metody demonstrován na objektu vysokém 10 metrů o rozměrech 40 x 40 m. Jedná se v podstatě o jednoduchý objekt ve tvaru kvádrů. Na následujícím obrázku můžeme pozorovat, jak se rozdělí pravděpodobnost zásahu do objektu bez použití ochran.



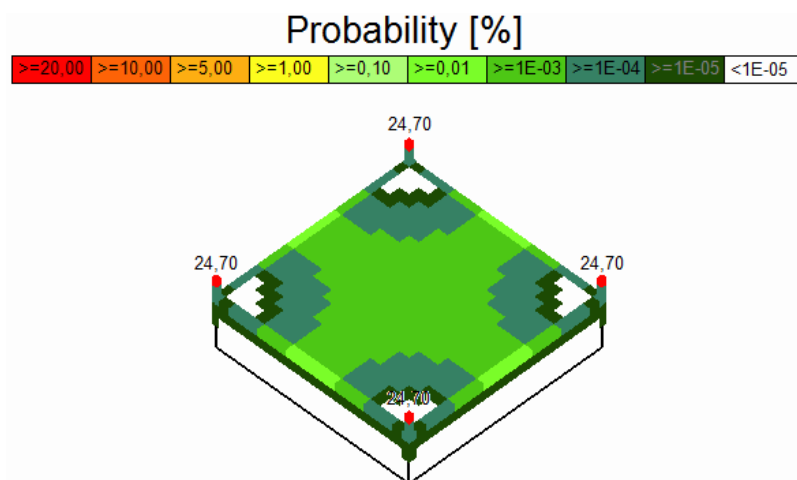
**Obrázek 18: Objekt bez ochranných opatření, rozdělení pravděpodobnosti zásahu [5]**

Jedná se o samostatně stojící objekt s rovnou střechou, z hlediska normy [3] by zde bylo vhodné použití metody mřížové soustavy. To by znamenalo určit vhodnou třídu ochrany pro tento objekt. V tomto úvodu, budeme uvažovat nejmírnější ochranu a to IV. třídu ochrany, která určuje rozměry ok 20 x 20 metrů. Naznačení použití této metody můžeme vidět na obrázku.



**Obrázek 19: Naznačení mřížové soustavy na objekt [5]**

Pro ochranu dle dané třídy pro tento objekt bude potřeba použití 240 metrů vodiče jen pro jímací soustavu pro zajištění požadované ochrany, což je poměrně velké množství materiálu a s ním spojené náklady na jeho koupi, instalování, ale i údržbu a revize. Na následujícím obrázku můžeme pozorovat, co se stane, umístíme-li na rohy objektu čtyři jímací tyče o výšce 4 metrů.



**Obrázek 20: Výsledná pravděpodobnost zásahu pro použití čtyř jímacích tyčí [5]**

Na obrázku č. 20 můžeme vidět, že tyto čtyři jímací tyče posbírají téměř celou pravděpodobnost zásahu bleskového výboje do objektu, konkrétně 98,8 %, což při pohledu do tabulky číslo 5 z druhé části této práce, dokonce odpovídá druhé třídě ochrany LPS, pravděpodobnost zachycení tímto způsobem převyšuje hodnotu 97 %. Na první pohled je jasné, že toto řešení bude levnější než řešení ochrany pomocí mřížové soustavy. Pro složitější a větší stavby může být tento přístup ještě zajímavější. Pro případovou studii zde v práci budou provedeny konkrétní finanční propočty pro zjištění významu použití této optimalizační metody.

V závěru této kapitoly je nutné zmínit, že v článku z kterého zde používám výstupy, používají ne zcela stejné pravděpodobnostní hodnoty, jako jsou použity v této práci. Přesto se domnívám, že se jedná o vhodný a názorný úvodní příklad, jak může tento přístup ovlivnit ekonomickou stránku ochrany.

## 5 Konkrétní analýza místa

Pro tuto práci je stěžejní porovnání různých možných metod na návrh ochrany na konkrétní objekt a jejich podrobnější analýza, z technického hlediska, z účinnosti opatření a zejména z finančních parametrů daných ochrany. Nejprve bude v této kapitole představen objekt a požadavky na jeho chránění. Dále jsou uvedeny tři způsoby realizace ochrany. První návrh v souladu s normou, zbylé vycházejí z optimalizační metody. Metody, které jsou zde v práci použité, jsou popsány v předchozích částech práce. Nyní nastává čas k představení objektu, který se bude řešit.

### Představení objektu

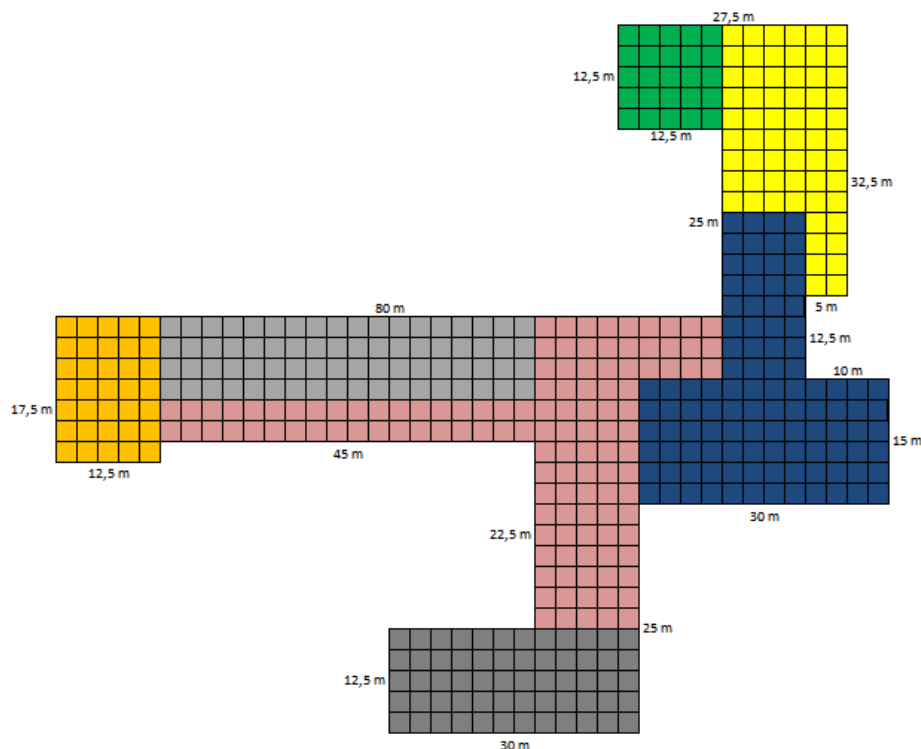
Pro tuto práci byl objekt volen tak, aby byl z hlediska ochrany před zásahem bleskovým výbojem významný. To znamená, aby bylo nutné hned z několika důvodů tento objekt chránit, ale také, aby byl dostatečně rozsáhlý, aby zde měla optimalizace jímací soustavy smysl. Některé jeho parametry jsou pro účely práce do jisté míry zjednodušeny. Jedná se o objekt Základní a mateřské školy Bílá (Bílá č. 1, Praha 6 - Dejvice). Název této instituce napovídá, že objekt je tvořen několika budovami. Objekt mateřské školy a několika objekty základní školy. Jedná se o komplex takzvaných francouzských škol, na které vypsala mezi dvěma válkami výběrové řízení francouzská vláda a stavba vznikla podle projektu architekta Jana Gillara. Škola byla dostavěna v roce 1934 ve funkcionalistickém stylu, jedná se o vrcholné dílo tohoto architekta a také o skvost funkcionalistické nejen české architektury. Od roku 1958 je tento objekt chráněn jako národní kulturní památka. Jedná se o rozsáhlý komplex složený z několika kvádrových bloků, což je pro můj případ vhodné pro poměrně snadné modelování do programového prostředí. Za zmínku stojí, že škola prošla v roce 2006 rozsáhlou rekonstrukcí v hodnotě téměř 125 milionů korun. Na následujícím obrázku je náhled školy ve 3D z prostředí *Google maps*. Jelikož se jedná o poměrně rozsáhlý objekt, je právě tento náhled

nejvhodnější. Na obrázku jsou jednotlivé části budovy označené tak, jak jsou používány. [21], [22], [23]



Obrázek 21: Komplex ZŠ a MŠ Bílá [24]

Pro tuto práci je nejdůležitější pro aplikaci ochrany znát rozměry komplexu budov. Konkrétní rozměry jsou vyčteny z mapových podkladů a výšky jednotlivých budov jsou přibližně odhadnuty. Některé údaje jsou dále zaokrouhleny pro snazší modelování objektu do použitých programů. Na následujícím obrázku č. 22 vidíme půdorys celého komplexu budov včetně jejich rozměrů. Mřížka, kterou obrázek obsahuje, pomáhá k určení dalších nepopsaných rozměrů budovy. Základní čtvereček mřížky má délku strany 2,5 metru.



Obrázek 22: Půdorys komplexu škol

V obrázku č. 22 můžeme pozorovat různě vybarvené plochy, každá z barev odpovídá výšce dané části objektu. V následující tabulce jsou popsány jednotlivé výšky stavby.

	Modrá	25 metrů
	Žlutá	22 metrů
	Šedivá	15 metrů
	Oranžová	10 metrů
	Růžová	7 metrů
	Zelená	5 metrů

Tabulka 15: Výšky jednotlivých částí objektu

Dle výše zmíněných údajů je vidět, že se jedná o velmi zajímavý objekt jak z hlediska rozlehlosti, tak i z hlediska výškových rozdílů. Mimo tyto podklady je důležité si popsat i další parametry důležité zejména pro hodnocení rizik při zásahu do stavby nebo jejího blízkého okolí. Ve školním roce 2017/2018 existovalo ve škole celkem 25 školních tříd, kde 15 z nich bylo na prvním stupni, zbylých 10 na druhém stupni. První dvě třídy na prvním stupni jsou umístěny mimo tento školní areál, tudíž školu tvoří 23 tříd, což činí celkem 611 žáků. Pro znázornění výskytu osob v objektu je ještě nutné přičíst k tomuto číslu počet zaměstnanců školy a to jak pedagogických, tak ostatních. Všech těchto zaměstnanců je celkem 87. V mateřské škole je zaměstnáno dalších 10 pracovníků a navštěvuje ji asi 55 dětí. V součtu je to celkem 763 vyskytujících se osob v objektech v průběhu školního roku. [21] Další částí práce je představení nároků na ochranu těchto budov dle současné normy. [3]

### Požadavky na ochranu

Norma definuje požadavky na ochranu, ať už pro objekty dle jejich typického využití, tak se dá i pro konkrétní objekt určit hodnota určitého rizika. Pro snížení těchto rizik se pak musí použít taková hladina ochrany, aby hodnotu rizika snížila do určené tolerance. Jelikož se v této práci jedná o velmi specifický objekt, dá se nalézt obecně udávaná hladina ochrany. Stejně tak se dá hladina určit výpočtem rizik. Problematice rizik se věnuje samostatná část normy s názvem *Řízení rizik* (2. Část normy [9]).



Škola patří do specifické kategorie objektů, kde mimo klasických materiálních škod, jako je porucha elektroinstalace, případný požár a s ním i samotné škody po zásahu bleskovým výbojem, existují i další specifické škody. Pro školy a další specifické objekty v dané kategorii popisuje tyto škody norma následovně.

Divadlo Hotel <b>Škola</b> Obchodní dům Sportovní areál	Poškození elektrických instalací (například elektrického osvětlení), které může způsobit paniku. Porucha požární signalizace, která vede k opožděným požárním opatřením.
---	--

Tabulka 16: Škody pro objekty se specifickým využitím [10]

Můžeme vyzorovat, že navíc oproti běžným škodám zde hraje roli velký počet vyskytujících se osob v budově a možný vznik paniky v případě krizové situace. Jinak jsou škody víceméně podobné běžné stavbě. Pokud se podíváme, jaká třída LPS je pro daný objekt vhodná, v literatuře se škola obecně zařazuje mezi objekty se zvýšeným výskytem lidí, jako jsou obchodní domy a kulturní místa (kina, divadla, katedrály). Školy se dle následující tabulky zařazují do II. třídy ochrany LPS, to určuje parametry, jaké se mají použít na návrh a samotnou realizaci stavby, dále také na revizní činnost. Další rozdělení objektů můžeme vidět v následující tabulce.

Třída LPS	Příklady typických objektů
I	nemocnice, banky, stanice mobilních operátorů, vodárny, elektrárny
II	školy, obchodní centra, katedrály
III	rodinné domy a obytné domy se standardní výbavou, zemědělské objekty
IV	objekty a haly bez výskytu osob a vnitřního vybavení

Tabulka 17: Typické rozdělení ochranných tříd LPS [8]

Obecně by se škola zařadit druhé třídy LPS. Nyní nastává čas podívat se na to, jak tomu bude v případě, provedeme-li výpočet rizik dle postupu tak, jak ho určuje norma. [9] Je důležité zmínit, že celý postup určování rizik a jejich zhodnocení je poměrně dlouhý, jelikož pro určování těchto hodnot existují programy, které jsou velmi intuitivní a v souladu s normou vcelku jednoduše dokážou vše vypočítat, bude zde zmíněn jen nezbytnější úvod do problematiky. Nejprve bude důležité vyjmenovat samotná rizika, jaká se dají u staveb uvažovat. Norma celkem rozděluje 4 typy rizik. Jedná se o tato rizika:

- $R_1$ : riziko ztrát na lidských životech
- $R_2$ : riziko ztrát na veřejných službách
- $R_3$ : riziko ztrát na kulturním dědictví
- $R_4$ : riziko ztrát ekonomických hodnot

Pro určení významnosti daného rizika se používá následující postup, který definuje norma:

1. Identifikovat chráněnou stavbu.
2. Určit typy ztrát příslušných ke stavbě.
3. Pro každý typ ztrát určit přípustné riziko  $R_T^1$ ; pro každý typ ztrát určit a vypočítat všechny odpovídající součásti rizika  $R_X^2$ .
4. Sečíst všechny části  $R_X$ .
5. Porovnat hodnoty  $R_X$  a  $R_T$ .
  - a) Pokud  $R_X > R_T$  je nutné nainstalovat odpovídající ochranná opatření pro snížení hodnoty  $R_X$ .

<sup>1</sup> **Přípustné riziko** (*tolerable risk*)  $R_T$  maximální hodnota rizika, kterou lze připustit pro chráněnou stavbu

<sup>2</sup> Rizika pro jednotlivé typy ztrát,  $R_1, R_2, R_3, R_4$ . [9]



Pokud  $R_X < R_T$  je stavba chráněna.

Velikost každého z těchto rizik se skládá z určitých dílčích rizik, každé z dílčích rizik se určuje podle následující rovnice:

$$R_X = N_X * P_X * L_X ,$$

kde je,  $N_X$  počet nebezpečných událostí za rok,

$P_X$  pravděpodobnost poškození stavby,

$L_X$  následné ztráty.

Velikost hodnoty  $N_X$  se určuje z izokeraunické mapy, jak je zmíněno v úvodu práce, parametry  $P_X$  a  $L_X$  vychází z vlastností daného objektu a hodnoty a postupy k jejich určení jsou v normě. Jejich velikosti jsou dány určitými příčinami, ty jsou vyjmenovány v následující tabulce. [9], [18]

Příčina poškození	Typ možných ztrát	Škody
úder do stavby	ztráty na lidských životech	úraz živých bytostí elektrickým proudem
úder v blízkosti stavby	ztráty na veřejných službách	hmotná škoda
úder do vedení	ztráty na kulturním dědictví	porucha elektrických a elektronických systémů
úder v blízkosti vedení	ztráty ekonomických hodnot	

Tabulka 18: Příčiny ztrát, jejich typy a možné škody s nimi spojené [9]

V následující tabulce jsou představena dílčí rizika a také jejich možné kombinace pro 4 výše zmíněná rizika ( $R_1, R_2, R_3, R_4$ ).

Typ úderu	Dílčí riziko	Popis rizika
Do stavby	$R_A$	úrazy živých bytostí způsobeny elektrickým proudem, v důsledku dotykových nebo krokových napětí ve stavbě a mimo stavbu, ve vzdálenosti až 3 m od svodu
	$R_B$	hmotné škody způsobené nebezpečným jiskřením uvnitř stavby, které způsobuje možný požár nebo výbuch
	$R_C$	porucha vnitřních systémů způsobená LEMP
Do blízkosti stavby	$R_M$	porucha vnitřních systémů způsobená LEMP
Do vedení	$R_U$	úrazy živých bytostí způsobeny elektrickým proudem, v důsledku dotykových nebo krokových napětí ve stavbě, jejichž příčinou jsou proudy injektované do vedení vstupující do stavby
	$R_V$	hmotné škody způsobené bleskovým proudem přeneseným přes nebo podél vstupujícího vedení
	$R_W$	porucha vnitřních systémů způsobená indukovaným přepětím vedení vstupujících do stavby
Do blízkosti vedení	$R_Z$	porucha vnitřních systémů způsobená přepětím indukovaným do vstupních a přenesených vedení do stavby

Tabulka 19: Dílčí rizika [9]

Rizika  $R_1$  až  $R_4$  se pak skládají z následujících kombinací dílčích rizik:

Pro riziko ztrát na lidských životech  $R_1$  platí:  $R_1 = R_A + R_B + R_C + R_M + R_U + R_V + R_W + R_Z$

Pro riziko ztrát na veřejných službách  $R_2$  platí:  $R_2 = R_B + R_C + R_M + R_V + R_W + R_Z$

Pro riziko ztrát na kulturním dědictví  $R_3$  platí:  $R_3=R_B+R_V$

Pro riziko ztrát ekonomických hodnot  $R_4$  platí:  $R_4=R_A+R_B+R_C+R_M+R_U+R_V+R_W+R_Z$  [9]

V následující tabulce můžeme vidět, jaké hodnoty se uvádějí v normě jako zlomové pro případy, kdy rizika určená pro objekt přesáhnou tyto hodnoty, je nutné aplikovat ochranná opatření pro zmírnění těchto možných ztrát.

Typy ztrát		$R_T (y^{-1})$
L1	Ztráty na lidských životech nebo trvalé následky úrazů	$10^{-5}$
L2	Ztráta na veřejné služby	$10^{-3}$
L3	Ztráta kulturního dědictví	$10^{-4}$
L4*	Pro ztráty ekonomické hodnoty L4 existuje postup, který je nutné sledovat, je dán porovnáním nákladů s přínosem. Princip bude uveden v kapitole 6, kde se věnujeme ekonomickým aspektům ochran.	

Tabulka 20: Přípustné hodnoty rizik [9]

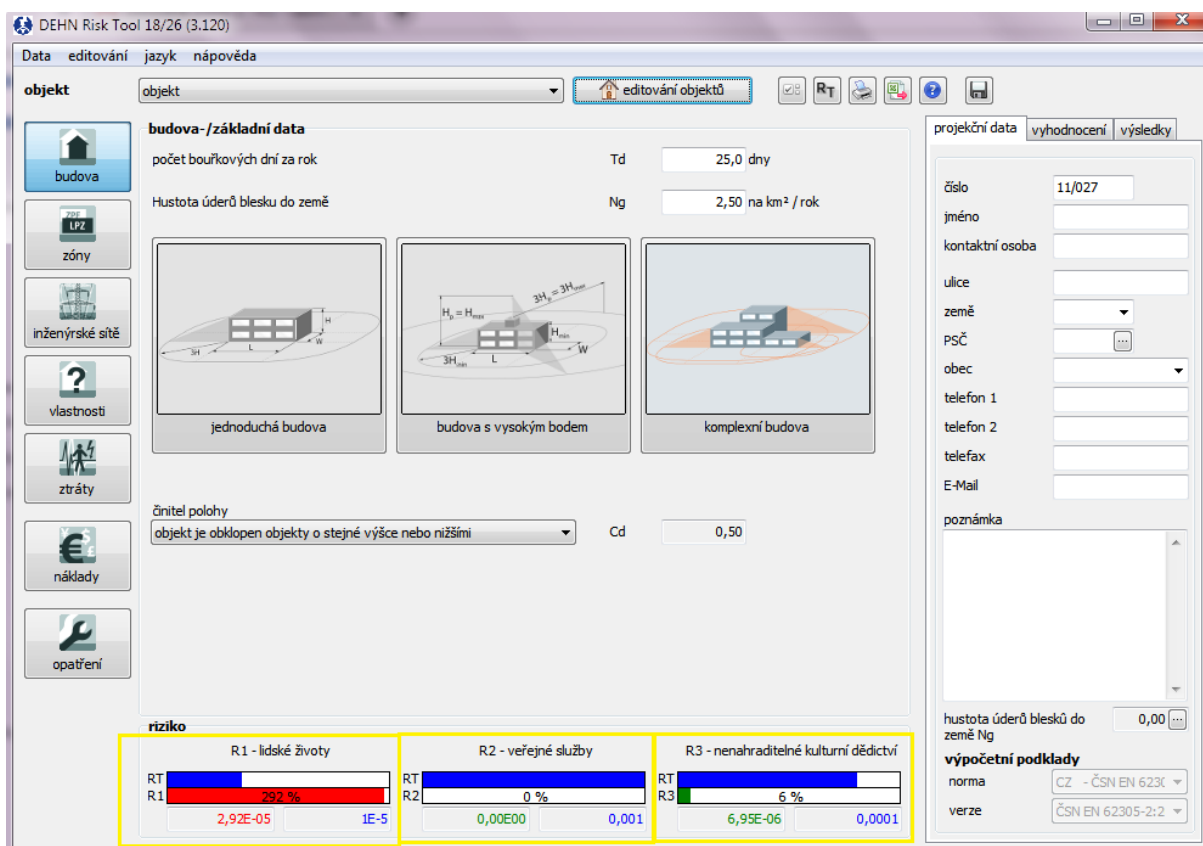
Můžeme si všimnout, že pro ekonomické ztráty není určena žádná mezní hodnota, ale musí se pro každý objekt provést samostatný výpočet. Tento výpočet je popsán v kapitole zabývající se ekonomickými aspekty ochran.

V této části je snaha o opravdu co největší zestručnění problematiky. Přesto je vidět, že je zde uvedeno a definováno hned několik specifických parametrů. Jelikož, jak bylo zmíněno, existují programy pro výpočet rizik v souladu s normou, je jejich výpočet zjednodušen a proveden přes jeden z těchto programů. Programů existuje několik, zpravidla je vytvářejí firmy zabývající se hromosvodní technikou, jak výrobou materiálů, tak i samotných návrhů ochran a jejich realizací. V této práci je použit program *DEHNSupport*. Tento program nabízí intuitivní prostředí, kde i parametry, které člověk přesně nezná, dokáže podle popisu poměrně snadno určit. V následující tabulce jsou ukázány některé parametry, které se do programu zadávají.

<b>Okolí</b>	objekt obklopen objekty o stejné výšce nebo nižšími
<b>Bouřková aktivita</b>	25 dnů v roce
<b>Vedení</b>	celkem 2, 1x elektrické, 1x telekomunikační, vše kabelové
<b>Speciální rizika</b>	obvyklé riziko požáru pro nemocnice, hotely, školy, veřejné budovy
<b>Speciální rizika</b>	průměrná úroveň paniky
<b>Počet osob</b>	764 osob
<b>Čas osob v objektu</b>	2 000 h/rok

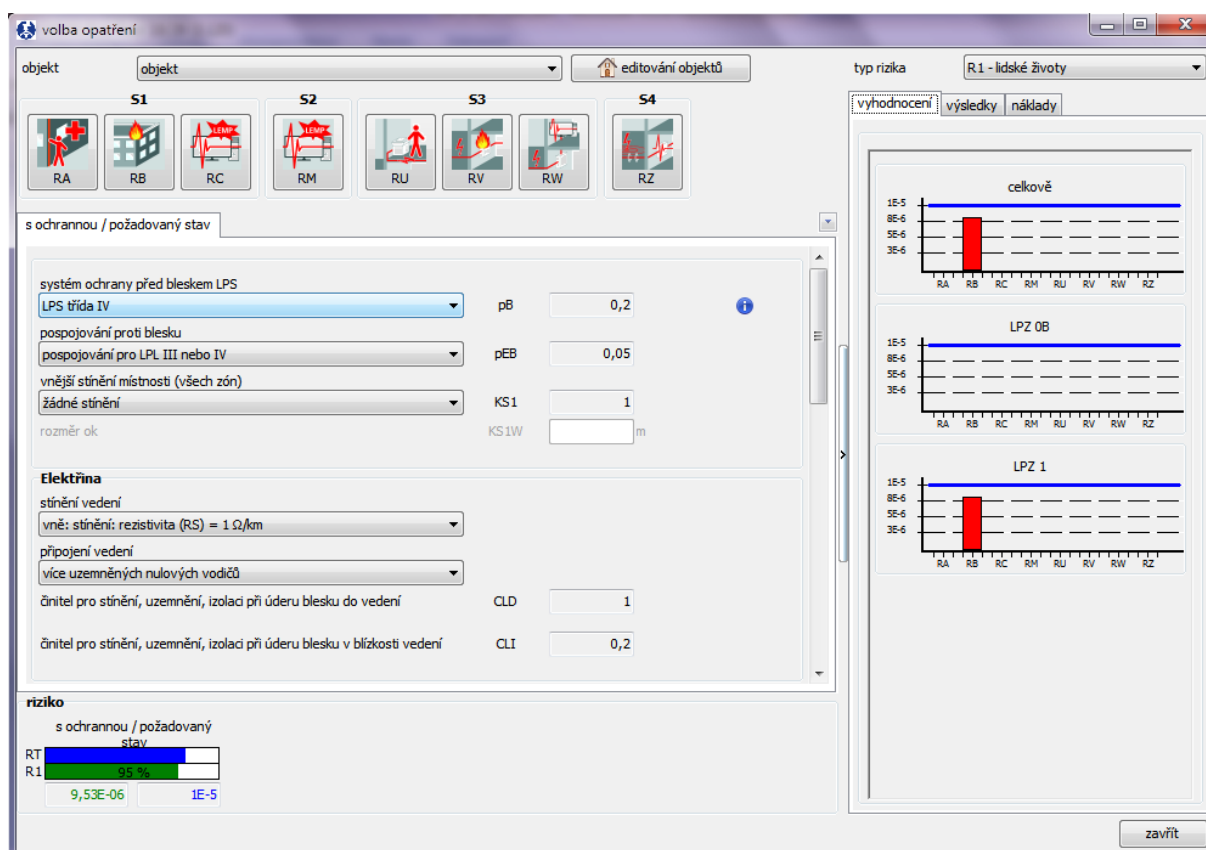
Tabulka 21: Parametry pro výpočet rizik pro daný objekt

Na dalším obrázku je pracovní prostředí tohoto programu, kde můžeme vidět několik vstupů, které se do programu zadávají.



Obrázek 23: Vypočtené hodnoty rizik, výstup z programu DEHNsupport

Ve spodní části obrázku můžeme pozorovat, jak vycházejí jednotlivá rizika. Můžeme vidět, že jediné riziko, které přesahuje hodnotu, při které se musí objekt chránit, je riziko ztrát na lidských životech. Dle výstupu programu dosahuje 292 % mezní hodnoty z normy. Zbylá dvě rizika zůstávají v toleranci (v obrázku zelená barva). Celý tento postup byl z důvodu ověření zjištění jaká třída ochrany je pro tento objekt nutná. Program nabízí ověření si, jak se hodnoty rizik mění při použití jednotlivých tříd ochranných opatření. Na následujícím obrázku můžeme vidět, jak se riziko posunula při použití nejzákladnější ochrany, IV. třídy LPS.



Obrázek 24: Hodnota rizika po aplikování ochrany, výstup z programu DEHNSupport

V obrázku můžeme pozorovat, jak se hodnota rizika ztrát na lidských životech posunula do hodnot, kdy už není žádná dodatečná ochrana nutná (95 % mezní hodnoty). V této části práce tedy bylo vyvráceno, že pro objekt školy je vhodné použití ochrany II. třídy LPS, nepotvrdilo se tak obecné zařazení škol do dané kategorie. Ukázalo se, že pro správný návrh ochrany je nutné provést výpočet rizik pro každý objekt, nehledě na obecné výsledky, neboť každý objekt je specifický a mohou se u něj projevit různé vlastnosti. Nyní nastává čas zabývat se návrhem samotných způsobů ochrany a zvážení jejich vhodnosti.

Mimo samotných nároků na jímací soustavu je nutné, aby normu splňovaly i ostatní části ochranné soustavy. To znamená správné provedení uzemnění a dostatek svodů. V práci se budeme hlavně zabývat jímací soustavou a soustavou svodů, u uzemňovací soustavy provedeme zjednodušení a budeme předpokládat, že je vždy provedena dle daných potřeb. Stejně tak budeme předpokládat, že je provedeno ekvipotenciální pospojování i další dílčí prvky, které jsou nedílnou součástí správné ochrany. Počet svodů se určuje hlavně podle jejich vzdálenosti mezi sebou, dle následující tabulky.

Třída LPS	Obvyklé vzdálenosti [m]
I	10
II	10
III	15
IV	20

Tabulka 22: Obvyklé vzdálenosti svodů [3]

## 5.1 Návrh dle normy (GN Hromosvody)

V tomto případě použijeme návrh od firmy zabývající se problematikou ochrany před úderem bleskového výboje profesionálně, bude se jednat o vhodný příklad řešení ochrany pro další porovnání v této práci. Návrh a následný finanční rozpočet na realizaci ochrany provedla firma GN Hromosvody.

Je nutné zmínit, že se nejedná o úplně přesný návrh, pro ten by byla nutná celková projektová dokumentace k objektu, ta nebyla při tvorbě práce k dispozici. Proto není návrh pravděpodobně 100% takový, jaký by byl v praxi, ale pro účely této práce je dostačující.

Pro návrh ochrany na objekt se prakticky používá kombinace všech výše jmenovaných metod. Nejprve se provede analýza pomocí metody valivé koule. Tou se určí všechna místa, kde hrozí riziko zásahu bleskovým výbojem. Po této prvotní analýze se na vhodná místa rozmístí jímací tyče. Na základě prostoru, které tyto jímací tyče, dle metody ochranného úhlu vymezují, se ochranný systém doplní o mřížovou soustavu, nebo dodatečné jímací tyče. [30] Až takový návrh ochrany je kompletní, eliminují se v něm všechny části objektu, které by mohly být zasaženy. Norma také udává jaká místa přednostně chránit. Jedná se o vyvýšené body budov a jejich rohy. Ve výsledku návrhu jsou převážně na rozích dílčích částí objektu umístěny jímací tyče o výšce 1 m a 2 m. Dle předpisu metody ochranného úhlu pak lze pro každou hladinu výšky určit prostor, který tyto jímací tyče pokryjí a zbytek prostoru se zabezpečí pomocí mřížové metody. U mřížové metody je to o něco jednodušší, norma určuje velikost ok 20x20 m pro IV. třídu LPS. Pro metodu ochranného úhlu je nutné určit výseč, kterou jednotlivé jímací tyče ochrání. V následující tabulce můžeme vidět, jaký je pro danou výšku použit dle normy ochranný úhel a jaký prostor jeden metr vysoký jímač ochrání. Je vždy použita výška určité části budovy plus jeden metr (jímač).

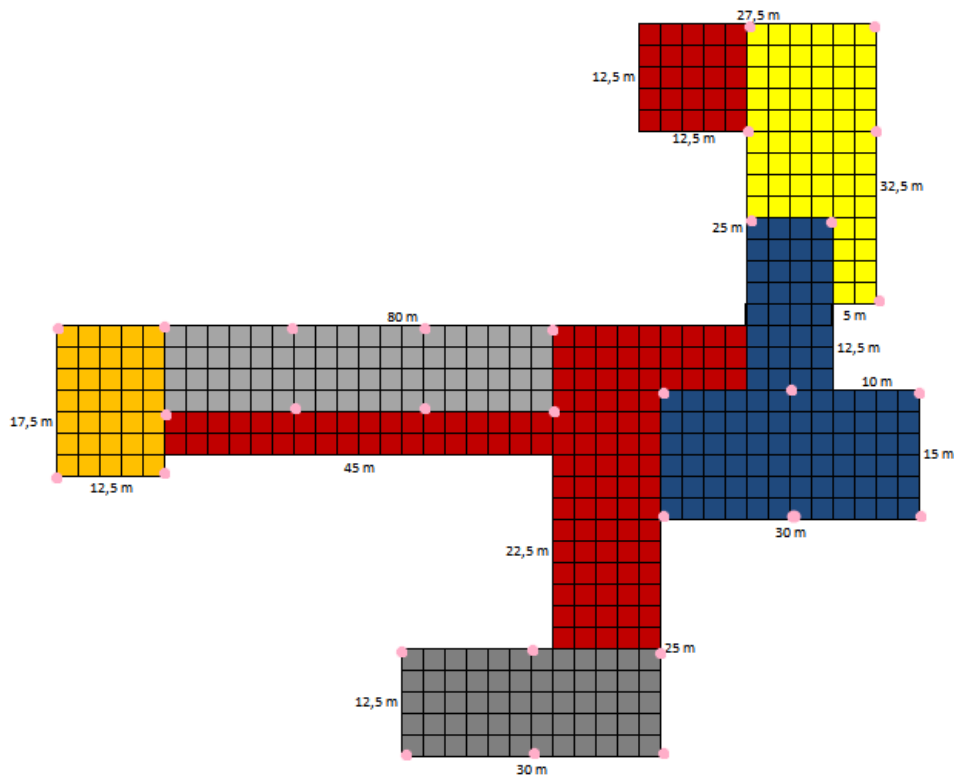
Výška [m]	Úhel IV. třída LPS [°] v dané výšce	Ochrana 1 m [m] (tangens úhlu)	Ochrana v 5 m [m]	Ochrana v 7 m [m]	Ochrana v 22 m [m]
26	48	1,11		21,01	4,4
23	51	1,23	22,1		
16	53	1,32		11,9	
11	64	2,05			
8	67	2,36			
6	68	2,48			

Tabulka 23: Vymezení ochranného prostoru jímací tyčí v různých výškách objektu, dle metody ochranného úhlu

Poloměr chráněného kruhu, který jímací tyč vymezuje, se z obrázku 10 normy vyjádří do následujícího vztahu.

$$r_{\text{chráněného prostoru}} = \text{tangens}(\text{vrcholový úhel}) * \text{výška} \quad [3]$$

V tabulce č. 23 můžeme vidět ve třetím sloupci, že 1 metr vysoká jímací tyč na vyšších objektech moc velkou oblast nepokryje. Pro nižší stavby je to už zajímavější. Ve 4. až 6. sloupci bylo pro sousedící stavby, kde je rozdíl výšek budov poměrně velký, vypočteno jakou oblast (s jakým poloměrem) pokryje jímací tyč umístěná na vyšší budově na sousední nižší budově. Jímací tyče umístěné na vyšších budovách ochrání poměrně velký prostor na nižších sousedních budovách. Na následujícím obrázku můžeme vidět, jak jsou na objektu rozmístěny jímací tyče, ty jsou označeny růžovou barvou. Svody a vodiče mřížová soustava nejsou na obrázku značeny, jejich přesné umístění není k dispozici. Jsou však součástí finanční kalkulace, což je pro tuto práci klíčové. Svody jsou dle normy rozmístěny po 20 metrových intervalech podél objektu, mřížová soustava s maximálním dovoleným okem 20 x 20 metrů.



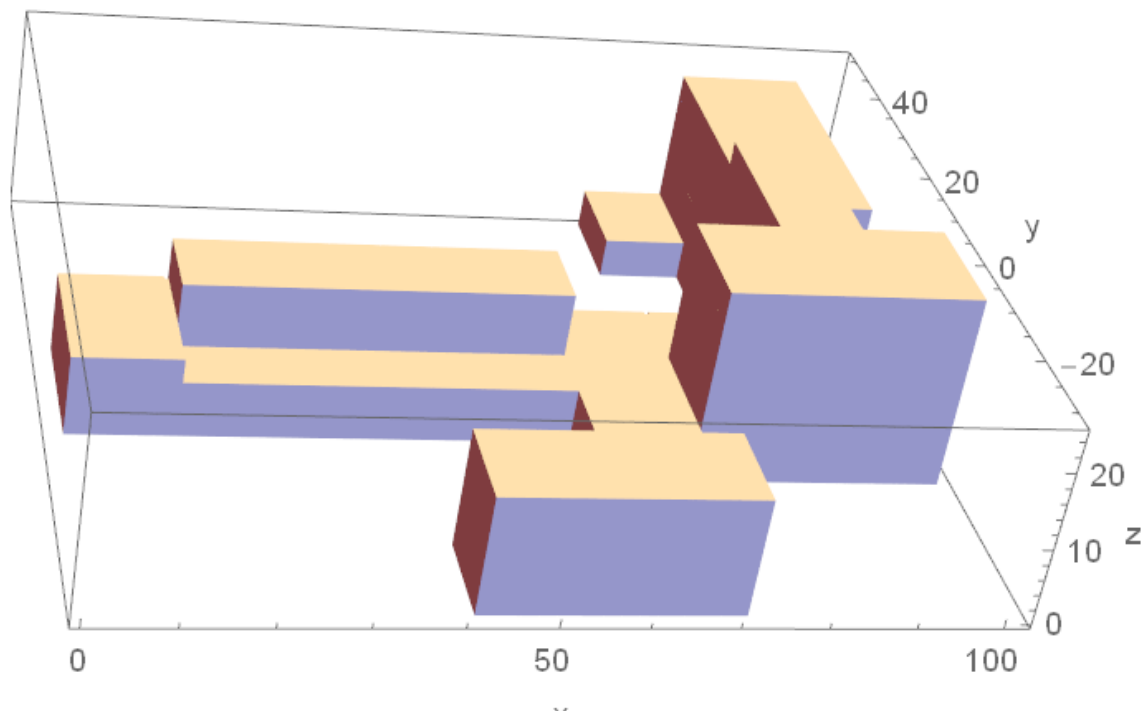
Obrázek 25: Rozmístění jímacích tyčí na objektu

Ochranné řešení se celkem skládá z **30 jímacích tyčí 1 m vysokých**. Dále se používá **790 metrů vodiče**. Dohromady je sečtena délka vodičů pro mřížovou soustavu a soustavu svodů. Objekt má obvod téměř 400 m, pro tento rozměr a pro tuto třídu odpovídá použití **20 svodů**. Na ochranu je použito ještě další velké množství materiálu, jsou to spojovací svorky, podpěry a další materiál. Zde jsou vyjmenovávány nejzajímavější položky z hlediska návrhu ochran. Dle ocenění firmou by toto řešení stálo celkem **176 822 Kč**, pokud by bylo provedeno ze slitiny hliníku. Cena je za všechny náležitosti, jako jsou projekt, realizace, materiál, technická dokumentace a revize po provedení stavby. [29]

## 5.2 Optimalizační

Nyní použijeme stěžejní řešení pro celou práci a uvidíme, jak se tento statistický přístup projeví v optimalizaci celého ochranného řešení. Výsledkem by mělo být zejména snížení množství použitého materiálu a s tím i spojené možné finanční úspory. V této části budou brány v potaz dvě možné optimalizační řešení označená A a B.

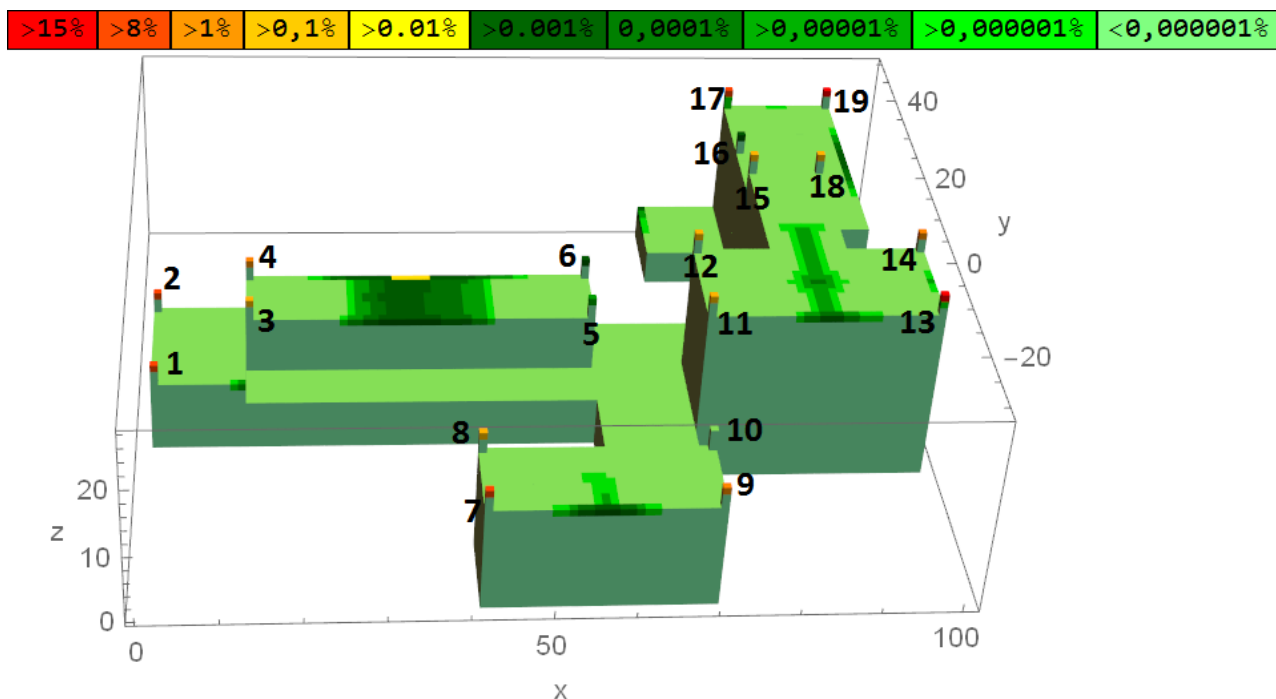
Pro začátek je nutné převést objekt do programu *Mathematica*, aby bylo možné provést matematickou simulaci. Jelikož program umožňuje vložení pouze objektů ve tvaru kvádrů, je nutné posuzovaný objekt v této práci rozdělit ještě na další dílčí části. Celkem je objekt rozložen na 11 dílčích částí, všechny části jsou tvořeny krychlemi o straně jednoho metru. Po vložení do programu vypadá objekt následovně (obrázek č. 26).



Obrázek 26: Zkoumaný objekt v programu *Mathematica*

#### Řešení A

Nyní stačí pro tento objekt spustit tu část programu, která vytvoří pro každou z dílčích částí okolní prostor (vzduch) a pro povrch celého objektu určí pravděpodobnost zásahu bleskovým výbojem pro každý jeho bod. Neboť výpočet těchto pravděpodobností je poměrně časově náročný, bude proveden jen jeden výpočet pro celý objekt již s umístěnými jímacími tyčemi. Ty budou umístěny na vhodná místa. Pro jejich umístění se vycházelo z charakteru objektu dle návrhu pomocí metody ochranného úhlu. Jímacích tyčí je na objektu umístěno celkem 19, každá z nich má výšku tři metry. Tyče jsou v obrázku č. 27 označeny černými čísly. Po prozkoumání pravděpodobnostních výsledků bude zřejmé, kolik procent možných zásahů bleskových výbojů pokryje původní návrh jímací soustavy, jestli tento návrh bude dostačující nebo bude nutné dodat nějaké následné opatření, jako je přidat další jímací tyče, nebo umístit část mřížové soustavy. V obrázku č. 27 můžeme pozorovat, jak pro daný objekt vyšlo pravděpodobnostní rozdělení zásahu do budovy, včetně vyznačení a očíslování předem vložených jímacích tyčí. V obrázku č. 27 jsou pravděpodobnosti znázorněny pomocí barevné škály.



Obrázek 27: Výpočet pravděpodobností pro objekt s umístěnými jímacími tyčemi

Ze zbarvení je zřejmé, že jímací tyče by pochytily větší část zásahů než ostatní části stavby. Pro podrobné popsání je nutné porovnat jejich přesné hodnoty. Ty jsou včetně souřadnic jednotlivých jímacích tyčí znázorněny v následující tabulce.

Jímací tyč číslo	Souřadnice	Pravděpodobnost [%]
1	{1,1,10}	9,88
2	{1,17,10}	9,72
3	{13,8,15}	0,84
4	{13,17,15}	6,41
5	{57,8,15}	0,00
6	{57,17,15}	0,01
7	{41,-31,15}	12,27
8	{41,-20,15}	0,47
9	{69,-31,15}	7,97
10	{69,-20,15}	0,00
11	{70,-6,25}	0,75
12	{70,8,25}	0,55
13	{99,-6,22}	15,02
14	{99,8,25}	4,41
15	{80,27,25}	0,39
16	{80,37,22}	0,00
17	{80,49,22}	14,37
18	{89,27,25}	0,19
19	{94,49,22}	16,57
<b>Celková pravděpodobnost</b>		<b>99,82</b>

Tabulka 24: Pravděpodobnost zásahu bleskového výboje pokrytá jímacími tyčemi



V tabulce č. 24 můžeme pozorovat, že všechny jímací tyče dohromady poberou téměř 100 % pravděpodobnosti zásahu, konkrétně 99,82 %. To je pro požadovaných 84 % (viz tabulka č. 5) pro IV. třídu ochrany LPS dostačující. Dokonce toto číslo převyšuje hodnotu 99 %, která je stanovena pro nejlepší možnou ochranou I. třídu. Můžeme vidět, že některé jímací tyče nejsou moc efektivní, zejména 5, 6, 10 a 16. Tři z těchto tyčí se nevešly do 100 bodů s největší pravděpodobností zásahu, které byly analyzovány. Nejmenší hodnota pravděpodobnosti, která byla z výsledků programu získána je  $9,9 \cdot 10^{-6}$ , tyto tři jímací tyče mají menší hodnotu pravděpodobnosti než je tato hodnota. Tato skutečnost je dána umístěním jímacích tyčí vzhledem k uspořádání částí budov, nacházejí se „uvnitř“ objektu. Na druhou stranu je z obecného pohledu vhodné tyto rohy, vyvýšené místa chránit. Pro navrhované řešení, ale tyto jímací tyče nebudou součástí ochranného řešení.

U takto optimalizovaného řešení vstupuje problém s volbou materiálu na ochranu. S použitím menšího množství materiálu rostou nároky na kvalitu použitého materiálu. Neuvažuje se rozdělení proudů jako při konvekčním návrhu, a tak se uvažují větší hodnoty parametrů bleskových výbojů. Těmito parametry je samotný procházející proud, specifická energie. S těmito parametry jsou spjaté výše v práci vyjmenované účinky na části ochrany. V tomto případě se dají použít materiály a jejich průřezy, jak je definuje norma. Hlavní problém se ukazuje s **dostatečnou vzdáleností  $s$** , kde její dodržení slouží k elektrické izolaci částí jímací soustavy a soustavy svodů od kovových (vodivých) částí budovy. Dostatečnou vzdálenost norma [10] definuje jako vzdálenost dvou částí, mezi nimiž může vzniknout nebezpečné jiskření. Nebezpečné jiskření je výboj způsobený bleskovým výbojem, který způsobí hmotné škody na chráněné stavbě. Zjednodušeně se dostatečná vzdálenost určí dle následujícího vzorce. Pro účely této práce je tento vzorec vhodný.

$$s = \frac{k_i}{k_m} * k_c * l,$$

kde je  $k_i$  koeficient závislý na zvolené třídě LPS,

$k_m$  koeficient závislý na materiálu elektrické izolace,

$k_c$  koeficient závislý na (částečném) bleskovém proudu tekoucím jímači a svody,

$l$  délka v metrech, podél jímací soustavy a svodu od bodu, kde je zjišťována dostatečná vzdálenost, k nejbližšímu bodu ekvipotenciálního pospojování nebo zemnicí soustavy. [10]

Hodnoty koeficientů se určí z následující tabulky.

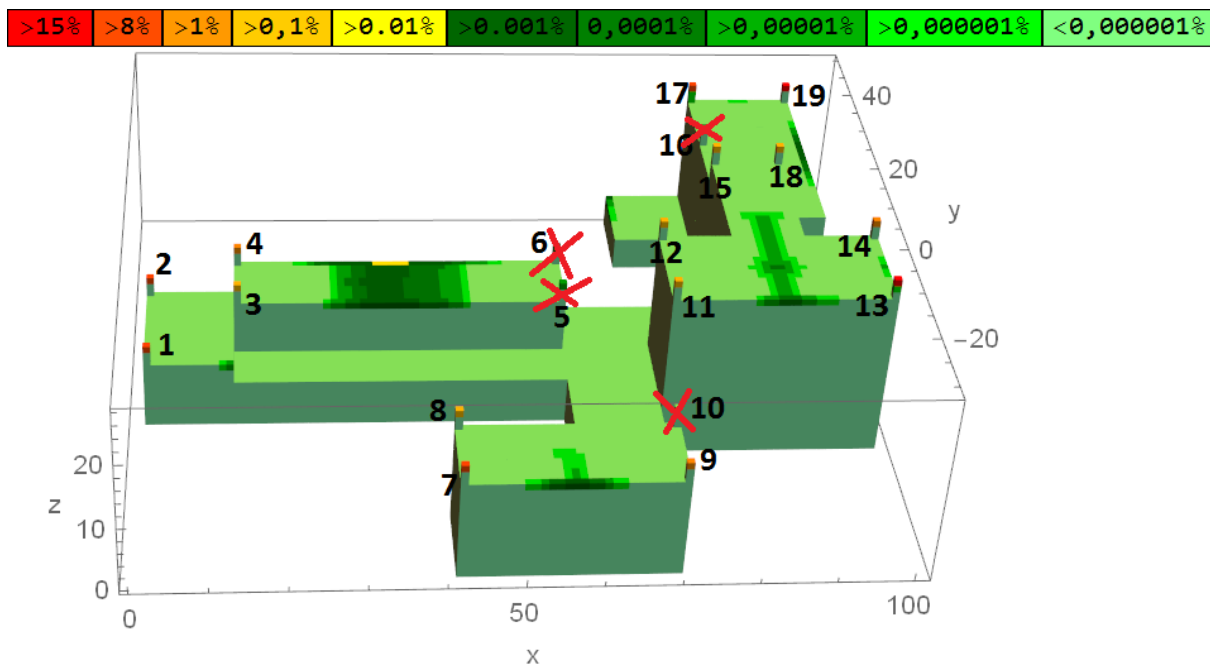
Třída LPS	$k_i$	Počet svodů $n$	$k_c$	Materiál	$k_m$
I	0,08	1 (pouze v případě izolovaného LPS)	1	Vzduch	1
II	0,06	dva	0,66	Beton, cihla, dřevo	0,5
III a IV	0,04	tři a více	0,44		

Tabulka 25: Koeficienty pro výpočet dostatečné vzdálenosti [10]

V případě, že bychom uvažovali pro řešení 15 jímacích tyčí osamocené svody, museli bychom použít speciální oddálené jímací tyče a izolované vodiče, které několikanásobně převyšují cenu běžných tyčí. Pro tuto variantu použití 15 jímacích tyčí není použití těchto speciálních jímacích tyčí vhodné a z ekonomického hlediska by vyšlo velmi neefektivně. Při spojení například dvou sousedících jímacích tyčí by hodnota dostatečné vzdálenosti dosahovala velkých hodnot a základní materiál by stejně nešel použít. Hodnota dostatečné vzdálenosti by se pohybovala od 1,5 m pro nejvyšší části budovy k 0,4 m pro nejnižší části budov. Proto je vhodné nalézt jiné řešení.

Řešení, které se pro tuto variantu A nabízí, je jako v případě návrhu z normy [3], [10], pospojovat mezi sebou jednotlivé jímací tyče a snížit tak požadavky na dostatečnou vzdálenost u jednotlivých svodů. Ve výsledku se použije stejné množství svodů a materiálu na pospojování jednotlivých

jímácích tyčí mřížovou soustavou. Jediný rozdíl, který bude v tomto návrh od návrhu dle normy, tak bude jen použití 15 jímácích tyčí na místo 30. Ostatní použitý materiál bude stejný. Oproti návrhu dle normy se uvažují jímače o výšce 3 metrů na místo 1 metru, tudíž úspora nemusí být žádná. Pokud porovnáme výslednou cenu ochrany, vychází toto výsledné řešení jen **o 3 676 Kč levnější**. To není nijak výrazná úspora. Pro toto porovnání vycházím z cenové nabídky z první části této kapitoly. Celková cena tohoto optimalizačního řešení A je tedy **173 146 Kč**, opět v provedení v hliníkové slitině. Celkové řešení ochrany je naznačeno na následujícím obrázku, kde je vyobrazeno opět na 3D modelu objektu. Jsou označeny jímací tyče, které oproti prvotnímu návrhu ochrany, nejsou použity. [29]



Obrázek 28: Odstranění neefektivních jímacích tyčí

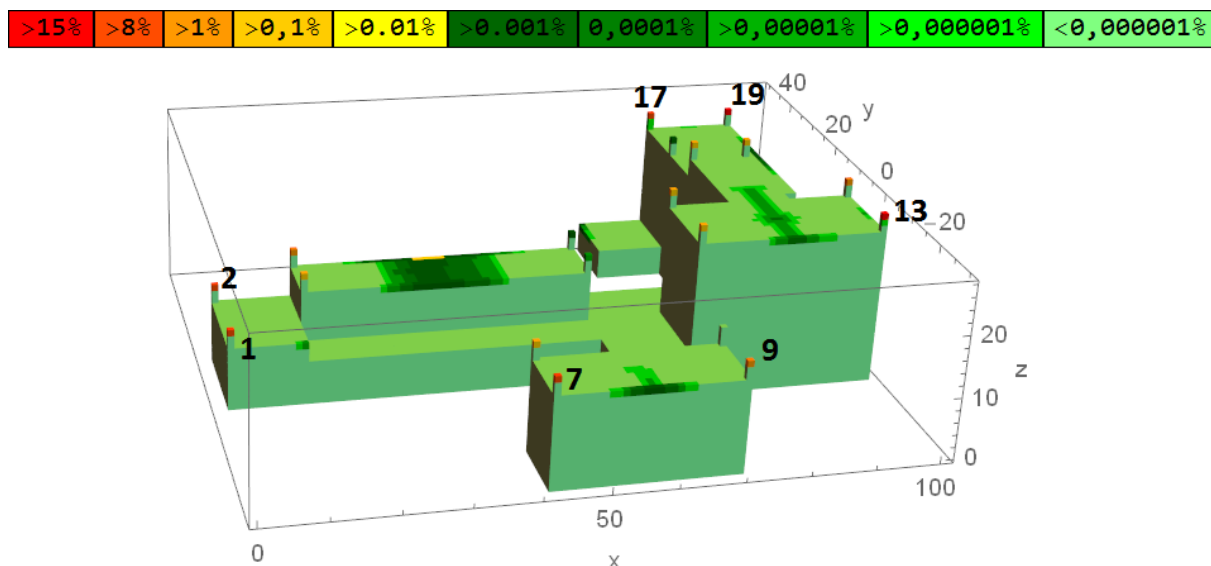
### Řešení B

Dle výsledků řízení rizik je pro daný objekt dostačující použít ochranu třídy LPS IV. Je nutné pokrytí 80 % pravděpodobnosti zásahu. V této části práce je navržen ještě jeden optimalizační způsob ochrany. Bude se jednat o takový návrh, aby bylo použito co nejméně jímacích tyčí za splnění překročení požadované hranice 84 %. Požadovaných 84 % bude získáno postupným zahrnováním jímacích tyčí s největší pravděpodobností do ochranného systému, dokud nebude překročena daná hranice. V následující tabulce jsou vypsány jímací tyče, které postačí k překročení 84 %.

Jímací tyč číslo	Souřadnice	Pravděpodobnost [%]
1	{1,1,10}	9,88
2	{1,17,10}	9,72
7	{41,-31,15}	12,27
9	{69,-31,15}	7,97
13	{99,-6,22}	15,02
17	{80,49,22}	14,37
19	{94,49,22}	16,57
<b>Celková pravděpodobnost</b>		<b>85,80</b>

Tabulka 26: Výčet 7 nejefektivnějších jímacích tyčí

Je vidět, že postačí použití pouze 7 jímacích tyčí, které jsou rozmístěny různorodě po objektu. Požadovaná hodnota je dokonce překročena o skoro 2 %, což je dáno tím, že byly použity nejefektivnější jímací tyče z celého objektu. Dojde i k velkému snížení množství použitého materiálu. Na následujícím obrázku je zvýrazněno těchto 7 vybraných jímacích tyčí s jejich původním číslováním z prvotního návrhu. Ostatní jímací tyče budou zanedbány a nebude se s nimi dále počítat.



Obrázek 29: Návrh se 7mi jímacími tyčemi

Můžeme pozorovat, že se jedná o jímací tyče, které leží v krajních bodech dílčích budov, ale na takových částech objektu, že jsou současně na samotných krajních bodech celého objektu. Na krajních rozích je z principu velká pravděpodobnost zásahu. Na toto řešení bude použito **7 jímacích tyčí o výšce 3 metrů, 7 svodů**. Nebude se jednat o použití běžného materiálu, ale pro dodržení dostatečné vzdálenosti v okolí jímacích tyčí a svodů, bude nutné použít speciální jímací tyče a izolované vodiče na svody. Řešením je použití prvků z řady izolovaných vodičů HVI©(High voltage isolated) a speciálních oddálených jímacích tyčí od firmy DEHN. Tato speciální řada výrobků umožňuje instalaci ochranných systémů pro speciální aplikace, případně na stavby se speciálními prvky na střeše.

Hned při úvodním pohledu do produktových prospektů HVI vodičů nastává problém. Vodič HVI se dá použít jako jediný svod jen v případě, kdy jeho délka nepřesáhne 22,5 m. Tato délka v našem případě bude u dvou výšek objektů přesáhnutá. Pro nejvýše umístěnou jímací tyč, ve výšce 25 metrů je nutné realizovat další svod. Dvě jímací tyče na částí objektu s výškou 22 metrů se mezi sebou musí propojit dodatečným vodičem. V následující tabulce jsou uvedeny řady HVI vodičů a jejich parametry. [31], [32]

Řada výrobků	s pro vzduch [cm]	s pro pevný materiál [cm]
HVI light	≤ 45	≤ 90
HVI long	≤ 75	≤ 150
HVI power	≤ 90	≤ 180

Tabulka 27: Vlastnosti vodičů HVI [31], [32]

Jímací tyče pro tento návrh jsou umístěny ve 4 různých výškách. Pro každou z nich je nyní nutné určit, jaký požadavek na dostatečnou vzdálenost bude nutné splnit. V našem případě to je poměrně jednoduché. Pro každou jímací tyč zvlášť je nyní nutné spočítat dostatečnou vzdálenost, výšku tyče uvažujeme vždy 3 metry, celková hodnota délky  $l$  bude tedy výška konkrétní budovy plus 3 metry.

V následující tabulce je proveden výpočet pro dostatečnou vzdálenost, kde se uvažuje koeficient pro jeden nebo dva svody, IV. třídu LPS a izolační materiál vzduch. Dostatečné vzdálenosti pak vycházejí následovně.

Koeficient	Hodnota	Výška / [m]	s [m]
$k_i$	0,04	28	0,74
$k_c$ (1 svod)	1	25	0,66
$k_c$ (2 svody)	0,66	18	0,72
$k_m$	1	13	0,52

Tabulka 28: Výpočet dostatečné vzdálenosti 1

Celý optimalizační postup v této práci vychází z pravděpodobnostních dat, která jsou prezentována v normě. Zde v práci jsou uvedeny v tabulce č. 4. V tabulce č. 5 jsou tato data pro tuto práci dále interpretována. Dostatečná vzdálenost se tak dá zařadit do části účinnosti dimenzování komponentů LPS. Pro IV. třídu ochrany se pak dá požadovaná dostatečná vzdálenost snížit na hodnotu 95 % původní hodnoty, jak je uvedeno v tabulce č. 5. Snížené hodnoty dostatečné vzdálenosti vypadají následovně.

Koeficient	Hodnota	Výška [m]	s [m]	s*0,95 [m]
$k_i$	0,04	28	0,74	0,70
$k_c$ (1 svod)	1	25	0,66	0,63
$k_c$ (2 svody)	0,66	18	0,72	0,68
$k_m$	1	13	0,52	0,49

Tabulka 29: Výpočet dostatečné vzdálenosti 2

Dle hodnot v tabulkách č. 27 a č. 29 můžeme vidět, že v našem případě by bylo vhodné využít řadu výrobků HVI long. Pro celkové řešení ochrany uvažujeme použití celkem 8 svodů a 7 jímacích tyčí na celkem čtyřech výškových hladinách. V následující tabulce je vypočtena potřeba hlavních prvků tohoto návrhu ochrany (jímací tyče, vodič). Jedná se o prvky, které budou tvořit drtivou většinu ceny za materiál.

Výška budovy [m]	Počet jímacích tyčí	Počet svodů	Vodič na svody [m]	Celkem vodiče na svody[m]	Typ vodiče a jímacích tyčí
10	2	2	10	20	HVI long
15	2	2	15	30	HVI long
22	2	2	22	44	HVI long
25	1	2	25	50	HVI long
<b>Celkem vodiče [m]</b>			<b>159</b>		

Tabulka 30: Součet HVI materiálů

Na toto ochranné řešení se použije 7 jímacích tyčí a 159 m vodiče. V následující tabulce jsou dle ceníku produktů *Dehn*, dostupného z webové stránky [www.dehn.cz/cs](http://www.dehn.cz/cs), oceněny uvažované jímací tyče, vodič a materiál na propojení dvou jímacích tyčí na stavbě s výškou 22 m. Součástky pro ocenění těchto částí ochranného systému byly voleny dle publikací firmy *Dehn* k HVI vodičům a oddálených řešení ochran. Jedná se o publikace *Inovace ve vnější ochraně před bleskem (Izolovaný svod HVI s vysokonapětovou izolací)* a *Bezpečná ochrana budov (Systémové řešení pro oddálené jímací soustavy)*. [31], [32] Ocenění by tak mělo být poměrně přesné, ale je možné, že se při návrhu v této práci opomenula, případně přidala nějaká součástka. Ocenění jednotlivých částí vypadá následovně.

Jímací sestava	Cena	Produktový kód
Podpurná trubka a jímač	4 887 Kč	105330
Držák 2x	4 557 Kč	105344
3 metry vodiče	2 064 Kč	819135
Sada pro připojení vně	1 705 Kč	819294
Sada pro připojení uvnitř	996 Kč	819145
PA Svorka	268 Kč	410229
<b>Celkem jímací tyč připojení uvnitř</b>	<b>12 771 Kč</b>	
<b>Celkem jímací tyč připojení vně</b>	<b>13 480 Kč</b>	
Metr vodiče včetně podpěr	Cena	Produktový kód
1 m vodiče	688 Kč	819135
Podpěra po 1 m	78 Kč	275229
<b>Celkem 1 m vodiče</b>	<b>766 Kč</b>	
Spojení dvou svodů	Cena	Produktový kód
Propojovací sada	1 182 Kč	819142
Propojovací sada	1 182 Kč	819142
Podpěra 1 m	31 Kč	253015
Adaptér podpěry 1 m	19 Kč	253026
21 m vodiče	14 445 Kč	819135
<b>Celkem spojení dvou jímací tyčí</b>	<b>16 859 Kč</b>	

Tabulka 31: Ceny jednotlivých částí HVI komponentů [26]

Pokud nyní shrneme, kolik jednotlivých částí na ochranné řešení potřebujeme, získáme výdaje na materiál. V následující tabulce je shrnut materiál a jeho celková cena.

Součást	Počet	Cena	Cena celkem
Vodič [m]	159	766 Kč	121 813 Kč
Celkem Jímací tyč připojení uvnitř	5	12 771 Kč	63 856 Kč
Celkem Jímací tyč připojení vně	2	13 481 Kč	26 962 Kč
Celkem spojení dvou jímacích tyčí	1	16 859 Kč	16 859 Kč
<b>Cena na součásti celkem</b>		<b>229 489 Kč</b>	

Tabulka 32: Celková cena za HVI materiál [26]

Můžeme pozorovat, že celkové náklady za materiál činí téměř 230 tisíc Kč. Pro kompletní ochranu musíme ještě přičíst náklady na realizaci stavby a další položky. Tento propočet, jako i pro ostatní návrhy ochran, bude proveden v 7. kapitole práce. Důležité je zmínit, že jímací tyče včetně podpurných trubek dosahují větší výšky, než bylo původně plánováno v této realizaci. Namísto 3 metrů je celková délka jímacího systému dlouhá 4,2 m (3,2 m podpurná trubka a 1 m jímací tyč). Tento rozdíl je z důvodu, že řada výrobků *Dehn* HVI long, kterou je v našem případě nutné použít, nenabízí nižší řešení. Tři metrové výšky se dá dosáhnout usazením podpurné trubky níže na objektu, neboť uvažujeme uchycení jímacích tyčí na stěnu budovy. Dostatečná vzdálenost bude i v tomto případě pro samotnou jímací tyč splněna. Při volbě samostatně stojícího jímacího systému na střeše budovy, pomocí stativu, se částka za takovýto systém pohybuje asi o 10 tisíc Kč výše, než v případě připevnění na zeď. Ověření vhodnosti určité výšky jímacích tyčí bude provedeno v následující části této kapitoly.

### Ověření výsledků

Nyní nastává v práci prostor pro obecné ověření. Ověříme, jestli zvolené způsoby ochran tohoto objektu jsou správné a také jestli je zvolená výška jímacích tyčí vhodná. Co se týče rozvržení ochranných opatření na budovu, je vhodné zjistit statistický výzkum škod na objektech. Na základě

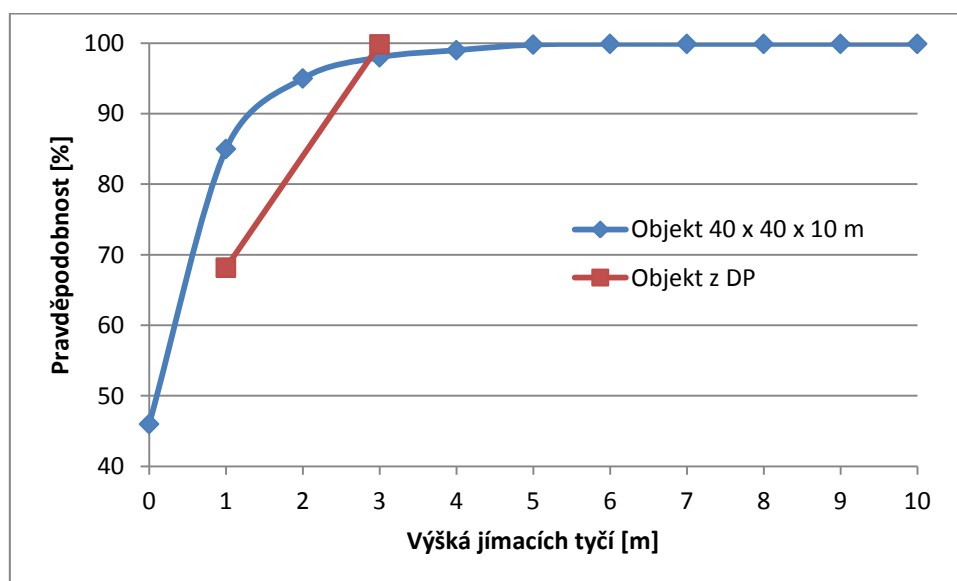
výzkumu škod a míst zásahů objektů byly určeny části objektů, kde vznikají nejčastěji škody. Data jsou uvedena v následující tabulce.

Lokace poškození bleskem	% zastoupení
(A) ostré body/vyčnívající rohy	>90
(B) horizontální/šikmé hrany	<5
(C) vertikální hrany (pod A)	<2
(D) rovinné plochy (blízko A)	<1
(E) prohnuté kouty, jiné místa	0

Tabulka 33: Procentuální zastoupení místa na objektu bleskovým výbojem [14]

Můžeme pozorovat, že největší zastoupení přes 90 %, mají ostré a vyčnívající body. Dále horizontální/šikmé plochy mají zastoupení menší než 5 %. Při pohledu zpět na návrh ochrany můžeme pozorovat, že tyto nejčastěji zasažená místa jsou chráněna, jsou vhodně vybraná dle pravděpodobností pro konkrétní části objektu. Tudíž by se i po tomto pohledu měla ochrana jevit jako vhodná.

V předchozí části této kapitoly pro optimalizovaný návrh ochrany uvažujeme výšku jímacích tyčí 3 metry. Této výšky však při reálné instalaci nejde úplně přesně dosáhnout z důvodu, že výrobce nenabízí takto vysoké komplety jímacích tyčí, aby splňovaly naše požadavky. Nastává otázka, zda tento rozdíl v rozměrech jímacích tyčí nějakým způsobem ovlivní výsledky ochrany. Jestli se výsledné pokrytí pravděpodobnosti zásahu pro dané rozvržení změní nebo zůstane podobné. Například při velkém zvýšení pravděpodobnosti by bylo na místě pracovat s nižším počtem jímacích tyčí a jednu nebo více tyčí z návrhu odstranit. To by šlo provést, pokud by po této regulaci byla zachována požadovaná pravděpodobnost zachycení. Pro vyřešení tohoto problému se odkážeme na již zmiňovaný odborný článek z části 4.4 v této práci [5]. V něm se tvůrci zabývali vlastnostmi rozdělení pravděpodobnosti na objektu 40 x 40 x 10 m. Jímací tyče umístili do čtyř rohů a porovnávali výslednou pravděpodobnost jímacích tyčí v závislosti na jejich výšce. Vždy se brala kombinovaná pravděpodobnost pro tyto 4 jímací tyče. Zabývali se výškou jímacích tyčí od nuly (žádné tyče) až vysoké 10 m. V následujícím grafu můžeme pozorovat převzaté výsledky ze zmiňovaného odborného článku (modrá barva) doplněná o výsledky z této práce (červená barva). Pro objekt, kterým se zabýváme v této práci, byly provedeny dva výpočty pro výšku jímacích tyčí 1 m a 3 m.



Obrázek 30: Efektivnost jímacích tyčí v závislosti na jejich výšce [5]

Můžeme pozorovat, že výsledky v této práci do jisté míry korespondují s výsledky z tohoto článku. Pro jímací tyče vysoké 1 m byla pravděpodobnost necelých 60 %, pro výšku jímacích tyčí 3 m byla pravděpodobnost přes 99 %. Tudíž by zvýšení jímacích tyčí na 4 m neznamenal velký posun a nepředpokládá se, že by při použití takto vysokých tyčí byl výsledný efekt nějak rozhodující. Proto budeme uvažovat, že výška tyčí 3 metry je správná.

## 6 Ekonomické srovnání navržených ochran

V této části práce jsou srovnány navržené způsoby ochrany z ekonomického hlediska. Na základně předchozí kapitoly jsou zde navržené ochranné způsoby za pomoci firmy *GN hromosvody* oceněny. Jsou použity i dostupné produktové listy a ceníky firmy *Dehn* (pro optimalizační návrhy). Oceňování proběhne na základě předpokládaného množství materiálu pro daný způsob ochrany. Dále jsou uvažovány náklady na údržbu a revize. V této části jsou použity dva přístupy pro ekonomické srovnání daných ochran. Nejprve je provedeno srovnání pomocí ukazatele NPV (Net present value = čistá současná hodnota), kde jako vstup do výpočtu jsou brány v podstatě jen záporné finanční toky (náklady na pořízení a údržbu), neboť se nejedná o aplikaci, která by tvořila zisk. Tento přístup slouží hlavně k porovnání jednotlivých ochran mezi sebou. Nejvhodnější je taková ochrana, která má nejmenší záporný výsledek NPV. Další přístup, který je použit vychází z normy, která navrhuje postup pro ocenění ekonomické výhodnosti ochran. Tento postup je dále zkombinován s výpočtem NPV a je zde zkoušeno, zdali na sebe nějaká ochrana může „vydělat“. Na základě výsledku bychom měli být schopni posoudit, jaká ochrana je ekonomicky nejvhodnější, případně jak moc je nákladná. Nyní představím dva zmíněné přístupy k ekonomickému porovnání, a to tedy NPV a postup vycházející z normy.

### NPV (Čistá současná hodnota)

Jedná se o jedno z nejprůhlednějších kritérií, kdy při jeho správném použití neexistují žádná úskalí zkrácené volby investice. Je to jedno z nejpoužívanějších kritérií pro hodnocení investice, rozhodování zda je investice do budoucna výhodná. Kritérium bere v úvahu celou dobu životnosti investice a časovou hodnotu peněz. Vzorec pro NPV je následující.

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} - INV,$$

kde je  $CF$  – finanční tok (cash flow) za jednotlivé roky,

$n$  – doba životnosti projektu,

$r$  – úroková míra,

$t$  – rok,

$INV$  – počáteční investice. [16], [20]

Na základě výsledku se rozhoduje o tom, zda je investice výhodná. Pokud NPV nabývá kladné hodnoty, je vhodné investici uskutečnit. U výběru z více investic je nejlepší ta s nejvyšším NPV. Pokud je NPV rovno nule, investice vrátí přesně požadovanou úrokovou míru (cena ušlé příležitosti). Pokud je výsledek NPV záporný, není vhodné investici uskutečnit, pokud je nutné nějakou investici se záporným NPV vybrat, volí se taková, která má největší hodnotu NPV (jde nejméně do minusu). [16]

### Norma

V normě je definován způsob, který oceňuje finanční výhodnost ochran a který pracuje s celkovou cenou budovy, rizikem škod po úderu blesku do ní bez ochrany a s ochranou. Tento postup tedy dokáže rozhodnout podle předpokládané úspory na škodách, jestli je daná ochrana ekonomicky výhodná a efektivní. Určuje se roční úspora peněz  $S_M$ , vzorec pro její výpočet vypadá následovně.

$$S_M = C_L - (C_{PM} + C_{RL}),$$

kde je  $C_L$  náklady na celkové ztráty,

$C_{PM}$  roční náklady na ochranná opatření,

$C_{RL}$  celková cena zbytkových ztrát. [9]

Náklady na celkové ztráty  $C_L$  a celková cena zbytkových ztrát  $C_{RL}$  se určují jako součin celkové ceny objektu  $c_t$  s velikostí rizika  $R_4$ , a to buď bez ochranných opatření, nebo s ochrannými opatřeními.

Roční náklady na ochranné opatření  $C_{PM}$  se určují z následujícího vzorce:

$$C_{PM} = C_P * (i + a + m),$$

kde je  $C_P$  celková cena ochranných opatření,

$i$  úroková míra,

$a$  odpisová míra,

$m$  míra údržby. [9]

## 6.1 Výsledky pro navržené ochrany

V této části práce nastává čas k samotnému porovnání ekonomické výhodnosti vybraných způsobů ochrany. Je zde provedeno porovnání pomocí dvou představených způsobů. Celkem byly pro uvažovaný objekt představeny 3 ochranná řešení, jedno navržené čistě v souladu s normou, zbylé dvě optimalizované. Pro ochranné řešení používající běžné komponenty (ne HVI), zde jsou porovnané dva použité materiály, slitina hliníku a nerezové řešení. V následující tabulce jsou uvedeny pro úvodní porovnání pořizovací náklady na dané ochrany. Výdaje jsou rozděleny na část výdajů za materiál a část za realizaci ochrany a náležitosti spojené s instalací. Veškeré finanční propočty v této jsou realizovány pro konkrétní objekt pro příspěvkovou organizaci Základní škola a Mateřská škola, Praha 6, Bílá 1, která je plátcem DPH (daň z přidané hodnoty). Všechny ceny, které jsou v práci uvedeny, jsou ceny bez DPH. Pro úplně přesné ekonomické výpočty, by bylo vhodné dále promítnout, jak vstupuje odpisování ochrany do daňového základu a ovlivňuje daň z příjmu. Jelikož se nejedná o typickou výdělečnou organizaci, bude v práci provedeno zjednodušení a budeme se zabývat jen výdaji úzce spjatými s ochranami (výdaje na ochrany, údržbu a revize). [33]

Varianta	Cena za materiál	Cena za práci	Celkem za variantu
Norma hliník	49 222 Kč	127 600 Kč	176 822 Kč
Optimalizovaný návrh A hliník	47 346 Kč	125 800 Kč	173 146 Kč
Optimalizovaný návrh B hliník	229 490 Kč	57 851 Kč	287 341 Kč
Norma nerez	105 655 Kč	127 600 Kč	233 255 Kč
Optimalizovaný návrh B nerez	103 720 Kč	125 800 Kč	229 520 Kč

Tabulka 34: Celkové ceny ochranných variant [26], [29]

Cena za práci u optimalizované varianty B je odhadnuta na základně výdajů za práci pro ostatní dva návrhy. Uvažuje se, že se snížením použitého materiálu sníží i cena za realizaci této ochrany. Další náklady na ochrany jsou výdaje za průběžné revize (viz tabulka č. 8). Existují dva typy revizí, úplná revize včetně proměření určitých částí ochrany a vizuální kontrola. Úplná revize se pro ochrany IV. třídy LPS provádí jednou za 4 roky. Vizuální kontrola se provádí jednou ročně. Firmy provádějící tyto revize si účtují částky různě. Buď volí částku na základě velikosti objektu a stanoví tak cenu za celý objekt. Dalším způsobem ocenění revizí je za počet součástí, které je nutné prověřit. Účtuje se zpravidla za počet svodů. Na webových stránkách firem provádějící revize se dají nalézt orientační



ceny, za které se revize provádějí. Pro možnost porovnání jednotlivých ochran je v práci nutné zvolit jednotný způsob určování ceny za revize. Z několika cenových kalkulací je pro objekt s 20 svody určena cena úplné revize za jeden svod a s touto cenou se dále pracuje pro jednotlivé varianty ochran. V následující tabulce jsou uvedeny různé způsoby ocenění revize. V posledním řádku tabulky je určena cena revize za jeden svod, se kterou budeme dále pracovat.

Firma	Způsob určení ceny	Cena jednotky	Celková cena revize
<i>GN Hromosvody</i>	Jednotná cena	5 000 Kč	5 000 Kč
<i>Jindřich Hříbal Elektrorevize</i>	Fixní částka plus za 1 svod	1000 Kč + 200 Kč za další svod	5 000 Kč
<i>Elektro-revize.eu</i>	Za 1 svod	300 Kč	6 000 Kč
<i>Zaner</i>	Za 1 svod	300 Kč	6 000 Kč
<i>Elektromontáže Šuba</i>	Za 1 svod	250 Kč	5 000 Kč
<b>Průměrná cena revize za objekt</b>		<b>5 500 Kč</b>	
<b>Cena za jeden svod</b>		<b>275 Kč</b>	

Tabulka 35: Kalkulace výdajů za revize

Z tabulky vyplývá, že průměrná cena revize za jeden svod činí 275 Kč. S touto cenou budeme v dalších výpočtech pracovat. Další neznámou je cena, za kterou firmy provádí vizuální kontrolu. Po konzultaci s firmou *GN hromosvody* budeme ve výpočtech používat 10 % ceny úplné revize. V následující tabulce můžeme vidět náklady za oba typy revizí pro uvažované ochrany v této práci.

Varianta	Cena úplné revize	Cena vizuální kontroly
Norma hliník	5 500 Kč	550 Kč
Optimalizovaný návrh A hliník	5 500 Kč	550 Kč
Optimalizovaný návrh B hliník	1 925 Kč	193 Kč
Norma nerez	5 500 Kč	550 Kč
Optimalizovaný návrh B nerez	5 500 Kč	550 Kč

Tabulka 36: Cena revize pro jednotlivé varianty ochran

Dále je nutné mimo výdajů za revize odhadnout výdaje za údržbu. Tyto výdaje se budou předpokládat různě pro různé materiály a budou vypočteny z celkové ceny dané ochrany, je tak provedeno v následující tabulce. Uvažujeme, že výdaje na revize u hliníku budou větší než v případě zbylých použitých materiálů, Také, že nerezová řešení budou mít větší výdaje na údržbu než použití speciálních materiálů HVI.

Varianta	Celkem za variantu	Procento z celkové částky	Výdaje na údržbu ročně
Norma hliník	176 822 Kč	0,015 %	265 Kč
Optimalizovaný návrh A hliník	173 146 Kč	0,02 %	260 Kč
Optimalizovaný návrh B hliník	287 341 Kč	0,005 %	144 Kč
Norma nerez	233 255 Kč	0,0075 %	175 Kč
Optimalizovaný návrh B nerez	229 520 Kč	0,0075 %	172 Kč

Tabulka 37: Výdaje na údržbu ochran

Vidíme, že částky za údržbu není nijak výrazná, jedná se o průměrnou roční částku. Její nižší hodnota je dána tím, že řada firem poskytuje na revize prodlouženou záruku (například 10 let), proto v těchto prvních letech budou v reálném případě tyto výdaje nulové.

### Porovnání pomocí NPV

Pro srovnání těchto ochran pomocí NPV ještě chybí stanovit diskont, který v tomto výpočtu použijeme, a životnost ochran, kterou budeme uvažovat. Jako diskont je použita roční míra inflace. Je použita její poslední známá hodnota ze statistik *Českého statistického úřadu* pro rok 2017. Její hodnota je 2,5 %. **Diskont** tedy uvažujeme **2,5 %**. **Životnost** ochran uvažujeme **30 let**. Jelikož v tomto případě uvažujeme do CF (cash flow = finanční tok) pouze výdaje za revize a výdaje za údržbu, které jsou vyčísleny v tabulkách č. 36 a č. 37, jsou v následující tabulce tyto výdaje spojeny do jedné částky. Zde je uvedeno pro ukázkou prvních 8 let doby porovnání, aby bylo vidět, jakým způsobem bylo CF pro jednotlivé roky tvořeno. Finanční toky v dalších letech, které v tabulce nejsou uvedeny, se opakují po čtyřech letech, jak je naznačeno v tabulce.

Varianta	Investice	Rok 1	Rok 2	Rok 3	Rok 4	Rok 5	Rok 6	Rok 7	Rok 8
Norma hliník	-176 822 Kč	-815 Kč	-815 Kč	-815 Kč	-5 765 Kč	-815 Kč	-815 Kč	-815 Kč	-5 765 Kč
Optimalizovaný návrh A hliník	-173 146 Kč	-810 Kč	-810 Kč	-810 Kč	-5 760 Kč	-810 Kč	-810 Kč	-810 Kč	-5 760 Kč
Optimalizovaný návrh B hliník	-287 341 Kč	-337 Kč	-337 Kč	-337 Kč	-2 069 Kč	-337 Kč	-337 Kč	-337 Kč	-2 069 Kč
Norma nerez	-233 255 Kč	-725 Kč	-725 Kč	-725 Kč	-5 675 Kč	-725 Kč	-725 Kč	-725 Kč	-5 675 Kč
Optimalizovaný návrh B nerez	-229 520 Kč	-722 Kč	-722 Kč	-722 Kč	-5 672 Kč	-722 Kč	-722 Kč	-722 Kč	-5 672 Kč

Tabulka 38: Naznačení výpočtu NPV

Po ukázce, jak byly tvořena data pro výpočet NPV, je na čase představit výsledky tohoto výpočtu.

Varianta	NPV
Optim. A	-217 680 Kč
Norma hliník	-213 899 Kč
Optim. A nerez	-302 714 Kč
Norma nerez	-272 229 Kč
Optim. B	-268 431 Kč

Tabulka 39: Výsledky NPV pro životnost 30 let

V tabulce č. 39 vidíme seřazené hodnoty NPV pro všechny porovnávané investice. Vidíme, že jako nejlepší investice se jeví optimalizovaný návrh A v hliníkovém provedení. Výsledky vycházejí v podstatě stejně jako, když porovnáme počáteční investice, jejich pořadí se nezměnilo. Ani pro uvažovanou životnost 30 let nevznikne mezi návrhy z normy a optimalizovanými návrhy A pro obě materiálová provedení nějaký velký rozdíl. Tudíž optimalizovaný návrh nepřinese příliš velkou úsporu. Rozdíl mezi optimalizovaným návrhem A a návrhem z normy pro hliník je 3 780 Kč ve prospěch optimalizované varianty. Pro provedení v nerez je tento rozdíl 3798 Kč ve prospěch pro optimalizovanou variantu A. Tyto rozdíly nejsou nějak výrazné a neřeší rozhodnutí přiklonit se právě k jedné z optimalizovaných variant.

Dalším důležitým poznatkem je, že se optimalizovaný návrh B přes úsporu na revizích plynoucí z menšího množství použitého materiálu, nepředběhl nějakou z ostatních variant v hodnocení dle výsledků NPV.

### Porovnání pomocí normy

Nyní nastává prostor pro porovnání ochran dle postupu doporučeného normou. Pro tento způsob porovnání ještě musíme určit některé ze vstupů potřebných do výpočtů. Samotný výpočet provedeme pomocí programu *DEHNSupport*, ten počítá v souladu s normou. Vzorce pro výpočet jsou uvedeny v úvodu této kapitoly. Jedná se o výpočet **roční úspory peněz**. Mezi vstupy, které ještě

musíme určit, patří **roční míra údržby a celková cena chráněného objektu**. Míra údržby se určuje jako procento, kolik z celkové částky ochrany vynaložíme ročně na ochranu. Míru údržby určíme na základě očekávaných výdajů na revize poměrem k celkové ceně ochrany. Jelikož se výdaje za revize v rámci čtyř let mění, bude zde proveden výpočet tak, aby se daly určit průměrné roční výdaje po celou dobu životnosti. V našem případě se uvažují dva různé průběhy plateb za revize, tj. za řešení s 20 svody a řešení se 7 svody. Proto zde provedeme určení plateb pro tyto dva případy, ty pak využijeme pro ostatní varianty ochrany. Vypočteme NPV pro finanční toky pouze pro výdaje za revize (rok 1 až 30). Tyto výsledky vynásobíme anuitou za 30 let a tímto získáme výdaje za revize ochrany za jeden průměrný rok, bereme v potaz diskont. Vzorec pro anuitu vypadá následovně. V tomto výpočtu neuvažujeme výdaje na opravy ochranných řešení.

$$a = \frac{(1+r)^T * r}{(1+r)^T - 1}$$

kde  $T$  je životnost investice (ochrany), uvažujeme 30 let,

$r$  diskont, uvažujeme 2,5 %. [16], [20]

NVP pro výdaje za údržbu vypadají následovně.

Anuita 30 let = 0,04778					
Varianta	Úplná revize	Vizuální kontrola	údržb a	NVP 30 let	Roční částka na údržbu a revize
Norma hliník	5 500 Kč	550 Kč	265 Kč	-40 857 Kč	-1 952 Kč
Optim. A hliník	5 500 Kč	550 Kč	260 Kč	-40 753 Kč	-1 947 Kč
Optim. B	1 925 Kč	193 Kč	144 Kč	-15 373 Kč	-735 Kč
Norma nerez	5 500 Kč	550 Kč	175 Kč	-38 974 Kč	-1 862 Kč
Optim. A nerez	5 500 Kč	550 Kč	172 Kč	-38 911 Kč	-1 859 Kč

Tabulka 40: Výpočet roční částky za údržbu a revize

Jelikož každá z uvažovaných ochranných variant má jinou hodnotu, je tedy nutné míru údržby určit pro každou variantu zvlášť. Provedeno v následující tabulce.

Varianta	Cena varianty	Roční částka na údržbu a revize	Míra údržby
Norma hliník	176 822 Kč	1 952 Kč	1,10 %
Optim. A hliník	173 146 Kč	1 947 Kč	1,12 %
Optim. B	287 341 Kč	734 Kč	0,26 %
Norma nerez	233 255 Kč	1 862 Kč	0,80 %
Optim. A nerez	229 520 Kč	1 859 Kč	0,81 %

Tabulka 41: Stanovení míry údržby

Další neznámou, kterou je potřeba určit je celková cena objektu  $c_t$ . Tu by bylo vhodné určit například z ceny, na kterou je celý objekt pojištěn, tuto částku se však nepodařilo získat. Proto zde je provedeno určení hodnoty tohoto objektu jiným způsobem. Celková cena objektu je složena celkem ze tří hodnot, jedná se o hodnoty syntetických účtů. V následující tabulce jsou uvedeny účty, které jsou pro určení hodnoty objektu použity. Údaje byly poskytnuty zřizovatelem školy, tedy Městkou částí Praha 6 a vedením školy.

Účet	Hodnota
021 - budovy, stavby	108 000 000 Kč
022 - dlouhodobý hmotný majetek	180 000 000 Kč
028 - drobný dlouhodobý majetek	40 000 000 Kč
Celková hodnota objektu	328 000 000 Kč

Tabulka 42: Celková hodnota objektu

Celková hodnota školy tedy činí 328 000 000 Kč. V následující tabulce je vypočtena hodnota roční úspory peněz, tedy hodnoty, která dle normy rozhoduje o ekonomické efektivnosti dané ochrany. Jelikož pro uvažovanou životnost 30 let pro všechny varianty ochrany vyšlo, že dle tohoto parametru nejsou ekonomicky efektivní, byl proveden výpočet, za kolik let se nějaká ochrana dle tohoto parametru bude jevit jako ekonomicky výhodná. V posledních dvou řádcích tabulky je uvedeno pro jakou životnost, je daná ochrana ekonomicky efektivní a také hodnota roční úspory peněz pro danou životnost. Pro objasnění postupu, jak byly jednotlivé hodnoty v tabulce určeny, popíši, jak se tvoří jeden sloupec. První dva řádky jsou jasné, jedná se o celkovou hodnotu budovy a celkovou hodnotu ochranného řešení. Další čtyři údaje jsou určeny přesně dle postupu uvedeného v úvodu 6. části této práce. Nejzajímavější jsou dva poslední řádky, ty vznikají citlivostní analýzou výsledků Roční úspory peněz. Ve výpočtu je zvyšována doba životnosti ochrany, dokud nedojde k překročení roční úspory peněz do kladných hodnot. Pro tuto životnost se pak jeví ochrana dle normy jako ekonomicky efektivní. Výsledky jsou vypočteny pomocí programu *DEHNSupport*, který počítá přesně dle postupu z normy.

Varianta	Norma hliník	Optim. A hliník	Optim. B	Norma nerez	Optim. A nerez
<b>Celková hodnota budovy [Kč]</b>	328 000 000	328 00 0000	328 000 000	328 000 000	328 000 000
<b>Cena hromosvodu [Kč]</b>	176 822	17 3146	287 341	233 255	229 520
<b>Cena celkových ztrát [Kč]</b>	17 214	17 214	17 214	17 214	17 214
<b>Cena zbytkových ztrát [Kč]</b>	5 623	5 623	5 623	5 623	5 623
<b>Roční náklady na ochranu [Kč]</b>	12 254	12 034	17 499	15 465	15 240
<b>Roční úspora peněz [Kč]</b>	<b>-653</b>	<b>-433</b>	<b>-7447</b>	<b>-3684</b>	<b>-3 639</b>
<b>V jakém roce se vyplatí</b>	<b>34</b>	<b>33</b>	<b>79</b>	<b>60</b>	<b>58</b>
<b>Roční úspora peněz [Kč]</b>	<b>37</b>	<b>121</b>	<b>29</b>	<b>8</b>	<b>56</b>

Tabulka 43: Výsledky ekonomické efektivnosti dle normy

V tabulce můžeme pozorovat, že všechny zvažované ochrany pro životnost 30 let se jeví dle normy, jako ekonomicky neefektivní, přestože jsou na objektu z hlediska řízení rizik nutné. Je vidět, že některé z ochrany jsou ekonomicky efektivní hned několik let po uvažované životnosti 30 let, některé až za dvojnásobek této doby. Jedna z optimalizovaných variant dokonce až po 79 letech. Je poměrně těžké vyčíslit životnost konkrétních ochrany. Dá se říct, že 30 let je doba, kterou ochrany vydrží celkem běžně, v některých případech je to i 60. Uvažovat dobu životnosti 80 let, je poměrně velký risk a je pravděpodobné, že do té doby dojde k rekonstrukci samotných ochrany, i samotné budovy.

### Kombinace porovnání

Dvě výše uvedené srovnání byla provedena podle přesných splnění požadavků daných postupu (NPV a norma). V této části práce pracujeme s oběma postupy dohromady. Srovnání provedeme pomocí NPV, do kterého mimo výdajů za údržbu, jako bylo provedeno v prvním srovnání, vložíme též roční úsporu peněz. Pokud bychom vzali výslednou hodnotu roční úspory peněz ze srovnání dle normy, nebylo by to vhodné, neboť hodnota v tomto případě je snížena o odpisy, což snižuje uvažovanou úsporu. Za roční úsporu v tomto případě vezmeme jen rozdíl cen celkových ztrát a cen zbytkových

ztrát. Diskont 2,5 % jako v předešlých případech a životnost pro stanovení výsledků opět 30 let. A jako výdaje na ochrany vstupují již stanovené výdaje na údržbu (revize). Z hlediska nákladů neuvažujeme odpisy, ale do výpočtů vstupují jen výdaje za revize. Zcela fiktivní roční úsporu peněz budeme brát jako příjem. Ve skutečnosti se nejedná o finanční tok, ale jen o teoretické číslo dané normou. Toto použití pro naše účely však je vhodné.

Takto určená roční úspora činí 11 591 Kč. Tento výdaj stačí přidat jako příjem do výpočtu NPV a určit hodnotu těchto investic. Jelikož uvažujeme vždy ochranu IV. třídy LPS, tak roční úspora je vždy stejná. V následující tabulce je naznačen princip výpočtu pro prvních 8 let pro jednu z variant ochran.

Norma hliník									
Rok	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Výdaj [Kč]	-176 822	-815	-815	-815	-5 765	-815	-815	-815	-5 765
Příjem [Kč]	0	11 591	11 591	11 591	11 591	11 591	11 591	11 591	11 591
CF [Kč]	-176 822	10 776	10 776	10 776	5 826	10 776	10 776	10 776	5 826
DCF [Kč]	-176 822	10 513	10 257	10 007	5 278	9 524	9 292	9 065	4 782
NPV [Kč]	-176 822	-166 309	-156 052	-146 046	-140 768	-131 243	-121 951	-112 886	-108 104

Tabulka 44: Výpočet NPV pro kombinované porovnání

V tabulce 44 je nejzajímavější poslední řádek. V něm jsou výsledné hodnoty NPV pro jednotlivé roky uvažované investice. Před bližším zkoumáním se ještě podívejme, jak vychází hodnota NPV pro uvažovanou životnost 30 let. Výsledky jsou v tabulce seřazené od nejlepší varianty po nejhorší.

Varianta	NPV (30 let)
Optim. A hliník	28 704 Kč
Norma hliník	24 923 Kč
Optim. A nerez	-25 828 Kč
Norma nerez	-29 626 Kč
Optim. B	-60 111 Kč

Tabulka 45: NPV 30 let, kombinované porovnání

Vidíme, že i tento postup seřadil varianty stejně jako předešlé dva postupy. Na rozdíl od předchozích postupů, tento vybral dvě z nich jako ekonomicky efektivní již pro uvažovanou životnost 30 let. Jinými slovy, ochrany si na sebe v důsledku ochrany nad teoretickými škodami vydělají. Zbylé tři varianty tento postup zvolil také jako ekonomicky neefektivní. Zjistili jsme jiný výsledek než dle normy, kde se ekonomicky výhodnou nejevila žádná ochrana. V následující tabulce uvádíme, v jakém roce se NPV jednotlivých variant dostane do kladných hodnot, tedy pro jakou životnost začínají být investice ekonomicky výhodné. Jedná se v podstatě o diskontovanou dobu návratnosti.

NVP > 0		
Varianta	Rok	Hodnota
Optim. A	25	4 167 Kč
Norma	25	399 Kč
Optim. A nerez	37	2 792 Kč
Norma nerez	38	3 236 Kč
Optim. B	45	3 593 Kč

Tabulka 46: NPV > 0, kombinované porovnání

Můžeme pozorovat, že dle tohoto kritéria se jeví všechny varianty ekonomicky výhodné pro dobu životnosti, které lze poměrně reálně dosáhnout. Vyšší pořizovací cena ochran zahrnuje v sobě kvalitnější materiály a tím i jistější životnost. Zjednodušeně by se dalo říci, že mnohdy není problém

životnost ochranných řešení, ale spíše životnost částí na stavbě ochranám blízkých. Ty mohou být například dříve rekonstruované, než by to bylo nutné u ochran. Jedná se o části stavby jakou je střecha nebo fasáda. Jako ukázkou, zda optimalizovaný návrh B v nějaké rozumné době předstihne v hodnocení některou z ostatních metod, jsme určili NPV až do 100 let životnosti. To je poměrně dlouhá doba a došlo by pravděpodobně k rekonstrukci některé ze jmenovaných částí stavby, nebo ochranných soustav.

Varianta	NPV (100 let)
Optim. A	177 945 Kč
Norma	174 085 Kč
Optim. A nerez	124 793 Kč
Norma nerez	120 948 Kč
Optim. B	109 456 Kč

Tabulka 47: NPV 100 let, kombinované porovnání

Vidíme, že ani když uvažujeme životnost 100 let, nedojde ke změně výhodnosti variant. Jsou seřazené stejně jako na začátku (dle pořizovací ceny). Tedy úspory na revizích u optim. B řešení nepřekoná vyšší pořizovací náklady.

Použití kvalitnějších materiálů má za důsledek vyšší pořizovací cenu, ale i možnou delší životnost. Životnost základní ochrany (Norma hliník) 30 let budeme uvažovat jako základní životnost pro následující výpočet. Určíme, kolik let by zbylé ochrany musely vydržet v pořádku, nad rámec 30 let, aby vydělaly na počáteční rozdíl v investici. Budeme uvažovat, že zvolená základní ochrana po 30 letech potřebuje vyměnit. Jako základní údaj zvolíme hodnotu NPV po 30 letech existence ochrany Norma hliník, tato hodnota je 24 923 Kč. V tomto případě budeme porovnávat investice s různou dobou životnosti, pro jejich srovnání je tedy nutné provést přepočty, aby bylo toto porovnání možné. Musíme také přijmout některé předpoklady. Očekáváme cyklické opakování ekonomických důsledků a konstantní diskont během doby porovnávání. Pokud pak vynásobíme NPV v určitém roce anuitou pro daný rok, získáme roční ekvivalentní hodnotu investice. Tento údaj již mezi sebou můžeme porovnat. Pokud správně vypočteme roční ekvivalentní hodnoty pro investice a následně je porovnáme, ta hodnota, která je větší je i ekonomicky výhodnější. Hodnotu nazýváme roční CF, zkratkou tedy RCF. V následující tabulce jsou uvedeny výsledky, jak toto porovnání vychází. Diskont uvažujeme stále 2,5 %. [16]

Počet let	Anuita
30	0,0479
46	0,0368
47	0,0364
56	0,0334

Tabulka 48: Anuita pro určité roky

Varianta	RCF30	RCF46	RCF47	RCF56
Norma	1 191 Kč			
Optim. A	1 371 Kč			
Optim. B		265 Kč	391 Kč	1 248 Kč
Norma nerez		1 113 Kč	1 223 Kč	
Optim. A nerez		1 253 Kč	1 362 Kč	

Tabulka 49: Porovnání ochrany s různou dobou životnosti

Vidíme, že Optim. A hliník varianta je výhodnější pro celou životnost investic, to je ale celkem jasné, zajímavější jsou další výsledky. Konkrétně výsledky, kdy se jednotlivé dražší varianty stanou výhodnějšími, pokud bychom uvažovali životnost základní ochrany 30 let. Pro variantu Optim. A nerez se tak stane v roce 46, pro variantu Norma nerez pak o rok později, v roce 47. Plně optimalizovaná

varianta Optim. B až v roce 56, musela by tedy v tomto případě prokázat téměř dvojnásobnou životnost, než základní varianta.

## Závěr

Bleskový výboj je bezesporu jev, před kterým je vhodné se chránit. Jedná se o přírodní jev, při kterém jeho vrcholové hodnoty proudu mohou dosahovat hodnot až kolem 200 kA. S touto vysokou hodnotou proudu je spojené i přenášení velkého množství energie. Tato kombinace má při zásahu devastující účinky a působí velké škody. Bleskové výboje vznikají prakticky na všech místech zeměkoule a to v bouřkových mracích, které se tvoří na základě určitých scénářů počasí. Jak je bleskový výboj častým jevem, závisí na podmínkách v dané oblasti.

Průběhy a hodnoty bleskových výbojů jsou poměrně dobře zmapované, tudíž i metodika pro návrh a realizaci ochran je také dobře připravena. Existují matematické popisy bleskových výbojů a jsou určeny hodnoty jednotlivých parametrů. Na každém objektu, kde hrozí riziko zásahu, je nutné určit hodnotu rizik dle postupu z normy a rozhodnout o ochraně. Na základě předchozích zkušeností existují i doporučená zařazení objektů do jednotlivých ochranných tříd, zejména pro objekty se specifickým využitím. I přes tato doporučení je vhodné vždy provést analýzu rizik pro konkrétní objekt, neboť vždy závisí na konkrétních vlastnostech objektu a podmínkách v jeho okolí. Výsledky podrobné analýzy a doporučené zařazení se může mnohdy lišit.

V této práci byl význam ochran zkoumán na konkrétním objektu, na komplexu základní a mateřské školy. Návrh ochran dle pravděpodobnostního modelu se jeví jako vhodný zejména z hlediska efektivnosti rozvržení ochranných opatření. Na první pohled se jeví, že je možné dosáhnout i ekonomické úspory, zejména na množství použitého materiálu. Pro co nejpřesnější model, jsou v práci použity takové hodnoty bleskových parametrů, aby byly co nejvíce popsány vlastnosti bleskových výbojů v oblasti, kde se objekt nachází. Navržení jímací soustavy pomocí tohoto modelu vychází skutečně tak, že redukuje použitý materiál na tuto soustavu.

Při bližším pohledu však nastává problém s použitím tohoto návrhu. Samotné zachycení bleskového výboje je bez problému, je navržena opravdu efektivní jímací soustava. Problém nastává s bezpečným svedením bleskového proudu do země. Co se týče použitých materiálů a jejich průřezů, tam problém není, norma definuje minimální průřezy, které se mohou používat a ty jsou schopny uvažované maximální hodnoty proudu zvládnout. Horší to je s dodržením dostatečné vzdálenosti, kde její dodržení slouží k elektrické izolaci částí jímací soustavy a soustavy svodů od kovových (vodivých) částí budovy. U jejího nedodržení hrozí zavlčení proudu do objektu nebo nebezpečné jiskření a s tím spojené možné škody. Po redukci jímacích tyčí dává smysl redukovat i soustavu svodů. S touto redukcí rostou nároky na použité materiály. Existují dva způsoby jak se s tím vypořádat, buď se musí dodržet podobné množství použitého materiálu, jako v případě z normy, pro pospojování jednotlivých jímacích tyčí mezi sebou. Ušetří se pouze na jímacích tyčích, kde úspora není zase tak velká. Nebo se pro splnění dostatečné vzdálenosti musí použít speciální materiály (izolované vodiče a jímací tyče), které jsou několikanásobně dražší než běžný materiál a celková cena překročí cenu návrhu z normy.

Při porovnání ochran z ekonomické stránky se čistě optimalizovaná varianta i přes uvažované značné úspory na revizích, nejeví jako ekonomicky výhodnější než návrh dle normy. Můžeme pozorovat, že i samotná ekonomická výhodnost ochrany dle normy na zvolený objekt nevychází nějak přesvědčivě. Přesto všechny varianty se pro poměrně možné doby životnosti jeví jako ekonomicky vhodné. V práci je provedeno ekonomické porovnání variant návrhů ochran pomocí celkem tří způsobů, dle čisté současné hodnoty (NPV), postupu z normy a vlastního postupu navrženého v této práci. Ekonomická výhodnost ochran závisí hlavně na účelu využití objektu a jeho celkové hodnotě.

Přednosti použití pravděpodobnostního modelu v praxi vidím hlavně v kontrole navržených ochran. Ověření správnosti návrhu a vytipování kritických míst v návrhu, která budou opravdu hodně exponovaná a nabízí se například zesílení ochrany v daném místě. V tomto kontextu bych využil i speciální materiály a zvyšoval bych pomocí nich kritické části ochranné soustavy a díky ní zvyšoval spolehlivost dané části. Celý návrh dle pravděpodobnostního modelu se nejeví jako ekonomicky



nejvýhodnější, aspoň ne pro tento objekt. Spolehlivost takového systému může byt vhodná, ale ekonomicky výhodnější než použití konvenčních návrhů ochran se nejeví.

## Reference

- [1] BURANT, Jiří. *Blesk a přepětí: systémová řešení ochran*. Praha: FCC Public, 2006, 252 s. ISBN 80-865-3410-3.
- [2] RAKOV, Vladimír a Martin A UMAN. *Lightning: physics and effects*. New York: Cambridge University Press, 2002, 687 s. ISBN 05-215-8327-6.
- [3] ČSN EN 62305-1 ED. 2. *Ochrana před bleskem – Část 1: Obecné principy*. 2011.
- [4] ROUS, Zdeněk, Wolfgang MARKS a Stanislav SEDLÁČEK. *Hromosvody a zemniče*. Vyd. 1. Praha: STRO.M, 1996, 76 s. Dílenská příručka.
- [5] KERN, Alexander, Christof SCHELTHOFF a Moritz MATHIEU. *Probability of lightning strikes to air-terminations of structures using the electro-geometrical model theory and the statistics of lightning current parameters* [online]. [cit. 2019-01-05].
- [6] NASA Earth Observatory [online]. [cit. 2018-10-17]. Dostupné z: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/85600/global-lightning-activity>
- [7] *Matematická biologie učebnice: Logaritmicko-normální rozdělení* [online]. [cit. 2018-11-05]. Dostupné z: <http://portal.matematickabiologie.cz/index.php?pg=aplikovana-analyza-klinicky-ch-a-biologicky-ch-dat--biostatistika-pro-matematickou-biologii--nahodna-velicina-rozdeleni-pravdepodobnosti-a-realna-data--dalsi-rozdeleni-pravdepodobnosti--logaritmicko-normalni-rozdeleni>
- [8] KOUDELKA, Ctirad. *Ochrana před bleskem* [online]. 2007 [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: [http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske/prednasky/pred\\_ZEP/Ochrana%20pred%20bleskem-CSN.pdf](http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske/prednasky/pred_ZEP/Ochrana%20pred%20bleskem-CSN.pdf)
- [9] ČSN EN 62305-2 ED. 2. *Ochrana před bleskem – Část 2: Řízení rizika*. 2012.
- [10] ČSN EN 62305-3 ED.2. *Ochrana před bleskem – Část 3: Hmotné škody na stavbách a ohrožení života ČSN*. 2012.
- [11] ANDERSON, R. B. a A. J. ERIKSSON, 1980. Lighting parameters for engineering application. *Electra*. (69), 65-102 [cit. 2019-01-05].
- [12] BERGER, K., R.B. ANDERSON a H. KRONIGER, 1975. Parametres of lightning flashes. *Electra*. (41), 23-27 [cit. 2019-01-05].
- [13] CIGRE, WG C4.407. *Lightning Parameters for Engineering Applications*. 2013.
- [14] HARTONO, Z. A. a I. ROBIAH, 1995. *Method of identifying the lightning strike location on a structure*. Kuala Lumpur, Malaysia [cit. 2019-01-05].
- [15] KERN, Alexander a Ralph BROCKE. *Planning of Air-Termination Systems with the Dynamic Electro-Geometrical Model - Possible Practical Applications*. 2017.
- [16] BREALEY, Richard A., Stewart C. MYERS a Franklin ALLEN. *Teorie a praxe firemních financí. 2., aktualiz. vyd.* Brno: BizBooks, 2014. ISBN 978-80-265-0028-5.
- [17] STÖKL, Tibor. *Analytické metody stanovení pravděpodobného místa zásahu objektu bleskovým výbojem* [online]. 2018 [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/76723>. Bakalářská práce. ČVUT, Fakulta elektrotechnická.

- [18] FOŘT, Radim. *Vývojová analýza ochran před přímým zásahem objektů bleskem* [online]. 2016 [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/64701>. Bakalářská práce. ČVUT, Fakulta elektrotechnická.
- [19] KOŠŤÁL, Josef. *Dynamická blesková koule: Výpočet pravděpodobnosti pro údery blesku do budovy* [online]. 2011 [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <http://uniesoudnichznalcu.cz/public/media/files/clanky/Ochrana-pred-bleskem-a-napetim/Aktivni-jimace/ESE-a-dynamicka-koule.pdf>
- [20] *Algoritmy.net: Ukazatele ekonomické efektivnosti* [online]. [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <https://www.algoritmy.net/article/149/Ekonomicka-efektivnost>
- [21] ZÁKLADNÍ ŠKOLA A MATEŘSKÁ ŠKOLA BÍLÁ. *Výroční zpráva za školní rok 2017/2018* [online]. [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <http://www.zsbila.cz/images/stories/tisk/Vyrocní-zprava-2017-2018-complete.pdf>
- [22] *Památkový katalog: Francouzské školy* [online]. [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <https://pamatkovykatalog.cz/?presenter=ElementsResults&action=element&element=13363251>
- [23] *Archiweb: Francouzské školy* [online]. [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <https://www.archiweb.cz/b/francouzske-skoly>
- [24] *Mapy Google* [online]. [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <https://www.google.com/maps>
- [25] *Meteocentrum.cz: Atmosférické fronty* [online]. [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <https://www.meteocentrum.cz/zajimavosti/encyklopedie/atmosfericke-fronty>
- [26] *Ceník hromosvodní součásti. DEHN.cz* [online]. [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: [https://www.dehn.cz/sites/default/files/uploads/dehn/DEHN-CZ/pdf/Ceniky/dehn\\_hromosvodni\\_soucasti\\_01092017.pdf](https://www.dehn.cz/sites/default/files/uploads/dehn/DEHN-CZ/pdf/Ceniky/dehn_hromosvodni_soucasti_01092017.pdf)
- [27] *iDnes.cz: Extrémy se prohlubují, destruktivních bouřek přibývá, říká jejich lovec* [online]. [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: [https://zpravy.idnes.cz/tornado-vas-v-bource-nevcucne-kroupy-upravi-kapotu-rika-lovec-bouri-1ge-/domaci.aspx?c=A150717\\_203905\\_domaci\\_fer](https://zpravy.idnes.cz/tornado-vas-v-bource-nevcucne-kroupy-upravi-kapotu-rika-lovec-bouri-1ge-/domaci.aspx?c=A150717_203905_domaci_fer)
- [28] *INFOMET, Informační web ČHMU: Bouřky a vítr v příštím roce* [online]. [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <http://www.infomet.cz/index.php?id=read&idd=1428835475>
- [29] *GN Hromosvody* [online]. [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <https://www.gnhromosvody.cz/>
- [30] *Knížka.eu: Animace Návrh ochranného prostoru jímací soustavy za pomoci valivé koule a ochranného úhlu* [online]. [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <http://www.kniska.eu/animace/animace>
- [31] DEHN + SÖHNE, 2014. *Inovace ve vnější ochraně před bleskem: Izolovaný svod HVI s vysokonapěťovou izolací* [online]. [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: <https://www.dehn.cz/sites/default/files/uploads/dehn/DEHN-CZ/pdf/Brozury/Archiv/ds212-hvi.pdf>
- [32] DEHN + SÖHNE, 2018. *Bezpečná ochrana budov: Systémová řešení pro oddálené jímací soustavy* [online]. [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: [https://www.dehn.cz/sites/default/files/uploads/dehn/DEHN-CZ/pdf/Brozury/Brozury\\_srpen\\_2018/ds151\\_strecha\\_bezpecna\\_ochrana\\_budov.pdf](https://www.dehn.cz/sites/default/files/uploads/dehn/DEHN-CZ/pdf/Brozury/Brozury_srpen_2018/ds151_strecha_bezpecna_ochrana_budov.pdf)
- [33] *Kurzy.cz: DIČ CZ48133833 - Registrace DPH/VAT, Základní škola a Mateřská škola, Praha 6, Bílá 1* [online], [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: <https://rejstrik-firem.kurzy.cz/48133833/zakladni-skola-a-materska-skola-praha-6-bila-1/registrace-dph/>

## **Seznam příloh**

Příloha 1: Dílčí propočty a kalkulace.xlsx