

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd



Diplomová práce

Nekonvenční triggerování elektrických výbojů

Unconventional triggering of electrical discharges

Autor: Bc. Marek Cerman

Vedoucí práce: Ing. Jan Mikeš, Ph.D.

Studijní program: Elektrotechnika, energetika, management

Praha 2023



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Cerman** Jméno: **Marek** Osobní číslo: **483858**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Specializace: **Management energetiky a elektrotechniky**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Nekonvenční triggerování elektrických výbojů**

Název diplomové práce anglicky:

**Unconventional triggering of electrical discharges**

Pokyny pro vypracování:

Charakterizujte fyzikální a technické souvislosti elektrických (bleskových) výbojů.  
Představte metody nuceného spouštění elektrických (bleskových) výbojů.  
Diskutujte pozitiva a negativa uvedených metod.  
Navrhněte vlastní řešení spouštění elektrického výboje pomocí laserového mechanismu.  
Vyhodnoťte ekonomické dopady a náklady zvoleného řešení v porovnání s konvenčními metodami při praktickém využití.

Seznam doporučené literatury:

Rakov, Vladimír A. Lightning: physics and effects. New York: Cambridge University Press, 2002. 687 s. ISBN 0-521-58327-6.  
Beroual, Abderrahmane and Fofana, Issouf. Discharge in Long Air Gaps - Modelling and applications. IOP, 2016. DOI 10.1088/978-0-7503-1236-3.  
Dwyer, Joseph and Uman, Martin. The physics of lightning. Physics Reports, 2013. 534. 10.1016/j.physrep.2013.09.004.

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: **15.02.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **15.08.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **22.09.2024**

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

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
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 předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem č. 1/2009 *O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.*

V Praze dne .....

.....

Podpis autora práce



## **Poděkování**

Tímto bych velmi rád poděkoval panu Ing. Janu Mikešovi, Ph.D. za odborné vedení, konstruktivní poznámky a zejména za trpělivost a ochotu během vytváření mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Ondřeji Hanušovi, Ph.D. za konzultaci a pomoc s praktickou částí. Můj dík patří i mé rodině za její podporu během mého studia.

## Abstrakt

Diplomová práce se věnuje problematice bleskových a elektrických výbojů a jejich umělému spouštění. Nejprve jsou představeny základní koncepty bleskových výbojů včetně procesu jejich vzniku. Dále se práce zaměřuje na techniky spouštění bleskových výbojů zahrnující využití raket a laserů. Následně je popsána metoda, jak lze bleskové výboje uměle simulovat pomocí elektrických výbojů na jiskřišti. V praktické části je představen vlastní návrh spouštění elektrických výbojů na malém jiskřišti pomocí laserového paprsku. V poslední ekonomické části je uvedeno ocenění návrhu a následně jeho porovnání z pohledu výdajů na provoz s konvenční metodou spouštění výbojů.

**Klíčová slova:** Bleskový výboj, elektrický výboj, umělé spouštění výbojů, laser, cena návrhu

## Abstract

The diploma thesis deals with the theme of lightning and electric discharges and their artificial triggering. First, the basic concepts of lightning discharges are introduced, including the process of their generation. Next, the thesis focuses on artificial lightning discharge triggering techniques involving the use of rockets and lasers. Subsequently, a method of how lightning discharges can be artificially simulated using electrical discharges on a spark gap is also described. The practical part describes the actual design of triggering electrical discharges on a small spark gap using a laser beam. In the last economic part, the design is priced and then compared in terms of operating costs with the conventional method of triggering the discharges.

**Keywords:** Lightning discharge, electric discharge, artificial discharge triggering, laser, design price



# Seznam obrázků

Obrázek 1: Bleskové výboje [1].....	2
Obrázek 2: Schéma struktury bouřkového oblaku [2].....	3
Obrázek 3: Výsledná intenzita elektrického pole bouřkového oblaku a její složky [2].....	3
Obrázek 4: Průběh intenzity elektrického pole ve vzdálenosti 5 km od bouřky [2] .....	4
Obrázek 5: Schéma nabití hydrometeoru [2] .....	5
Obrázek 6: Rozložení náboje v bouřkovém oblaku tvaru kovádlina [4] .....	6
Obrázek 7: Typy CG výbojů [2].....	6
Obrázek 8: Další typy výbojů [6] .....	7
Obrázek 9: Proces vzniku bleskového kanálu [11] .....	8
Obrázek 10: Stupňovitý výboj.....	9
Obrázek 11: Vývoj vzestupných výbojů .....	9
Obrázek 12: Postupný posun záporného náboje do země .....	10
Obrázek 13: Zpětný výboj.....	10
Obrázek 14: Šípové výboje .....	11
Obrázek 15: Kladné výboje .....	12
Obrázek 16: Vzestupné výboje [12] .....	12
Obrázek 17: Conventional breakdown [13].....	14
Obrázek 18: Runaway breakdown [13] .....	15
Obrázek 19: Hybrid breakdown [13] .....	16
Obrázek 20: Klasické spouštění [2] .....	19
Obrázek 21: Bleskový výboj spuštěný raketou [2] .....	19
Obrázek 22: Výškové spouštění [2] .....	20
Obrázek 23: Zesílení vzestupného lideru [2].....	20
Obrázek 24: Návrh laserového spouštění výbojů [2] .....	21
Obrázek 25: Laserový filament [16] .....	22
Obrázek 26: Laserová filamentace [16].....	22
Obrázek 27: Spouštění bleskových výbojů laserovým paprskem [17].....	23
Obrázek 28: Spuštěný bleskový výboj laserovým paprskem [17] .....	23
Obrázek 29: Vývoj spuštěného výboje [17] .....	24
Obrázek 30: Proudový impuls zpětného výboje a následných výbojů [18] .....	26
Obrázek 31: Průběh proudu dlouhého výboje [18].....	26
Obrázek 32: Možné průběhy sestupných bleskových výbojů [18] .....	26
Obrázek 33: Možné průběhy vzestupných bleskových výbojů [18] .....	27
Obrázek 34: Schéma jiskřiště .....	27
Obrázek 35: Elektrický výboj mezi rovinnými elektrodami [19].....	27
Obrázek 36: Trigatron [20] .....	28
Obrázek 37: Laserem navedený výboj mezi kulovými elektrodami [21] .....	28
Obrázek 38: Návrh laserového spouštění elektrických výbojů .....	29
Obrázek 39: Detail spouštění laseru.....	29
Obrázek 40: Detail elektrod.....	30
Obrázek 41: Detail otvoru pro laserový paprsek.....	30
Obrázek 42: Detail spuštěného laseru.....	31
Obrázek 43: Schéma zapojení.....	31
Obrázek 44: Tabulka experimentálně změřeného přeskokového napětí [22].....	32
Obrázek 45: Graf závislosti přeskokového napětí na vzdálenosti elektrod .....	34
Obrázek 46: Schématické zobrazení laserového paprsku v ose elektrod .....	35
Obrázek 47: Detail laserového paprsku v ose elektrod .....	35
Obrázek 48: Detail spouštění výbojů laserovým paprskem v ose elektrod .....	36
Obrázek 49: Graf závislosti přeskokového napětí na vzdálenosti elektrod pro záporný výboj.....	37
Obrázek 50: Graf závislosti přeskokového napětí na vzdálenosti pro kladný výboj.....	37
Obrázek 51: Detail laserového paprsku kolmo k ose elektrod.....	38
Obrázek 52: Detail poškozené elektrody.....	39
Obrázek 53: Graf závislosti rozdílu ročních výdajů na ceně laserového návrhu .....	47
Obrázek 54: Graf závislosti rozdílu ročních výdajů na úspěšnosti trigatronu .....	47

Obrázek 55: Graf závislosti na hodinové sazbě zaměstnance .....	48
Obrázek 56: Graf závislosti rozdílu ročních výdajů na živostnosti trigatronu .....	49
Obrázek 57: Graf závislosti NPV výdajů středního výzkumu na nominálním diskontu .....	51
Obrázek 58: Graf závislosti rozdílu NPV na nominálním diskontu .....	51
Obrázek 59: Graf závislosti rozdílu NPV na ceně laserového návrhu .....	52
Obrázek 60: Graf závislosti rozdílu NPV na úspěšnosti trigatronu .....	52
Obrázek 61: Graf závislosti rozdílu NPV na hodinové sazbě zaměstnance .....	53
Obrázek 62: Graf závislosti NPV na živostnosti trigatronu .....	53

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Naměřené hodnoty přeskokového napětí pro obě polarity výbojů .....	33
Tabulka 2: Přepočítané hodnoty přeskokového napětí .....	34
Tabulka 3: Procentuální snížení přeskokového napětí díky laserovému paprsku .....	38
Tabulka 4: Součástky pro laserový návrh .....	40
Tabulka 5: Všechny položky pro ocenění laserového návrhu .....	41
Tabulka 6: Časová náročnost a náklady na zaměstnance pro laserový návrh .....	45
Tabulka 7: Časová náročnost a náklady na zaměstnance pro trigatron .....	45
Tabulka 8: Rozdíl hodnot z Tabulky 6 a Tabulky 7 .....	45
Tabulka 9: Výsledné hodnoty ročních nákladů pro obě varianty .....	46
Tabulka 10: Časová náročnost a náklady na zaměstnance pro laserový mechanismus .....	49
Tabulka 11: Časová náročnost a náklady na zaměstnance pro trigatron .....	50
Tabulka 12: Rozdíl hodnot z Tabulky 10 a Tabulky 11 .....	50
Tabulka 13: Výsledné hodnoty NPV obou variant .....	50
Tabulka 14: Všechny položky pro ocenění levnějšího laserového návrhu .....	54
Tabulka 15: Výsledné hodnoty ročních nákladů pro levnější laserový návrh .....	55
Tabulka 16: Výsledné hodnoty NPV pro levnější laserový návrh .....	55

# Obsah

Úvod .....	1
<b>1. Fenomenologie bleskového výboje.....</b>	<b>2</b>
1.1.    Bouřkový oblak .....	2
1.1.1.  Elektrifikace oblaku .....	4
1.2.    Typy bleskových výbojů.....	6
1.3.    Proces vzniku kanálu bleskového výboje.....	8
1.3.1.  Počáteční průraz.....	13
<b>2. Studium bleskových výbojů.....</b>	<b>17</b>
2.1.    Důvody studia bleskových výbojů.....	17
2.2.    Umělé spouštění bleskových výbojů.....	18
2.2.1.  Rakety .....	18
2.2.2.  Lasery.....	21
2.3.    Pozitiva a negativa metod .....	24
2.3.1.  Rakety .....	24
2.3.2.  Lasery.....	24
2.4.    Simulace bleskových výbojů v laboratoři .....	25
<b>3. Vlastní návrh.....</b>	<b>29</b>
3.1.    Návrh .....	29
3.2.    Měření.....	31
3.2.1.  Přeskokové napětí .....	31
3.2.2.  Ověření funkčnosti jiskřiště.....	32
3.2.3.  Spouštění výbojů pomocí laserového paprsku v ose elektrod .....	35
3.2.4.  Spouštění výbojů pomocí laserového paprsku kolmo k ose elektrod .....	38
3.3.    Závěr praktické části.....	38
<b>4. Ekonomické zhodnocení .....</b>	<b>40</b>
4.1.    Ocenění mého návrhu .....	40
4.2.    Porovnání mého návrhu s konvenční metodou.....	41
4.2.1.  NPV.....	41
4.2.2.  Předpoklady pro modely provozu .....	42
4.2.3.  Porovnání metod v ročním provozu .....	45
4.2.4.  Porovnání metod ve víceletém provozu.....	49

4.2.5. Možnost zlevnění laserového mechanismu.....	54
4.3. Závěr ekonomické části .....	55
<b>5. Závěr.....</b>	<b>58</b>
<b>Použitá literatura.....</b>	<b>60</b>

# Úvod

---

Bleskové výboje jsou fascinujícím přírodním jevem, který patří mezi nejzázračnější a zároveň nejdestruktivnější projevy elektrické aktivity v atmosféře. Tyto ohromující výboje elektrické energie, doprovázené záblesky světla a hromovým zvukem, nás provázejí během bouřek a jsou neoddělitelnou součástí našeho života. Jejich původ, mechanismy vzniku a dopady na životní prostředí tvoří složitý a stále zkoumaný fenomén, který vyvolává nejen zvědavost, ale i obavu lidí po celém světě.

Bleskové výboje jsou prozatím stále náhodné jevy, které je proto velmi složité studovat. Vědci se snaží najít způsoby, jak tuto náhodnou složku bleskových výbojů eliminovat a uměle je spouštět. Umělé spouštění bleskových výbojů patří mezi inovativní přístupy, které napomáhají rozluštit tajemství přírodních výbojů. Tato technika je vyvíjena za účelem zkoumání a kontrolování bleskových jevů, otevírá dveře k novým možnostem ve vědeckém výzkumu, v energetice i v ochraně proti požárům a dalším oblastem. Umělé spouštění bleskových výbojů spojuje znalosti z fyziky atmosféry, elektrotechniky a dalších inženýrských disciplín.

V mé diplomové práci představím současné vnímání bleskových výbojů a mechanismy, které probíhají při jejich vzniku a dále při jejich formování. Ve druhé části se věnuji dvěma hlavním směrům, kterými se vědci ubírají při zkoumání bleskových výbojů. Zaměřím se hlavně na spouštění bleskových, respektive elektrických, výbojů pomocí laserových paprsků. Při současném technickém pokroku jsou vyvíjeny stále výkonnější lasery, které dokáží svými paprsky ionizovat vzduch. A proto se nabízí laserové paprsky jako jedna z možností, jak navádět či dokonce spouštět bleskové výboje.

V praktické části převedu tuto myšlenku do laboratorních podmínek a představím můj vlastní návrh laserového spouštění elektrických výbojů na malém jiskřišti. Tento návrh slouží především k ověření, že laserový mechanismus dokáže spouštět elektrické výboje. V poslední ekonomické části analyzuji můj návrh z ekonomického hlediska, a to zejména z pohledu porovnání v provozu s konvenční metodou spouštění elektrických výbojů. V tomto rozboru určím, za jakých podmínek by byl uvedený laserový mechanismus výhodnější než stávající konvenční metoda.

# 1. Fenomenologie bleskového výboje

---

Bleskový výboj je přírodní atmosférický jev, při kterém vzniká elektrický výboj mezi dvěma elektricky nabitými oblastmi oblaku, mezi jednotlivými oblaky, respektive mezi oblakem a zemským povrchem. Ojedinelými nejsou ani výboje mezi oblaky a horními vrstvami atmosféry. Původci bleskových výbojů jsou typické bouřkové mraky, nazývané souhrnně cumulonimby. Podle přenášeného náboje lze také blesky rozdělit na kladné a záporné. Blesky produkují nejjasnější světlo a nejhlasitější zvuk, které se běžně vyskytují na planetě Zemi. Bleskový kanál se vystavuje při rychlosti 220 000 km/h a jeho teplota se pohybuje okolo 30 000 K, výbojem protéká průměrný proud 30 000 A a do blízkého okolí je dispergována energie až 400 MJ. Bleskový výboj je složen z řady posloupných a integrálně navazujících jevů s odlišnými fyzikálními vlastnostmi. Přestože je výzkumu bleskových výbojů věnována v odborných komunitách důsledná pozornost, jejich obtížně predikovatelný výskyt, různá četnost a extrémní energetické hodnoty, kterých dosahují při svém formování, zapříčiňují, že fyzika související s jejich výstavbou představuje stále mnoho otevřených vědeckých a badatelských témat.



*Obrázek 1: Bleskové výboje [1]*

## 1.1. Bouřkový oblak

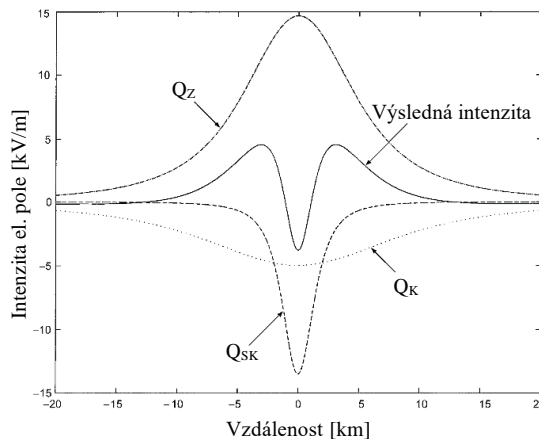
Bleskové výboje vznikají z bouřkového oblaku zvaný cumulonimbus. Jedná se o mohutný oblak, který má charakteristické rozložení náboje uvnitř svého objemu. Jeho dislokace má nejčastěji bipolární nebo tripolární podobu. Bipolární struktura je charakteristická dvěma hlavními nábojovými centry uvnitř oblaku, tzv. horním centrem kladného náboje a dolním centrem záporného náboje. Tato struktura převažuje v raných stádiích cumulonimbu. V tripolární struktuře rozložení náboje v cumulonimbu se mimo dvě hlavní centra kladného a záporného náboje vyskytuje i další spodní centrum kladného náboje. Tato struktura se objevuje především ve vyspělých fázích cumulonimbu, kdy oblak dosahuje maximálního rozvoje. Všechna centra se

nacházejí při teplotách pod bodem mrazu. Struktura rozložení náboje je velmi důležitá, jelikož rozdíl mezi kladným a záporným nábojem vytváří elektrické pole a formuje tak podmínky pro vznik bleskových výbojů. Tripolární struktura má větší rozmanitost náboje a generuje tak intenzivnější elektrické pole, které podporuje vznik silnějších výbojů. [2] [3]



**Obrázek 2:** Schéma struktury bouřkového oblaku [2]

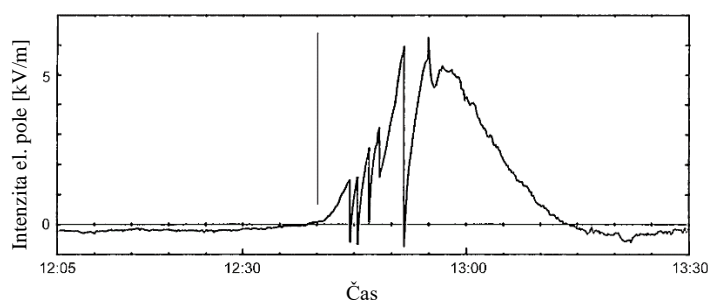
V tripolární struktuře rozložení náboje v cumulonimbu se horní oblasti kladného náboje (ve výšce přibližně 12 km) a oblasti záporného náboje (ve výšce přibližně 7 km) také říká hlavní centrum kladného a záporného náboje. Tato centra často mají stejnou velikost náboje, avšak s opačnou polaritou a tvoří elektrický dipól. Spodní oblast kladného náboje (ve výšce přibližně 2 km) již ale dosahuje nižších hodnot náboje. Zatímco v hlavních centrech je velikost náboje přibližně 40 C, tak ve spodní oblasti jsou to přibližně 3 C náboje. V některých oblacích nemusí vzniknout uvedené tři oblasti, pak se jedná o bipolární strukturu rozložení náboje v cumulonimbu. [2]



**Obrázek 3:** Výsledná intenzita elektrického pole bouřkového oblaku a její složky [2]

Výsledná intenzita elektrického pole bouřkového oblaku s tripolární strukturou se skládá ze tří složek, dvou od kladných center náboje ( $Q_K$  – složka od horního hlavního centra kladného náboje,  $Q_{SK}$  – složka od spodního centra kladného náboje) a jedna složka je tvořena záporným centrem náboje ( $Q_Z$  – složka od hlavního centra záporného náboje). Každé z center náboje je v oblaku

jinak vysoko, proto se také podílí jinou měrou na výsledné celkové intenzitě. Na Obrázku 3 je vidět, že složka intenzity ( $Q_K$ ) od horního hlavního centra kladného náboje má nejmenší vliv na výsledné elektrické pole, jelikož toto centrum kladného náboje se nachází v nejvyšších částech oblaku. Naopak složka intenzity ( $Q_{SK}$ ) od spodního kladného náboje má již větší vliv na výslednou intenzitu elektrického pole celého oblaku, nicméně tato složka se projeví pouze v malých vzdálenostech od oblaku, jelikož toto spodní centrum kladného náboje obsahuje výrazně méně náboje než horní hlavní centrum kladného náboje. Výsledná intenzita elektrického pole celého oblaku je tak dána součtem třech složek od všech tří center náboje. Tato výsledná intenzita elektrického pole je převážně kladná až na místo přímo pod oblakem a jeho blízkého okolí, kde je výsledná intenzita záporná zejména kvůli složce intenzity od spodního centra kladného náboje. [2]



**Obrázek 4:** Průběh intenzity elektrického pole ve vzdálenosti 5 km od bouřky [2]

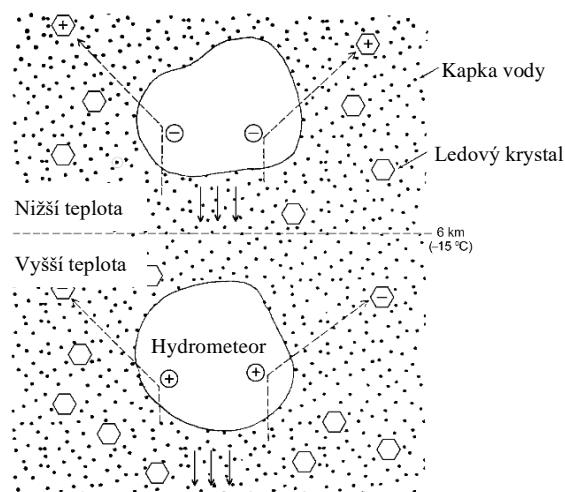
Celková intenzita pole pod bouřkovým oblakem se v průběhu bouřky dynamicky mění v závislosti na bleskové aktivitě a místě měření intenzity. Časový průběh intenzity elektrického pole přibližně 5 km od malé bouřky je zobrazen na Obrázku 4. Intenzita pole by na tomto místě měla být podle Obrázku 3 kladná, což naměřený průběh intenzity potvrzuje. Prudké změny intenzity v okolí oblaku jsou způsobeny bleskovými výboji. [2]

### 1.1.1. Elektrifikace oblaku

Elektrifikací oblaku rozumíme proces, při kterém se v atmosférickém oblaku vytváří a odděluje elektrický náboj. Tento proces je klíčový pro vznik bleskových výbojů a dalších elektrických jevů spojených s bouřkami. Pro elektrifikaci oblaku jsou důležité dva mechanismy, prvním je elektrické nabití hydrometeorů a druhým je jejich prostorové rozdělení podle jejich polarity. Tyto dva mechanismy probíhají v naprosto odlišných měřítkách, první probíhá v mikrosvětě molekul, kdežto druhý probíhá ve vzdálenostech až jednotek kilometrů. Hydrometeorem se označuje jakýkoliv vodní nebo ledový materiál vyskytující se v atmosféře nebo na povrchu Země vzniklý kondenzací nebo sublimací. Jedná se zejména o vodní částice, které jsou ve formě kapiček, kapek, krystalů nebo zmrzlých částic součástí atmosférických oblaků a srážek. [2] [3]



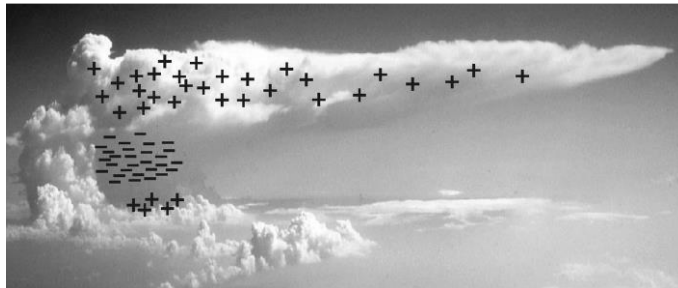
V neinduktivním procesu elektrifikace oblaku sehrává nejdůležitější úlohu jeho prostřední část, kde se nachází smíšená oblast ledových krystalků a vodních kapek, které jsou ochlazené pod bod mrazu, nicméně nemohou zmrznout. Při nasycení vzduchu je relativní vlhkost 100 % a kondenzace a odpařování jsou rovnocenné. Vodní pára se poté může změnit přímo na led a podchlazené vodní kapky mohou zmrznout. Kondenzace vodních kapek a tvorba ledových krystalů je snazší, pokud pro jejich základ existuje již určité „jádro“. Tímto jádrem mohou být např.: ionty stříbra, kaolinity či bakterie. Ve vlhkém prostředí oblaku jsou ledové krystalky schopné růst rychleji než kapky vody. Ledové krystalky se totiž odpařují pomaleji než kapky vody, ale vodní pára na nich kondenzuje stejnou rychlostí, důsledkem toho se ledové krystaly zvětšují. Tyto krystaly pak padají nebo naráží do podchlazených kapek vody, které se na nich zachytí a zamrznou. Ledový krystal úplně pokrytý zmrzlými kapkami se nazývá grapel, krupa nebo sněhová peleta, obecně hydrometeor. [3]



**Obrázek 5:** Schéma nabití hydrometeoru [2]

Těžké hydrometeory jsou gravitací stahovány směrem dolů prostředím oblaku, kde se vyskytují ledové krystalky a podchlazené kapičky vody. Podchlazené kapičky vody po kontaktu s ledovým povrchem zmrznou a zůstanou přichycené k povrchu. Z laboratorních experimentů je dokázáno, že pokud je teplota pod kritickou hodnotou, tak padající hydrometeor končí po kolizi s ledovým krystalem se zápornou polaritou náboje. Naopak pokud je teplota vyšší než kritická hodnota, tak hydrometeor naopak končí kladnou polaritou náboje. Kritická hodnota teploty se pohybuje od -20 °C do -10 °C. Ve výšce 6 km je tato kritická teplota kolem -15 °C. V nižších částech oblaku je teplota okolí vyšší, kladně nabitě hydrometeory padají dolů a tvoří spodní oblast kladného náboje, zatímco záporně nabitě ledové krystalky se shromažďují v prostřední části oblaku. Ve vyšších částech oblaku je teplota okolí naopak nižší než kritická a padající hydrometeory získávají záporný náboj, ledové krystalky jsou nabitě kladně a zůstávají v horní části oblaku. Vrchní oblast kladného náboje je tvořena ledovými krystalky. V této části oblaku způsobují

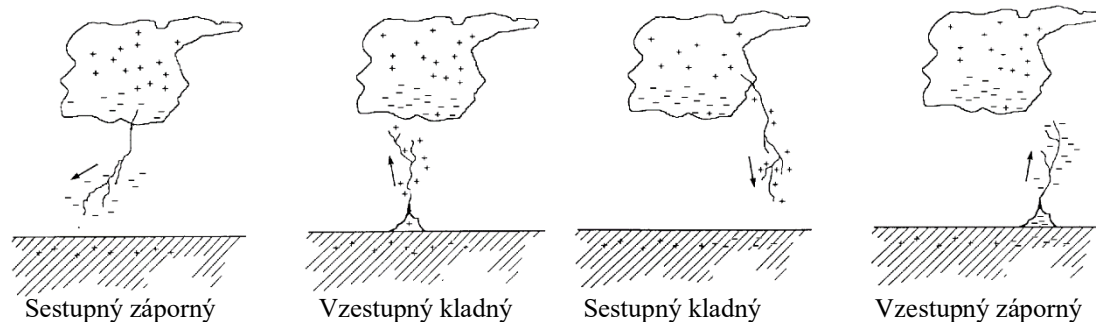
vertikální stoupavé proudy a proudy ve vyšších vrstvách atmosféry vodorovné rozptření ledových krystalů, proto tato část oblaku získává svůj charakteristický tvar, podle kterého se nazývá *kovadlina*. Oblast záporného náboje pak vznikne v prostřední části oblaku a je tvořena záporně nabitými hydrometeory a ledovými krystalky. [2] [3]



**Obrázek 6:** Rozložení náboje v bouřkovém oblaku tvaru kovadlina [4]

## 1.2. Typy bleskových výbojů

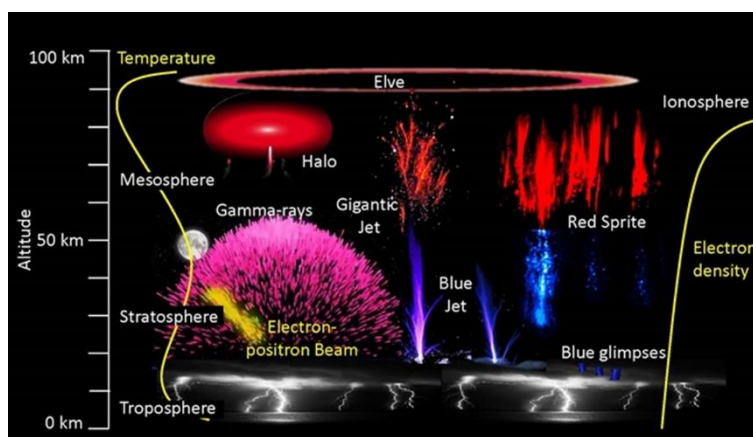
Bleskové výboje lze dělit podle dvou základních kritérií: podle místa výskytu a polarity přenášeného náboje. Dle místa výskytu lze výboje rozdělit na dva základní druhy: výboj mezi zemí a oblakem (CG – Cloud to Ground) a výboj uvnitř oblaku (IC – Intra Cloud), dle polarity přenášeného jsou výboje kladné nebo záporné. Dále lze výboje dělit dle směru přenosu náboje na vzestupné a sestupné. CG výboje pak jsou čtyř typů: záporný sestupný výboj, záporný vzestupný výboj, kladný sestupný výboj a kladný vzestupný výboj. [2]



**Obrázek 7:** Typy CG výbojů [2]

Pozorování bleskové aktivity ukazuje, že okolo 90 % všech CG výbojů jsou sestupné negativní výboje, 10 % a méně jsou sestupné kladné výboje. Vzestupné výboje se objevují pouze na vysokých objektech vyšších než 100 m a také na špičkách hor. [2]

Kladné výboje jsou častější v bouřích, kde je vertikální stříh větru. V těchto bouřkách se vyskytují rychlejší větry ve vyšších úrovních než v nižších nadmořských výškách, to způsobuje, že se horní centrum kladného náboje posune do strany z pozice přímo nad hlavním centrem záporného náboje. Z této pozice je pak pro výboj snazší se rozvíjet směrem z mraku k zemi. Kladné výboje jsou také častější v bouřích ve vysokých zeměpisných šířkách, kde je centrum kladného náboje blíže k zemi, dále v zimních bouřích, v těchto bouřích je centrum kladného náboje také blíže k zemi a také zde může být přítomen vertikální stříh větru, dále na konci letních častých bouřek, v těchto bouřích se oblak naopak může naklonit nebo může vzniknout deformovaná kováldina a pozitivní náboj tak může být odfouknut od hlavní části oblaku. Tento jev je dále také pozorovatelný v bouřích s obrácenou distribucí náboje. [3] [5]



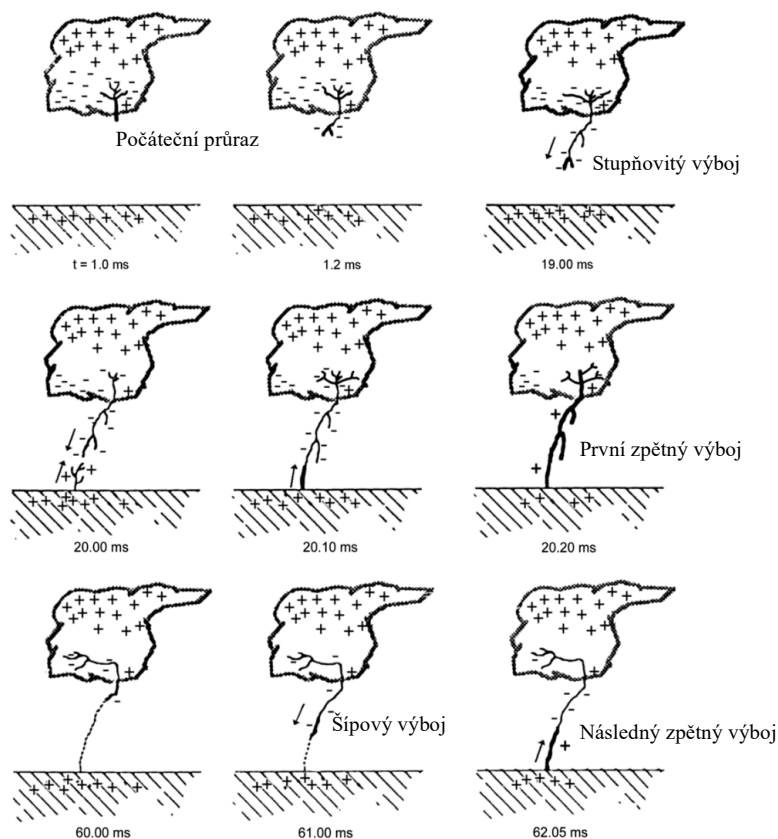
*Obrázek 8: Další typy výbojů [6]*

Mimo tyto základní typy bleskových výbojů existuje převážně ve vyšších vrstvách atmosféry i mnoho dalších jiných druhů výbojů jako jsou např.:

- Skříťci (Spirites) jsou elektrické výboje ve tvaru červených sloupů sahajících až do výšky 100 km nad vrchol bouřkového oblaku. Vyskytují se vysoko nad aktivními bouřkami ve spojení s CG bleskovými výboji a trvají pouze několik sekund. [7]
- Elfové (Elves) jsou diskovité zářivé oblasti o průměru až 500 km, které se rychle rozšiřují. Trvají méně než tisícinu sekundy a vyskytují se v místech nad oblastmi aktivních CG bleskových výbojů. [7]
- Modré výtrysky či záblesky (Blue Jets, Blue Glimpses) jsou úzké modré kuželové výboje vystupující z vrcholu oblaku. Obvykle trvají pouze zlomek sekundy a ve výšce 40–50 km se ztrácejí. [7]
- Obří výtrysky (Gigantic Jets) jsou silné výboje elektrického náboje vystupující z vrcholku oblaků směrem vzhůru do spodní části ionosféry. [8]

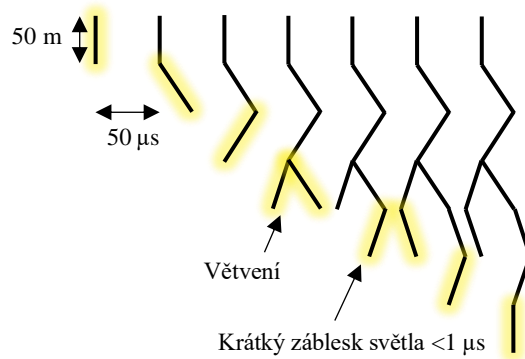
- Haló (Halo) se projevuje jako kužel světelného záření ve výškách kolem 85 km, který je způsobený kvazistatickým elektrickým polem CG blesků a dlouhých výbojů. [9]
- Gama záblesky (Gamma-rays) jsou krátké záblesky energetického gama záření, které jsou spojovány s bleskovou aktivitou. Vznikají v atmosféře a jsou pozorované družicemi na nízké oběžné dráze Země. [10]

### 1.3. Proces vzniku kanálu bleskového výboje



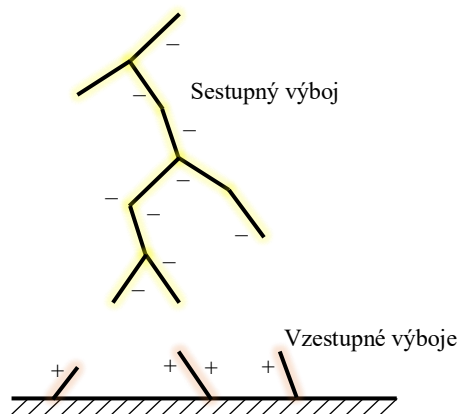
Obrázek 9: Proces vzniku bleskového kanálu [11]

Nejběžnější sestupný CG výboj nesoucí negativní náboj začíná lokálním výbojem, který se označuje jako počáteční průraz (*preliminary breakdown*). Tato počáteční fáze bleskového výboje ještě není zcela prozkoumána, existuje více teorií, jak počátek samotného bleskového výboje probíhá, tyto teorie uvádím v Kapitole 1.3.1. Tento lokální výboj uvolní elektrony, které byly v hydrometeorech. Elektrony mají oproti atomům a molekulám v ionizovaném vzduchu, a také nabitým hydrometeorům, velmi malou hmotnost a jsou proto velmi pohyblivé. Volné elektrony překonají spodní část kladně nabitého oblaku, kterou značně zneutralizují a pokračují dál v cestě k zemi. Z oblaku se směrem k zemi začne vytvářet záporně nabitý výboj nazývaný stupňovitý výboj. [11]



**Obrázek 10:** Stupňovitý výboj

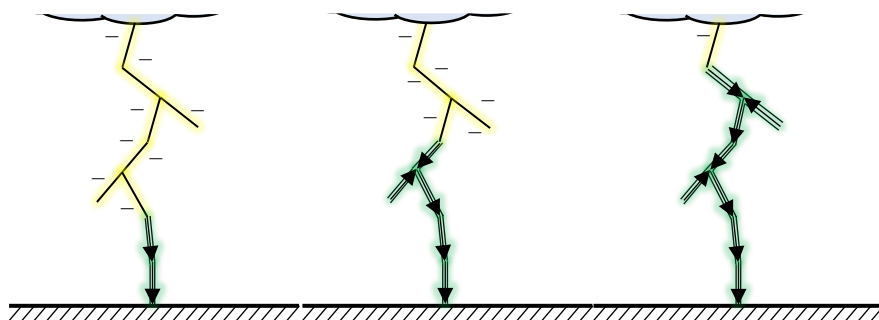
Vývoj stupňovitého výboje není kontinuální, výboj postupuje po krocích o délce asi 50 m každých 50  $\mu\text{s}$ . Jeden krok (výboj o délce 50 m) se utvoří za dobu kratší než 1  $\mu\text{s}$ , jak je vidět na Obrázku 10. Stupňovitý výboj se cestou k zemi rozvětňuje a v celém jeho objemu je uchován záporný náboj, který se postupně přibližuje k zemi. Průměrná sestupná rychlost špičky výboje je kolem  $2 \cdot 10^5$  m/s, celý výboj k zemi se vytvoří za zhruba 20 ms. Pulzující proudy při vzniku jednotlivých kroků stupňovitého výboje dosahují velikostí řádově kiloampér s dobou trvání řádově několik milisekund. Každý tento krok generuje viditelné záření, puls radiofrekvenční energie a puls rentgenového záření. Když je stupňovitý výboj blízko zemi, jeho relativně velký záporný náboj indukuje kladný náboj ze země speciálně z objektů nad jejím povrchem. Pokud má kladné indukované pole dostatečnou intenzitu, začne se vyvíjet kladný vzestupný výboj. Kanál pro bleskový proud mezi bouřkovým oblakem a zemí je vytvořen, když se spojí větve sestupného záporného a vzestupného výboje. [11]



**Obrázek 11:** Vývoj vzestupných výbojů

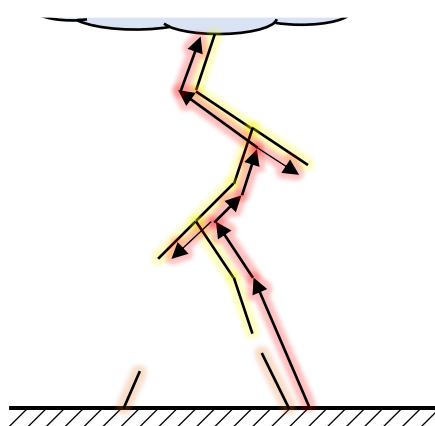
Po vytvoření kanálu se začne od jeho spodní části prudce přesouvat záporný náboj směrem do země, to způsobí velké proudy a také to velmi silně rozsvítí kanál blízko země. Tato fáze bleskového výboje se nazývá zpětný výboj. Při této fázi se místo velké svítivosti stejně jako proud

posouvá směrem vzhůru, rychlost tohoto posunu se pohybuje od jedné třetiny až po jednu polovinu rychlosti světla. Hlavním kanálem se elektrony pohybují směrem dolů, takže proud teče směrem nahoru. Elektrony ve vedlejších větvích proudí směrem ven a dolů, až poté co zpětný výboj překročí jednotlivou větev. Několik milisekund po zpětném výboji se může případně přesunout do země zbytkový záporný náboj ze stupňovitého výboje. Proud může také téct přímo z centra záporného náboje v oblaku do země, až se do oblaku dostane zpětný výboj. [11]



*Obrázek 12: Postupný posun záporného náboje do země*

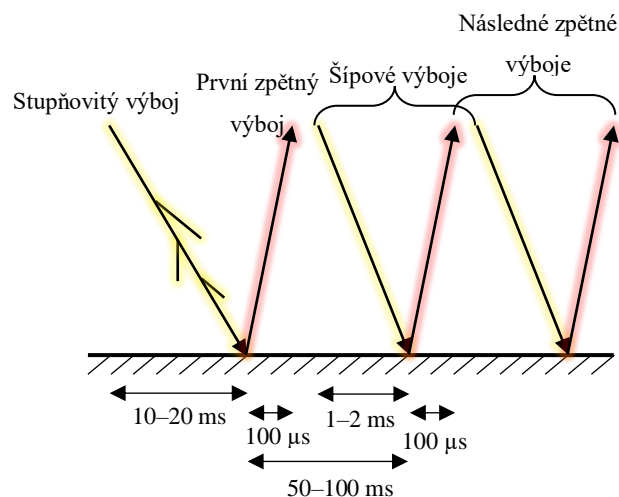
Zpětný výboj vytvoří velmi jasný a žhavý kanál, který lze běžně pozorovat. Maximální teplota kanálu se může blížit 30 000 °C. Oko běžného pozorovatele nedokáže rozpoznat jednotlivé intervaly tvoření stupňovitého výboje a následný vývoj zpětného výboje, a proto se zdá být tento proces jako okamžitý. Pro sledování jednotlivých kroků bleskového výboje je proto třeba využít vysokorychlostních kamer. Pozorovatel naopak dokáže velmi spolehlivě zaregistrovat hrom. Hrom je tlaková vlna způsobena expanzí proudem rozžhaveného vzduchu uvnitř kanálu. [11]



*Obrázek 13: Zpětný výboj*

Po prvním zpětném výboji přestane téct proud a bleskový výboj se ukončí, jedná se tak o blesk pouze s jedním výbojem. Avšak okolo 80 % záporných výbojů způsobí více než jeden zpětný

výboj. Jednotlivé výboje jsou mezi sebou zpožděny o 40 až 50 ms. Následné výboje jsou zahájeny jen v případě, pokud je dostupný další negativní náboj za kratší dobu než 100 ms od konce předešlého výboje. Pokud je další záporný náboj dostupný, vytvoří se v místě zaniklého kanálu zpětný výboj směrem k zemi – šípový výboj (obdoba stupňovitého výboje), který má opět ve svém objemu záporný náboj. Šípový výboj se oproti stupňovitému výboji vytvoří rychleji, přibližně za jednotky milisekund. Šípový výboj v sobě uchová méně záporného náboje než stupňovitý výboj, do země se tak přesune méně náboje a následné proudy dosahují nižších hodnot. Proudů prvního výboje dosahují hodnot okolo 30 kA, zatímco proudy následných výbojů okolo 10 až 15 kA. Nárůst proudu následného výboje (řádově 0,1  $\mu$ s) je rychlejší než nárůst proudu prvního výboje (jednotky mikrosekund). První výboj záporného CG výboje je značně rozvětvený, jelikož kopíruje cestu utvořenou stupňovitým výbojem, která je rozvětvená. Následné výboje již nejsou rozvětvené, jelikož šípový výboj kopíruje pouze hlavní kanál předešlého výboje. Přesto se některé následné výboje mohou vytvořit na nové cestě a třetina až polovina CG výbojů tak mohou zemi zasáhnout na jiném místě. [11]

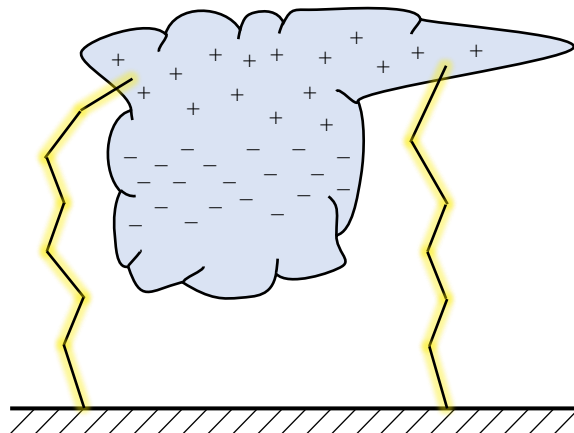


**Obrázek 14:** Šípové výboje

CG výboje běžně přenesou 30 C záporného náboje z jeho centra uprostřed bouřkového oblaku do země. Tento náboj je transferován pomocí několika výbojů a dlouhého výboje vycházejícího z centra náboje v oblaku po výboji. Celý děj trvá řádově desetiny sekundy. Po odeznění většiny dlouhých výbojů se vytvoří následný výboj. Polovina všech CG výbojů obsahuje alespoň jeden dlouhý výboj trvající déle než 40 ms. Čas mezi následnými výboji se může počítat až na desítky milisekund, pokud proud dlouhého výboje prochází kanálem předchozího výboje. Nový šípový výboj může vzniknout, až když přestane téct veškerý proud kanálem. Zatímco stupňovitý a zpětný výboj přenáší náboj ve dvou krocích, nejprve je záporný náboj přesunut ze shora do spodu kanálu

a následně se odtud přenese do země, dlouhý výboj transferuje záporný náboj poměrně konstantně z centra náboje do země. [11]

Kladný sestupný výboj přenáší kladný náboj z horního nebo spodního centra kladného náboje v oblaku k zemi. Kroky stupňovitého kladného výboje jsou oproti zápornému typicky méně zřetelné. Obecně je jeho výskyt méně častý, ale jeho proudy mohou dosáhnout až 300 kA, což je více než u záporných sestupných výbojů (až 100 kA). Tento typ výboje je tak více nebezpečný a je s ním třeba také počítat při navrhování bleskových ochran. [11]



**Obrázek 15:** Kladné výboje

U vzestupných CG výbojů je první výboj tvořen ve směru ze země k oblaku. Jakmile výboj dosáhne oblaku, tak nenastane jako u sestupných výbojů zpětný výboj, ale vznikne spojení mezi centrem náboje v oblaku a zemí. Po vytvoření tohoto spojení se generuje výboj, který je vyvolaný sestupným šípovým výbojem a je stejný jako následné zpětné výboje CG výbojů. Vzestupný výboj je na první pohled možné rozeznat podle směru rozvětvení. U vzestupného výboje (Obrázek 16) je viditelné, že se bleskový kanál rozvětňuje směrem vzhůru, zatímco u sestupného výboje (Obrázek 1) se kanál rozvětňuje směrem dolů. [11]



**Obrázek 16:** Vzestupné výboje [12]



### 1.3.1. Počáteční průraz

Jednou z největších záhad bleskového výboje je jeho samotný počátek, který se v literatuře označuje jako počáteční průraz. Měření vertikálních elektrických polí dokazují, že maximální hodnota elektrického pole v bleskovém oblaku je o řád nižší než hodnota dielektrické pevnosti vzduchu. Z toho by vyplývalo, že elektrické pole bouřkového oblaku není dostatečně silné pro vyvolání bleskového výboje. Pro vznik bleskového výboje tak musí v bouřkovém mraku probíhat ještě další procesy, které vedou k dostatečnému zesílení elektrického pole, a to až k průrazným hodnotám. Převažují dva předpoklady, které mohou vyvolat bleskový výboj:

- oblasti nejsilnějšího elektrického pole jsou velmi malé a měřením je nelze zaznamenat,
- před vznikem výboje probíhají v oblaku dále popsané procesy, které dokáží vytvořit podmínky pro vznik samotného výboje. [13]

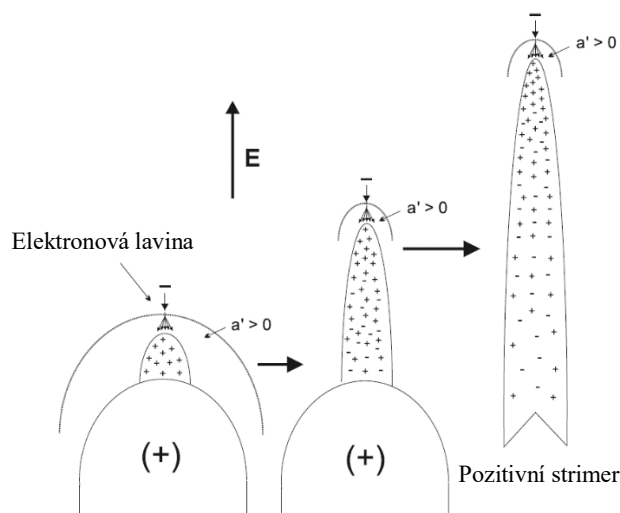
#### 1.3.1.1. *Conventional breakdown*

V tomto mechanismu je bleskový výboj vyvolán za pomoci pozitivních korónových výbojů vycházejících z povrchu srážkových částic a lokálně posílenému elektrickému poli, které podporuje šíření korónového výboje. Pozitivní korónové výboje jsou vhodnější pro vyvolání blesku než negativní korónové výboje, protože se dokáží šířit v podstatně slabším elektrickém poli. [14]

Představa vzniku takového bleskového výboje spočívá v generaci pozitivních strimerů<sup>1</sup> z místa na hydrometeoru, kde hodnota elektrického pole překračuje hodnotu potřebnou pro vznik korónového výboje 2,5 až 9,5 kV/cm. Tyto strimery vytvoří kuželový výboj, který se rozšiřuje podélně. Pro tyto korónové výboje je potřeba, aby okolní elektrické pole bylo schopné podpořit jejich vývoj a aby bylo vyšší než kritická hodnota. Ta byla experimentálně změřena v intenzitách 1,5 kV/cm ve výšce 6,5 km a 2,5 kV/cm ve výšce 3,5 km. Pokud okolní elektrické pole překračuje kritickou hodnotu, jsou korónové strimery posilovány. Jak se tyto pozitivní strimery rozšiřují, tak přenáší narůstající počet pozitivního náboje na špičce kuželového výboje, a zároveň ve svém objemu uchovává stejně se zvětšující počet záporného náboje. Ve výsledku je vytvořen asymetrický kuželový dipól, který slouží k posílení stávajícího elektrického pole na svém vrcholu, který tak představuje vznik pozitivních strimerů na povrchu hydrometeoru. [14]

---

<sup>1</sup> Druhá fáze vývoje elektrického výboje následující po elektronové lavině



**Obrázek 17:** Conventional breakdown [13]

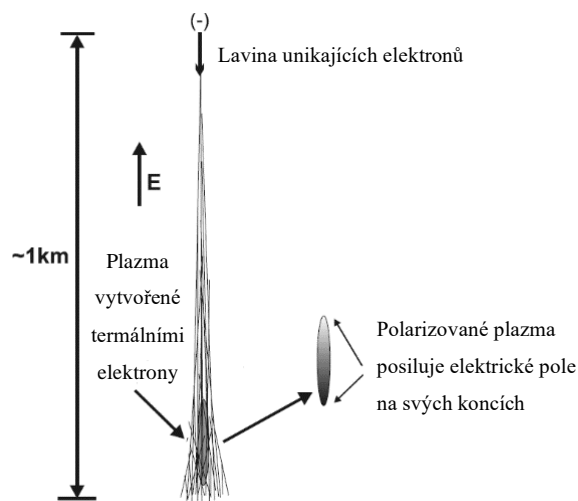
Vývoj pozitivních strimerů v zesíleném elektrickém poli v blízkosti zakřivené anody je ilustrován na Obrázku 17. Elektronová lavina u anody vytváří oblast s kladným nábojem vycházející z jejího povrchu. Na vrcholu oblasti kladného náboje je elektrické pole zesilováno, což způsobuje více elektronových lavin, které dále akumulují kladný náboj a neutralizují dříve vytvořený kladný náboj. V dostatečně silném elektrickém poli může tento proces pokračovat bez omezení, čímž se efektivně šíří kladný náboj. [13]

Dále se také předpokládá, že těchto kuželových výbojů se postupně vytvoří více. Každý další výboj prochází cestu předešlého zaniklého výboje, aby se okolní pole zesílilo natolik, že dojde k průrazu. Bylo změřeno, že ve výšce 6,5 km sekvence tří až sedmi strimerů dokáže lokálně posílit okolní elektrické pole až na 15 kV/cm na vzdálenosti řádově několika metrů. Takto posílené pole je schopné zajistit dielektrický průraz a pravděpodobně i vznik krokového výboje. [14]

### 1.3.1.2. Runaway breakdown

Velký vliv na vyvolání bleskového výboje mohou mít také tzv. unikající elektrony. Tyto elektrony musí získat více energie z elektrického pole při srážkách s částicemi vzduchu, než kolik energie při těchto srážkách ztratí. Hodnota elektrického pole, která musí být překročena pro vznik takovýchto elektronů, závisí na výšce a počáteční energii elektronu. Kritická hodnota elektrického pole exponenciálně klesá s výškou kvůli exponenciálnímu poklesu hustoty molekul vzduchu. Ve výšce 4 až 6 km je tato hodnota 1–1,5 kV/cm, což je o řád nižší než při *conventional breakdown*. [14]

Pro úspěšný vznik výboje pomocí unikajících elektronů jsou potřeba počáteční elektrony s energií vyšší než 0,1 až 1 MeV. Elektrony s tak vysokou energií jsou produkovány v bouřkách při srážkách částic kosmického záření s molekulami vyskytujícími se v atmosféře. Každá vysoce energetická částice kosmického záření je schopna vyprodukovat  $10^6$  až  $10^7$  těchto elektronů procesem, který se nazývá vysokoenergetické spršky. Tyto energetické elektrony mohou uniknout, pokud se nacházejí v regionu bouřkového oblaku, kde je hodnota intenzity elektrického pole vyšší než 1 kV/cm. Pokud je tato oblast vysokého elektrického pole dostatečně velká (v řádu kilometrů), může vzniknout lavina mnoha pomalých uniklých elektronů. Pokud hustota těchto pomalých elektronů překročí kritickou hodnotu na malém objemu, tak elektrická vodivost tohoto objemu může vzrůst až do takové výše, že se zde vytvoří podlouhlá plazma. Tato podlouhlá plazma dokáže posílit blízké elektrické pole natolik, že je zde možný *conventional breakdown*. [14]



**Obrázek 18:** Runaway breakdown [13]

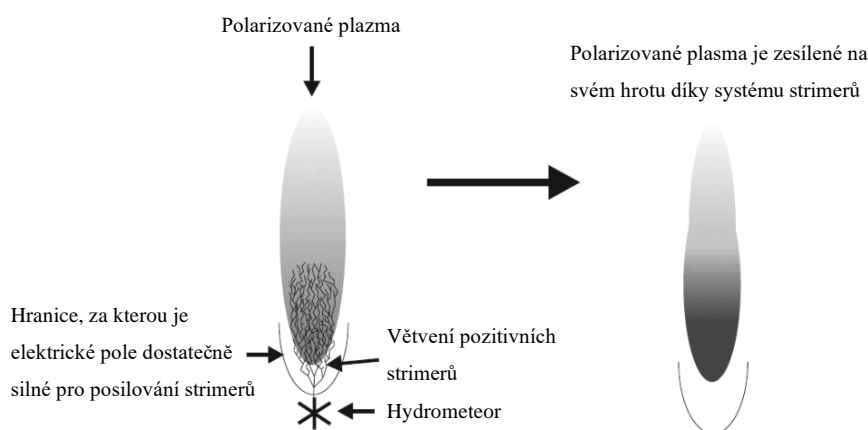
Při tvoření unikajících elektronů vznikají také termální elektrony. Největší hustota obou typů elektronů je u konce výboje, kde se vytvoří plazma. Předpokládá se, že velmi rychlá polarizace plazmatu dokáže vytvořit velmi silné lokálně zesílené elektrické pole v blízkosti jejich konců a že jádro tohoto plazmatu dokáže napodobit strimer a dále se rozvinout až do lideru<sup>2</sup>. [13]

---

<sup>2</sup> Další fáze vývoje elektrického výboje následující po strimeru, jedná se o první krok stupňovitého výboje.

### 1.3.1.3. Hybrid breakdown

Tento proces vzniku bleskového výboje vychází z obou předešlých procesů (vytvoření pozitivních strimerů z povrchu hydrometeorů a *runaway breakdown*). Proces začíná sprškou kosmických částic, která dokáže vyvolat *runaway breakdown*. Ten pak následně dokáže vytvořit oblast plazmatu v silném elektrickém poli bouřkového oblaku. Jak se oblast plazmatu vyvíjí a polarizuje, dokáže lokálně zesílit elektrické pole natolik, že se zde mohou vytvořit korónové výboje na povrchu hydrometeorů. Z korónových výbojů následně vznikají pozitivní strimery, které vyplní prostor nově vzniklého plazmatu, a ještě více zesílí elektrické pole poblíž jejich počátku. Toto zesílené elektrické pole poblíž počátku strimerů přispívá k vytváření dalších strimerů, což způsobí další zesílení elektrického pole. Celý tento proces trvá přibližně v řádu milisekund, jelikož se strimery pohybují rychlostí přibližně  $10^5$  m/s a jejich dráha je přibližně 10 m. [13]



Obrázek 19: Hybrid breakdown [13]

Pozitivní strimery se vyvíjí z hydrometeorů v zesíleném elektrickém poli poblíž plazmatu vytvořeného unikajícími elektrony. Tyto strimery se vyvinou až do systému větví. To způsobí, že se elektrické pole dále zesiluje poblíž počátku strimerů a mohou tak vznikat další větve strimerů. Několik takových větví dokáže zesílit lokální elektrické pole až o řád a vytvořit tak příznivé podmínky pro vznik bleskového výboje. [13]

## 2. Studium bleskových výbojů

---

Vědci se již dlouho snaží pochopit a studovat bleskové výboje. Tyto atmosférické výboje jsou fascinující, ale zároveň mohou mít významné dopady na lidské životy. Samotné bleskové výboje se však v přírodě objevují zcela náhodně, což velmi komplikuje jejich exaktní pochopení. Pro jejich studium se tak vyvinuly dva hlavní směry bádání, jedním z nich je snaha o umělé spouštění blesku v přírodních podmínkách, což je ale velmi komplikovaný proces s nejistým výsledkem, proto se vědci ubírají i druhým směrem, ve kterém se snaží bleskový výboj nasimulovat v laboratorních podmínkách. Obě tyto možnosti představím v následující kapitole.

### 2.1. Důvody studia bleskových výbojů

Bleskové výboje jsou velmi složitým a stále ještě ne zcela pochopeným jevem. V této kapitole představím několik hlavních důvodů, proč vědci investují do oblasti studia bleskových výbojů.

První důvod souvisí s výzkumem počasí a bouřek. Bouřky jsou složitými meteorologickými jevy, které v sobě zahrnují spoustu dalších fenoménů, včetně těch elektrických, kterými jsou právě bleskové výboje. Pochopení principů jejich formování může být klíčové pro zlepšení předpovědi počasí a ochranu lidí a infrastruktury. Umělé spouštění bleskových výbojů umožňuje vědcům provádět kontrolované experimenty a měření. Díky těmto výzkumům lze například lépe identifikovat aspekty, které ovlivňují intenzitu bouřek nebo určit předpovědi bouřkových systémů.

Dalším důvodem je ochrana infrastruktury a prevence škod. Bleskové výboje mohou mít zničující účinky na infrastrukturu a zařízení. Přímé zásahy mohou způsobit požáry, poškození elektroniky či jiné škody, proto vědci neustále vyvíjejí technologie a metody, které by minimalizovaly tyto negativní dopady. Umělé spouštění bleskových výbojů může poskytnout vědcům kontrolu nad místem a časem, kdy se tyto výboje vyskytují. Tímto způsobem tak mohou zkoumat různé metody ochrany infrastruktury a vyhledávat účinná opatření, která minimalizují riziko poškození způsobeného bleskovým výbojem.

Dalším z důvodů je experimentální výzkum a inovace. Vědci mohou vytvářet specifické podmínky a testovat různé teorie a hypotézy o elektrických jevech v atmosféře. Například mohou zkoumat chování bleskových výbojů ve specifickém prostředí nebo testovat odolnost nových materiálů. Tímto způsobem lze získat důležité poznatky, které mohou vést k pokroku v oblastech jako je meteorologie, energetika nebo materiálový výzkum.

Bleskové výboje mají poté v neposlední řadě značný potenciál jako zdroj elektrické energie. Umělé spouštění bleskových výbojů by poté mohlo sloužit jako prostředek ke generaci těchto výbojů, které by byly jímány a přeměňovány na elektrickou energii. Tato oblast výzkumu by mohla přinést nové možnosti v oblasti obnovitelné energie a snížení závislosti na tradičních fosilních zdrojích. Nicméně takovéto využití bleskových výbojů je za současných možností ještě stále nemožné a je potřeba další výzkum samotných bleskových výbojů, ale také možností a technologií, jak energii výbojů zachytit v tak krátkém okamžiku. [15]

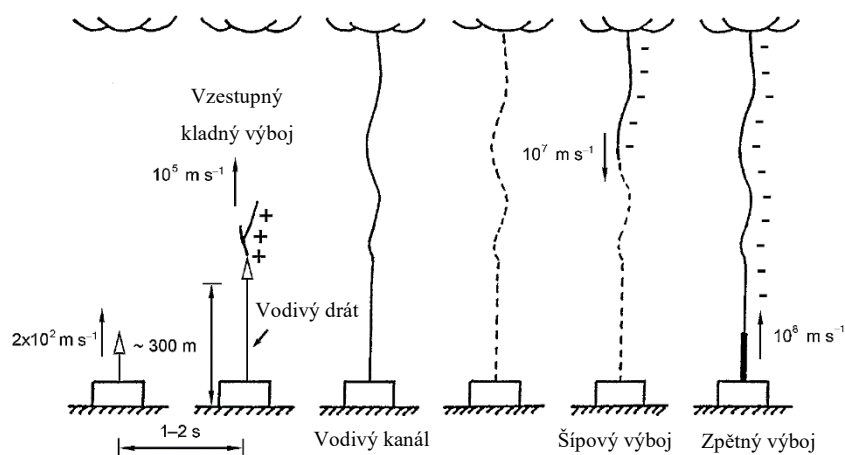
## **2.2. Umělé spouštění bleskových výbojů**

Nejstarší a také nejvíce prozkoumanou možností je řízené a umělé spouštění (triggerování) bleskových výbojů prostřednictvím raket, které nesou od povrchu země tenký vodivý drát a kevlarový vlasec, případně rozptylují uhlíkový či měděný prášek. Cílem této metody je předpřipravení dostatečně vodivé cesty pro vytvoření bleskového kanálu a jeho navedení do místa měření. Mezi novější metody spouštění bleskových výbojů se řadí spouštění pomocí laserů. Dále se také předpokládá, že bleskový výboj lze spustit pomocí velmi výkonných mikrovlnných paprsků, které jsou tvořeny laserem s volnými elektrony. Další možností je vodní proud, bleskové výboje se totiž dokázalo nechtěně spustit vodním oblakem při explozi pod vodou. Další možností se jeví také přechodný plamen. Proběhl experiment s 10metrovým plamenem na vysoké věži vyrobený raketovým motorem, nicméně žádný výboj se nepodařilo vyprodukovat. Poslední tři jmenované možnosti však jsou jen velmi málo prozkoumané, proto se v této práci budu věnovat pouze spouštění bleskových výbojů pomocí raket a laserů. [2]

### **2.2.1. Rakety**

Nejstarší metodou spouštění bleskových výbojů je pomocí raket s tenkým drátem. Tato metoda existuje ve dvou podobách: „klasické spouštění“ a „výškové spouštění“. [2]

Klasické spouštění je nejvíce efektivní metoda a spočívá v odpálení malé rakety, která nese tenký uzemněný vodivý drát. Raketa letí směrem k bouřkovému oblaku a snižuje tak vzdálenost mezi nábojem země a nábojem v oblaku. Čas kdy odpálit raketu je volen podle měření elektrického pole, dále jsou ale také brány v potaz trend elektrického pole a frekvence výskytu přírodních bleskových výbojů. [2]



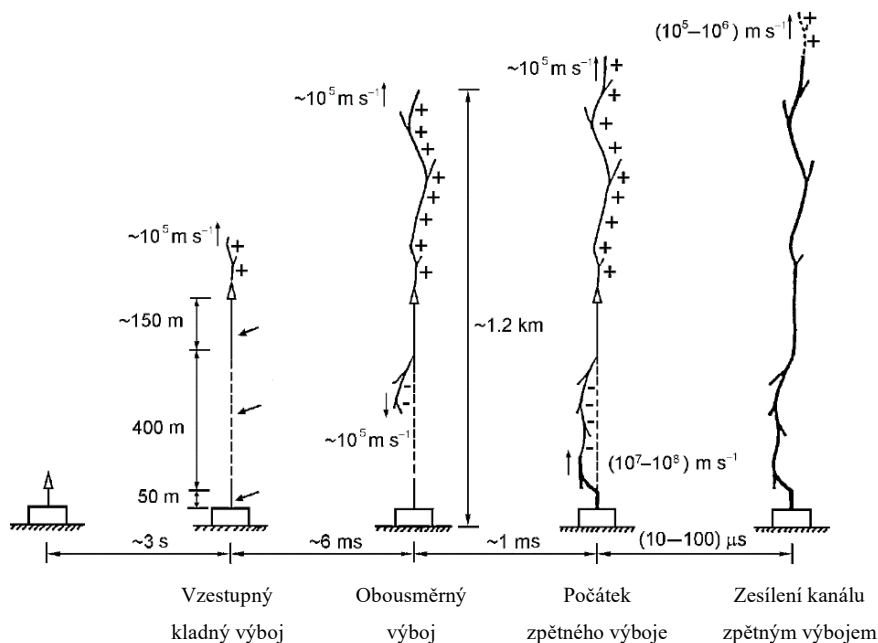
**Obrázek 20:** Klasické spouštění [2]

Raketa letí vzhůru do oblaku rychlostí přibližně 200 m/s a když je ve výšce 200 až 300 m nad zemí, tak z vršku rakety začne stoupat kladný stupňovitý výboj směrem k oblaku. Kladný stupňovitý výboj vypaří tenký drát, překoná vzdálenost mezi zemí a oblakem a vytvoří tak kanál pro bleskový výboj. Tímto kanálem začne po dobu několika milisekund protékat počáteční trvalý proud a dojde k přenosu záporného náboje z oblaku do země. Stoupavý kladný stupňovitý výboj a počáteční trvalý proud představují počáteční fázi klasického spouštění. Po této počáteční fázi v bleskovém kanálu následuje šípový výboj a následný vzestupný zpětný výboj. Těchto výbojů může nastat v jednom kanálu více. Počáteční fáze klasicky spuštěného bleskového výboje je tak odlišná od počáteční fáze přírodních bleskových výbojů, další fáze jsou již stejné. [2]



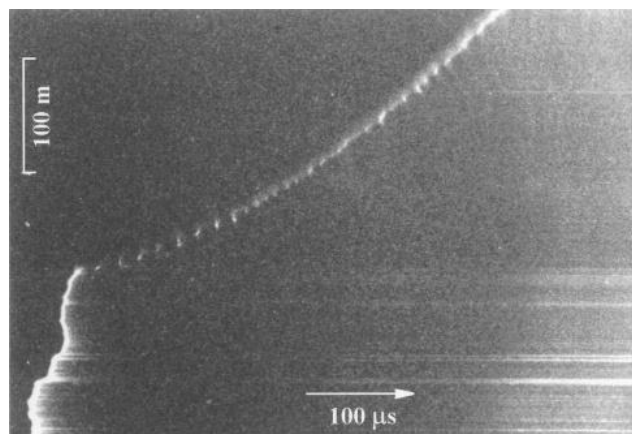
**Obrázek 21:** Bleskový výboj spuštěný raketou [2]

Druhá podoba raketového spouštění bleskových výbojů se nazývá výškové spouštění. Toto spouštění bleskových výbojů se liší od klasického tím, že tenký drát není uzemněn. Toho je docíleno tak, že měděný drát je ve své spodní části nahrazen kevlarovým vláskem, který slouží jako izolátor a má délku několik stovek metrů. [2]



**Obrázek 22:** Výškové spouštění [2]

Při tomto spouštění výbojů dojde k vytvoření stupňovitých výbojů v obou směrech od tenkého vodivého drátu. Směrem nahoru k oblaku se vytvoří kladný líder a směrem dolů k zemi naopak záporný líder. Jakmile je sestupný záporný výboj v kontaktu se zemí, tak vzniká vzestupný kladný spojovací líder. Po spojení obou líderů je zahájen zpětný výboj. Délka kanálu je pro první zpětný výboj malá (řádově jednotky kilometrů) a rychlost zpětného výboje je asi dvakrát až třikrát větší než rychlost lideru, takže zpětný výboj dosáhne na vršek vzestupného lideru během asi  $10 \mu\text{s}$ . Z tohoto důvodu je vzestupný líder značně zesílen. [2]



**Obrázek 23:** Zesílení vzestupného lideru [2]

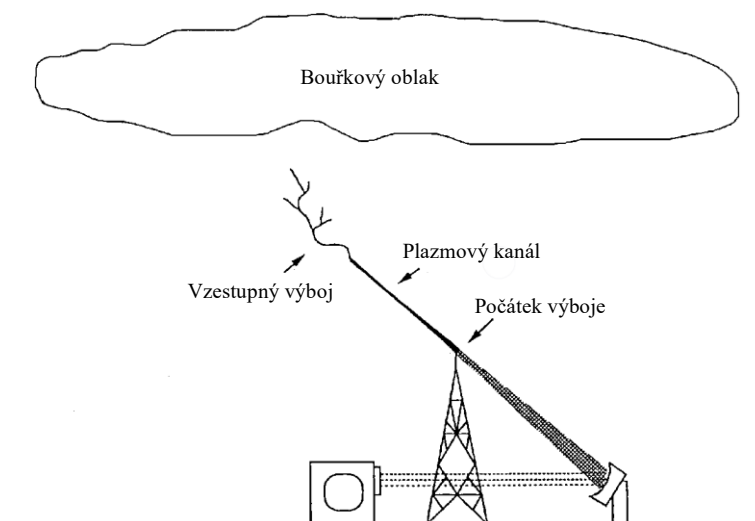
Po vytvoření celého vzestupného lideru začne kanálem protékat stejně jako u klasického spouštění počáteční trvalý proud, po kterém se bleskový výboj již chová stejně jako u přírodního bleskového výboje. Rozdíl oproti klasickému spouštění je ve spodní části, kde vzniká obousměrný výboj. [2]



## 2.2.2. Lasery

Dalším a perspektivním způsobem spouštění bleskových výbojů je s využitím laserů. V této metodě se nejvíce nabízejí dva typy laserů vysokoenergetické (desítky až stovky Jouleů na puls) infračervené lasery a nízkoenergetické (mJ a méně na puls) ultrafialové lasery. [2]

Infračervené lasery namířené do vzduchu dokáží způsobit vysoký stupeň ionizace tzv. optický průraz kolem svého paprsku. Optické průrazy mohou vyvolat na mnoha místech kolem paprsku korálkový plazmový kanál o vzdálenosti 60 metrů i více. Tento samotný kanál plazmy však není pravděpodobně schopný změnit elektrické pole natolik, aby spustil bleskový výboj. [2]



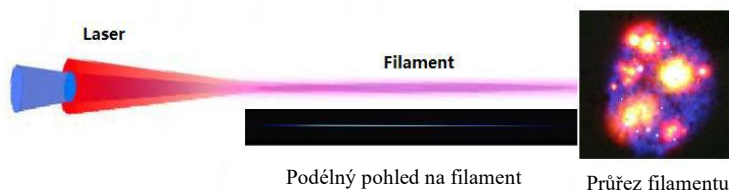
**Obrázek 24:** Návrh laserového spouštění výbojů [2]

Proto vznikl návrh, kdy je k laseru přidána vysoká kovová věž. Tato věž je vodivě spojená se zemí a přesune tak potřebný náboj blíž k mraku, čímž se zlepší podmínky pro vznik bleskového výboje. Laserový paprsek namířený k vršku věže by poté měl vyvolat samo rozvíjející se lider. [2]

Lasery s vlnovými délkami na opačné straně spektra, které tvoří skrze multifotonovou ionizaci málo hustou plazmu transparentní pro laserový paprsek, jsou lasery ultrafialové. Pulsy ultrafialových laserů by měly být schopné vytvořit a prodloužit vodivý kanál. Nicméně vodivost tohoto kanálu je třeba udržovat pomocí jiného zdroje energie, jelikož laserem uvolněné elektrony se velmi rychle naváží na molekuly kyslíku a zformují málo pohyblivé záporné ionty kyslíku. Tomu lze zabránit využitím laserového paprsku ve viditelném spektru, který je přímo podél ultrafialového paprsku. V laboratorních podmínkách se povedlo spustit a vést elektrický výboj tímto způsobem. [2]

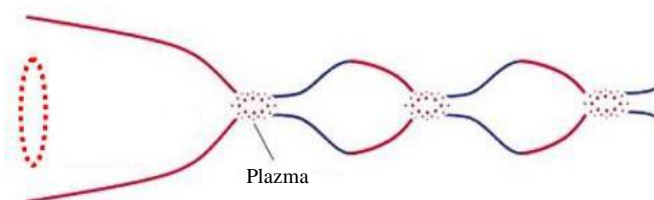
### 2.2.2.1. Laserová filamentace

Jev, který napomáhá spouštění elektrických výbojů pomocí laserů, se nazývá laserová filamentace. Pro filamentaci je třeba, aby byl špičkový výkon laseru dostatečně velký a aby se tak změnilo šíření laserového paprsku v médiu z lineárního na nelineární šíření. Poté se v laserovém paprsku objeví jevy jako samoostření a samotná filamentace. Filamentace se projevuje u velmi rychlých laserů zejména u femtosekundových laserů. [16]



**Obrázek 25:** Laserový filament [16]

Laserová filamentace se nejčastěji popisuje jako dynamická bilance mezi Kerr efektem a rozostřováním paprsku kvůli vytvořené plazmě. Kerrův efekt způsobuje samozaostření směrem k centru laserového paprsku kvůli rozdílným indexům lomu v centru a na kraji paprsku. Tímto samozaostřováním se zvyšuje intenzita paprsku a může dojít ke zhroucení paprsku a vytvoření plazmatu. Toto zhroucení paprsku však také může způsobit rozostření paprsku. Laserová filamentace nastane, když jsou tyto dva jevy v dynamické rovnováze a v paprsku se vytvoří plazma, které napomáhá ionizaci cesty bleskového výboje. [16]



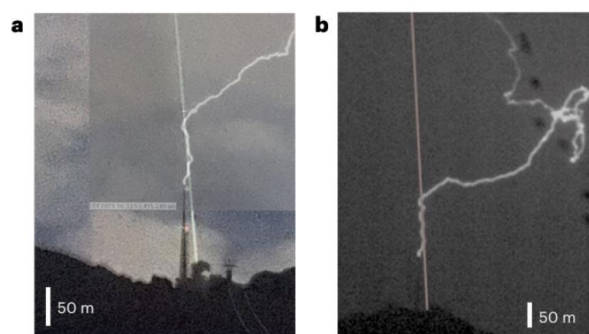
**Obrázek 26:** Laserová filamentace [16]

Rychlé pulsní lasery s dostatečným výkonem pro spouštění přírodního bleskového výboje se začaly využívat pro výzkum bleskových výbojů zejména v posledních letech. Poprvé se bleskový výboj pomocí laserového paprsku dokázal spustit teprve nedávno, jednalo se o experiment z roku 2021 na hoře Säntis ve Švýcarsku. V tomto experimentu vědci namířili laserový paprsek vzhůru k bouřkovému oblaku podél 124 m vysoké věže. Parametry laseru byly nastaveny tak, aby se laserové filamenty objevily těsně nad vrcholem věže a měly délku alespoň 30 m. [17]



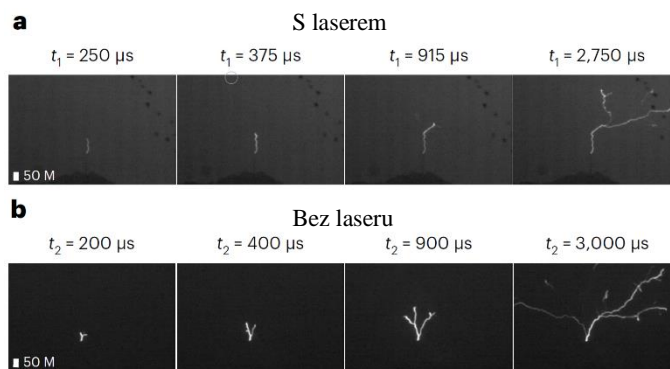
**Obrázek 27:** Spouštění bleskových výbojů laserovým paprskem [17]

Během experimentování bylo na věži zaznamenáno 16 bleskových výbojů, z čehož se 4 vyskytly, když byl spuštěný laser. Všechny 16 bleskových výbojů na této věži bylo vzestupných a zmiňované 4 výboje spuštěné laserovým paprskem byly navíc kladné. Ze všech 4 výbojů se však kvůli nepříznivým podmínkám podařilo zachytit na kameru pouze jeden. Laserem spuštěný bleskový výboj kopíroval cestu paprsku na prvních desítkách metrů, kde se vyskytovaly laserové filamenty. Na Obrázku 28 je viditelné, že bleskový výboj není v této části zcela přímý, jak by byl v případě spouštění výbojů pomocí rakety s drátkem. To je dáno tím, že proudové rozložení je mnohem složitější v distribuci pohybujících se nábojů než podél vodivého drátu. [17]



**Obrázek 28:** Spuštěný bleskový výboj laserovým paprskem [17]

Z časového vývoje bleskového výboje na Obrázku 29 je patrné, že při zapnutém laseru (a) výboj nejprve skutečně kopíruje cestu laserového paprsku a začne se větvit až když se odpojí od cesty laserového paprsku. Naopak bleskový výboj bez laserového paprsku (b) je od samotného počátku rozvětvený. [17]



*Obrázek 29: Vývoj spuštěného výboje [17]*

## 2.3. Pozitiva a negativa metod

### 2.3.1. Rakety

Hlavní výhodou spouštění bleskových výbojů pomocí raket je přímé vodivé spojení se zemí. Raketa nese uzemněný vodivý drát směrem k bouřkovému oblaku, který umožňuje přímé vedení bleskového výboje do předem určeného místa. To poskytuje přesný a kontrolovaný způsob spouštění blesků. První pokus spuštění bleskových výbojů pomocí raket se uskutečnil již roce 1965 a od té doby proběhlo nespočet dalších podobných experimentů, tato metoda je již značně vyzkoušená a prozkoumaná. Úspěšnost této metody je velmi závislá na správném načasování odpálení rakety, nicméně pokud je toto načasování správné, tak se úspěšnost spouštění bleskového výboje blíží až k 90 %.

Nevýhodou této metody je jednoznačně její nákladnost a špatná logistika. Tato metoda vyžaduje speciální rakety, vodiče a odpalovací mechanismy, což představuje velkou finanční náročnost. Přesouvání takovýchto experimentů je také značně složité, což velmi komplikuje logistiku celého experimentu. Velká závislost na správných podmínkách pro spuštění bleskového výboje je také velkou nevýhodou, jelikož každé opakování odpalování raket přináší další náklady. Při neúspěšném pokusu se vodivý drát navíc neodpaří a padá tak na zem, což představuje velké nebezpečí zejména pro vedení vysokého napětí.

### 2.3.2. Lasery

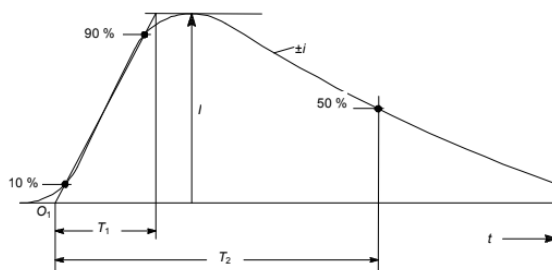
Velkou výhodou spouštění bleskových výbojů pomocí laserů je opakovatelnost a přesnost. Laser a jeho optická soustava umožňuje přesné zaměření paprsků, což poskytuje vyšší míru cílení a přesnosti spouštění bleskových výbojů. Na rozdíl od raket je u této metody velmi jednoduchá opakovatelnost, laser stačí pouze znovu spustit.

Značnou nevýhodou této metody je stejně jako v případě raket její nákladnost. Vhodné lasery s dostatečným výkonem pro spouštění bleskového výboje jsou v dnešní době stále velmi drahé a také velmi velké, což také komplikuje samotnou logistiku. Dále tyto laserové systémy vyžadují dodržování přísných bezpečnostních opatření a odborné znalosti, což prodražuje celou metodu. Laserové paprsky pak mohou představovat velké nebezpečí pro leteckou dopravu, s čímž je třeba počítat při experimentování. Jedná se o novou metodu, která ještě není zcela vyzkoušená. První pokus spouštění bleskových výbojů pomocí laserového paprsku se uskutečnil v roce 1999 a první úspěšný pokus proběhl až v roce 2021. Nicméně zmiňovaný úspěšný experiment z roku 2021 potvrdil, že laserový paprsek je schopný spustit bleskový výboj a podobné experimenty by tak mohly probíhat v následujících letech, což by přispělo k větší prozkoumanosti této technologie spouštění bleskových výbojů.

## **2.4. Simulace bleskových výbojů v laboratoři**

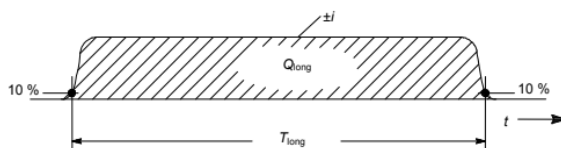
Druhou možností, jak studovat bleskové výboje, je uměle je simulovat na jiskřištích v laboratorních podmínkách. Oproti spouštění výbojů v přírodních podmínkách je to značně snazší možnost, jak studovat bleskové, respektive elektrické výboje. Ke zkoumání těchto výbojů je třeba pouze příslušný elektrický zdroj, který dokáže vytvořit správné parametry elektrického výboje a jiskřiště, kde výboj může proběhnout.

Mezi hlavní parametry umělých výbojů simulující bleskové výboje patří maximální proud, rychlost vzestupu, doba trvání, tvar impulsu a specifická energie. Maximální proud udává nejvyšší hodnotu proudu, které je dosaženo během výboje. Maximální proudy bleskových výbojů se pohybují v rozsahu od jednotek až po stovky kiloampér. Maximální hodnota proudu je důležitá zejména při navrhování bleskových ochran. Rychlost vzestupu je časový interval, za který proud dosáhne své maximální hodnoty od svého počátku. Hodnoty rychlosti vzestupu se pohybují v jednotkách až desítkách mikrosekund. Doba trvání udává čas, po který je proud přítomen během výboje. Tato doba bývá v rozmezí mikrosekund až jednotek milisekund. Bleskové výboje mají také své typické impulsní charakteristiky s rychlým vzestupem a pomalým poklesem. Vzestup a pokles jsou charakterizovány dobou čela, respektive dobou půltýlu. Specifická energie vyjadřuje energii rozptýlenou bleskovým proudem v jednotkovém odporu. Velikost této energie je závislá na maximálním proudu, době trvání a tvaru impulsu a pohybuje se v rozsahu od jednotek kJ/Ω až po desítky MJ/Ω. [18]



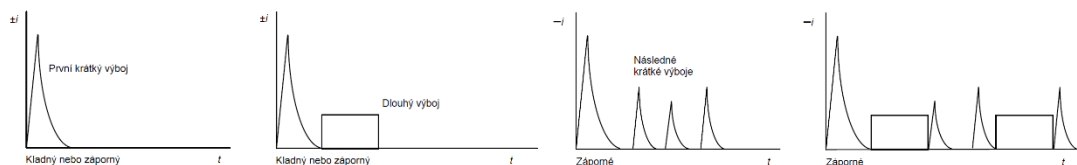
**Obrázek 30:** Proudový impuls zpětného výboje a následných výbojů [18]

Doba čela ( $T_1$  v Obrázku 30) je parametr, který je stanoven jako 1,25násobek intervalu mezi okamžiky dosažení 10 % a 90 % vrcholové hodnoty proudu. Doba půltýlu ( $T_2$  v Obrázku 30) je parametr, který je stanoven jako časový interval mezi efektivním začátkem a okamžikem, ve kterém klesne velikost proudu na polovinu vrcholové hodnoty. Efektivní počátek ( $O_1$  v Obrázku 30) je průsečík časové osy s přímkou proloženou referenčními body v čele proudu výboje, kdy proud dosáhne 10 % a 90 % vrcholové hodnoty, efektivní počátek předchází o  $0,1 T_1$  okamžik, ve kterém dosáhne proud 10 % své vrcholové hodnoty. [18]

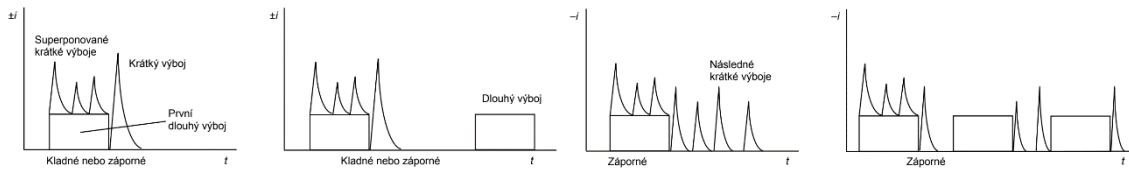


**Obrázek 31:** Průběh proudu dlouhého výboje [18]

Bleskové výboje se simulují nejčastěji čtyřmi průběhy proudů a jejich kombinacemi. Proud prvního kladného výboje se simuluje impulsem s dobou čela  $10 \mu s$  a dobou půltýlu  $350 \mu s$ . Proud prvního záporného výboje se simuluje impulsem s dobou čela  $1 \mu s$  a dobou půltýlu  $200 \mu s$ . Proud následujících záporných výbojů má větší strmost, ale dosahuje menší maximální hodnoty, proto se simuluje impulsem s dobou čela  $0,25 \mu s$  a dobou půltýlu  $100 \mu s$ . Dlouhý výboj se simuluje impulsem s konstantní hodnotou proudu po dobu  $2 ms$  až  $1 s$ . Na Obrázku 32 a Obrázku 33 jsou zobrazeny typické možné průběhy proudu u sestupných a vzestupných bleskových výbojů. [18]

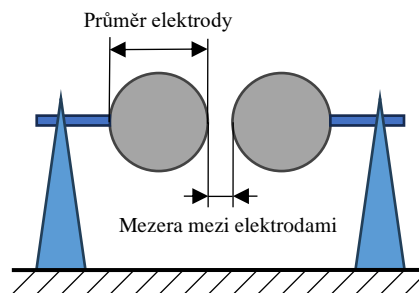


**Obrázek 32:** Možné průběhy sestupných bleskových výbojů [18]



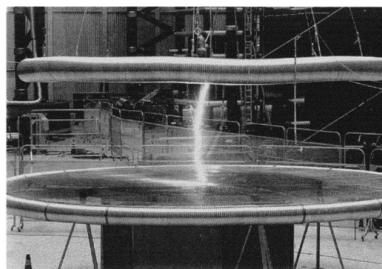
**Obrázek 33:** Možné průběhy vzestupných bleskových výbojů [18]

Mimo vhodný zdroj pro generování správných impulsů je také potřeba jiskřiště. Jiskřiště je laboratorní zařízení, které se skládá z elektrod, mezi kterými je vzduchová mezera. Na elektrody je podle potřeby přivedeno napětí a mezi nimi se vytvoří elektrické pole simulující podmínky, které mohou vést k bleskovému výboji. Při překročení kritické hodnoty elektrického napětí může mezi elektrodami vzniknout výboj. Jiskřiště tak umožňuje zkoumat elektrické výboje podobné těm bleskovým v kontrolovaném prostředí.



**Obrázek 34:** Schéma jiskřiště

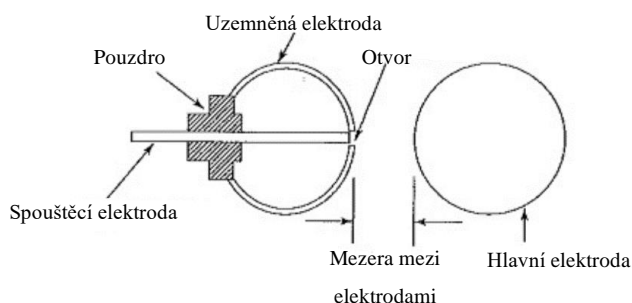
K simulaci výbojů v jiskřišti se používají také různé typy elektrod pro vytvoření specifických podmínek. Běžně se používají hrotové, sférické, rovinné, hranaté či Rogowského elektrody.



**Obrázek 35:** Elektrický výboj mezi rovinnými elektrodami [19]

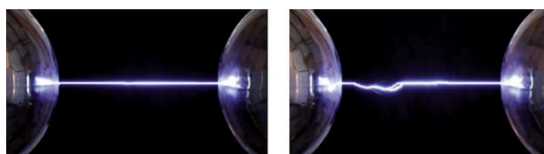
S proudovými impulsy se experimentuje hlavně při zkoumání bleskových výbojů a jejich účinků na okolí, ale také při testování ochran proti bleskovým výbojům. K jejich vytvoření je však potřeba sofistikovaných zdrojů proudu a napětí, které dokáží vytvořit specifické impulsní průběhy. Obecně elektrické výboje lze ale také studovat i pomocí jednodušších DC a AC generátorů vysokého napětí.

K výboji dochází při překročení přeskokového napětí, jeho hodnota je však závislá na velkém množství vzájemně souvisejících parametrů, jako jsou například atmosférické podmínky či nečistoty na elektrodách. Často se tak stává, že hodnota přeskokového napětí je pro stejnou vzdálenost elektrod nepatrně odlišná. Je tak složité přesně odhadnout, kdy výboj nastane, a proto existují metody, jak elektrické výboje spouštět. Dlouho byla používána metoda spouštění elektrických výbojů je za pomoci trigatronu.



**Obrázek 36:** Trigatron [20]

Trigatron je jiskřiště tvořené třemi elektrodami: dvě hlavní pro vysokonapěťové výboje a jedna pro spouštění výbojů. Spouštění probíhá tak, že se na spouštěcí elektrodu přivede vysoké napětí, to vytvoří korónové výboje, které ionizují mezeru mezi hlavními elektrodami. Po zionizování mezery mezi elektrodami se vytvoří vhodné podmínky pro vznik výboje mezi hlavními elektrodami. Tato metoda však funguje pouze těsně pod přeskokovým napětím a může se stát, že výboj přeskočí z hlavní elektrody na spouštěcí elektrodu, což je nežádoucí stav.



**Obrázek 37:** Laserem navedený výboj mezi kulovými elektrodami [21]

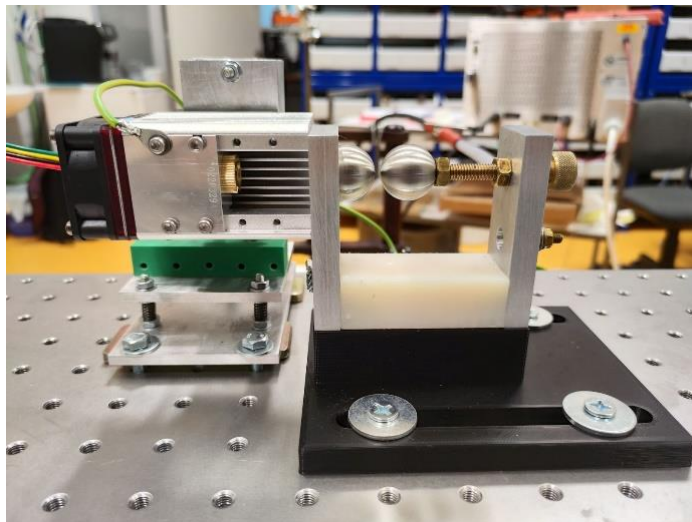
V posledních letech se velmi rozvíjí trend spouštění elektrických výbojů pomocí laserů. Technologie laserů se neustále posouvá vpřed a lasery s vyššími výkony jsou tak každým rokem dostupnější. Laserový paprsek výkonných laserů je schopný také ionizovat mezeru mezi elektrodami, což zapříčiní vznik elektrického výboje. Takovéto laserové systémy mají značné výhody oproti trigatronům. Laserový paprsek je proud fotonů, které nevedou elektrický proud, takže nemůže dojít k přeskoku na laser. Dále jsou také lasery s optickými soustavami velmi přesným nástrojem a lze je tak přesně zaměřit kamkoliv i na větší vzdálenosti. Laserové spouštění výbojů lze také velmi jednoduše opakovat, stačí pouze znovu spustit laser a přivést laserový paprsek na elektrodu.



## 3. Vlastní návrh

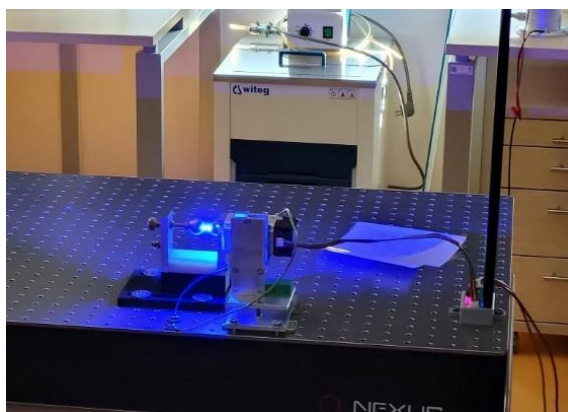
---

### 3.1. Návrh



*Obrázek 38: Návrh laserového spouštění elektrických výbojů*

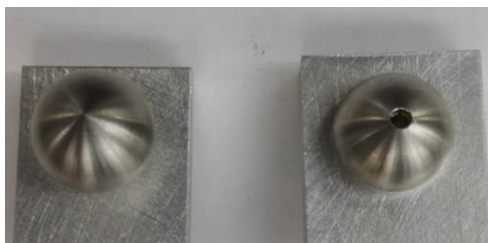
Pro experimenty jsem použil laserový modul NEJE A40640 určený pro gravírky a řezačky s integrovanou optikou FAC. Jedná se o laser s dvěma diodami, který díky vestavěné technologii kompresi vláken poskytuje velmi silnou hustotu energie ve svém paprsku. FAC optika umožňuje koncentrovat tento laserový paprsek do bodu se čtvercovým průmětem až 0,08 x 0,08 mm. Laserový paprsek má vlnovou délku 450 nm, což odpovídá modré barvě. Modul je napájený zdrojem s napětím 12 V a proudem 4 A a má trvalý optický výkon 11 W, pulzní výkon laseru může dosáhnout hodnot i přes 12 W. Jelikož se jedná o laser s již poměrně velkým výkonem, je při jeho zapnutí nutné používat ochranné brýle, aby se zamezilo poškození zraku. Tento laser jsem zvolil kvůli vysokému výkonu a dobré cenové dostupnosti.



*Obrázek 39: Detail spouštění laseru*

Laser umožňoval ovládání dvěma způsoby pomocí dvou modulů řídicí elektroniky. Jeden modul umožňoval laser spustit na 1 % výkonu, který bylo možné následně postupně po kroku 1 % zvyšovat. Druhý modul umožňoval testovací zapnutí laseru, které spustilo laser okamžitě na 100 % výkonu stisknutím jednoho tlačítka. Z bezpečnostních důvodů jsem laser ovládal pomocí plastové tyče, aby se maximálně zamezilo přeskoku výboje na člověka. Pro takovéto ovládání laseru je výrazně vhodnější ovládací modul, který umožňoval testovací zapnutí laseru na 100% výkon.

Jako zdroj elektrických výbojů jsem použil zdroj vysokého stejnosměrného napětí Technix sr40kv-5kW. Jedná se o zdroj s výkonem 5 kW a rozsahem napětí od 0 do 40 kV. Zdroj generuje stejnosměrné elektrické pole mezi elektrodami a k výbojům dochází při překročení přeskokového napětí.



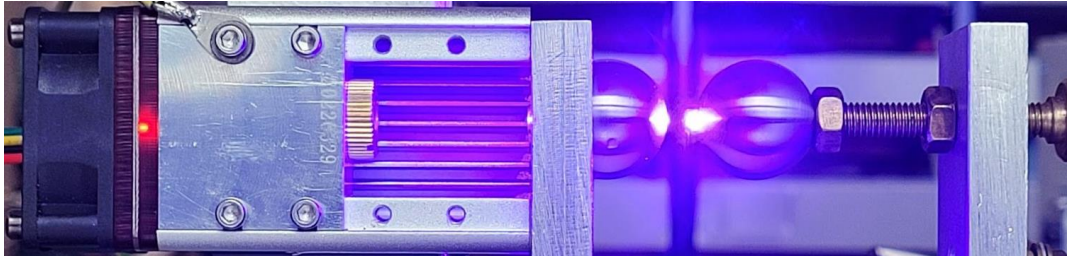
*Obrázek 40: Detail elektrod*

Jiskřiště bylo vyrobeno ze dvou kulových nerezových elektrod, přičemž jedna elektroda byla přichycena mosazným šroubem s jemným metrickým závitem, aby s ní bylo možné posouvat a měnit tak vzdálenost mezi elektrodami. Druhá elektroda byla pevně přichycena ke konstrukci a měla uprostřed vrtaný otvor, kterým mohl procházet laserový paprsek.



*Obrázek 41: Detail otvoru pro laserový paprsek*

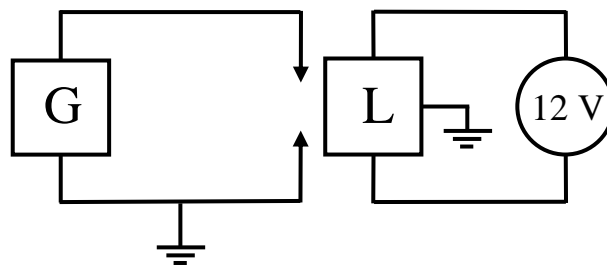
Potenciál byl přiváděn na posuvnou elektrodu, elektroda s otvorem byla uzemněná. Jiskřiště bylo přiřazeno ke konstrukci laseru, aby byla zaručena rovnoběžnost laserového paprsku s otvorem a osou elektrod a nedocházelo tak k odrazům paprsku a tím ke snižování jeho výkonu. Laserová konstrukce tak musela být také uzemněna, aby se nepoškodila elektronika laseru, kdyby došlo k přeskoku výboje až na kostru laseru.



*Obrázek 42: Detail spuštěného laseru*

Celé jiskřiště bylo fixované na plastové podložce pevně uchycené k uzemněnému stolu, aby se zamezilo jakémukoliv posunu jiskřiště při nastavování vzdálenosti elektrod. Laser byl také přichycen ke konstrukci pevně spojené s uzemněným stolem. Tako konstrukce však již umožňovala mírný posun ve všech směrech, aby bylo možné přesně zamířit paprsek do otvoru v elektrodě.

## 3.2. Měření



*Obrázek 43: Schéma zapojení*

Na Obrázku 43 je vidět schématické zapojení komponentů v mých experimentech. V levé části je generátor vysokého stejnosměrného napětí, který přivádí napětí na jiskřiště. V pravé části schématu je naopak laser a jeho napájecí zdroj. V ideálním případě by se laser neměl dotýkat jiskřiště, nicméně v mém pokusu bylo jiskřiště přiřazeno ke konstrukci laseru, proto je ve schématu naznačeno uzemnění kostry laseru.

### 3.2.1. Přeskokové napětí

Elektrické výboje se na jiskřišti bez žádného vnějšího zdroje nezačnou samovolně objevovat, a to až do dosažení tzv. přeskokového napětí. Při překročení tohoto napětí je elektrické pole dostatečně silné, aby ionizovalo cestu mezi elektrodami a vytvořilo tak vhodné podmínky pro vznik elektrického výboje. Přeskokové napětí pro jiskřiště s kulovými elektrodami s různým průměrem a různou vzdáleností bylo experimentálně změřeno a je zobrazeno na Obrázku 44.

Vrcholová hodnota přeskokového napětí [kV] kulového jiskřiště při atmosférickém tlaku 1013 hPa (760 torr) a teplotě 20°C.

Doskok [cm]	Ø 2 cm		Ø 10 cm		Doskok [cm]	Ø 50 cm		Ø 150 cm		
	≡ (-)	(+)	≡ (-)	(+)		≡ (-)	(+)	≡ (-)	(+)	
0,05	2,8				2,0	59,0				
0,10	4,7				2,2	64,5				
0,15	6,4				2,4	70,0				
0,20	8,0				2,6	75,5				
0,25	9,6				2,8	81,0				
0,30	11,2				3,0	86,0				
0,40	14,4				3,5	99,0				
0,50	17,4		16,8		4,0	112				
0,60	20,4		19,9		4,5	125				
0,70	23,2		23,0		5,0	138		138		
0,80	25,8		26,0		5,5	151		151		
0,90	28,3		28,9		6,0	164		164		
1,0	30,7		31,7		6,5	177		177		
1,2	(35,1)		37,4		7,0	189		190		
1,4	(38,5)		42,9		7,5	202		203		
1,5	(40,0)		45,5		8,0	214		215		
1,6			48,1		9,0	239		241		
1,8			53,5		10,0	263		266		
2,0			59,0		11	286	287	292		
2,2			64,5		12	309	311	318		
2,4			69,5	70,0	13	331	334	342		
2,6			74,5	75,5	14	353	357	366		
2,8			79,5	80,5	15	373	380	390		
3,0			84,0	85,5	16	392	402	414		
3,5			95,0	97,5	17	411	422	438		
4,0			105	109	18	429	442	462		
4,5			115	120	19	445	461	486		
5,0			123	130	20	460	480	510		
5,5			(131)	(139)	22	489	510	560		
6,0			(138)	(148)	24	515	540	610		
6,5			(144)	(156)	26	(540)	570	655		
7,0			(150)	(163)	28	(565)	(595)	700		
7,5			(155)	(170)	30	(585)	(620)	745		
~ střídavé napětí					32	(605)	(640)	790		
					34	(625)	(660)	835		
					36	(640)	(680)	875	880	
					38	(665)	(700)	915	925	
					40	(670)	(715)	955	965	
	= stejnosměrné napětí obou polarit					45			1030	1060
						50			1130	1150
						55			1210	1240
						60			1280	1310
	⌒ polovinové impulzní napětí - záporné					65			1340	1380
						70			1390	1430
						75			1440	1480
						80			(1490)	(1530)
	⊕ polovinové impulzní napětí - kladné					85			(1540)	(1580)
					90			(1580)	(1630)	
					100			(1660)	(1720)	
					110			(1730)	(1790)	
				120			(1800)	(1860)		

Obrázek 44: Tabulka experimentálně změřeného přeskokového napětí [22]

Z bezpečnostních důvodů jsem zvolil maximální vzdálenost elektrod na 5 mm. Při větších vzdálenost je přeskokové napětí větší než 20 kV. Elektrické pole při tomto napětí je velmi silné a mohlo by snáz poškodit laser či jinou elektroniku.

### 3.2.2. Ověření funkčnosti jiskřiště

V první části měření jsem zjišťoval, zda moje jiskřiště funguje správně podle tabulkových hodnot. Toto měření tak probíhalo bez zapnutého laseru. Přeskokové napětí jsem měřil pro kladný i záporný výboj. Mezeru mezi elektrodami jsem měnil od 0,5 mm po 5 mm s krokem 0,5 mm. Zaznamenané hodnoty v Tabulce 1 odpovídají nejnižší hodnotě napětí, při kterém došlo k samovolnému výboji.

Vzdálenost [mm]	Záporný výboj [kV]	Kladný výboj [kV]
0,5	2,85	2,91
1,0	4,73	4,02
1,5	6,54	5,78
2,0	8,14	7,34
2,5	9,61	8,88
3,0	11,03	10,33
3,5	12,26	11,86
4,0	14,11	12,7
4,5	14,86	13,97
5,0	16,2	15,74

*Tabulka 1: Naměřené hodnoty přeskovového napětí pro obě polarity výbojů*

K porovnání těchto naměřených hodnot s hodnotami předpokládanými je ale ještě třeba přepočítat přeskovové napětí z Obrázku 44 z referenčních atmosférických podmínek na specifické podmínky, které byly při mém měření podle vztahů:

$$\delta = \frac{p}{p_0} \cdot \frac{273 + t_0}{273 + t} \quad (1)$$

$$k_v = 1 + 0,002 \left( \frac{v}{\delta} - 8,5 \right) \quad (2)$$

$$U = U_N \cdot \delta \cdot k_v \quad (3)$$

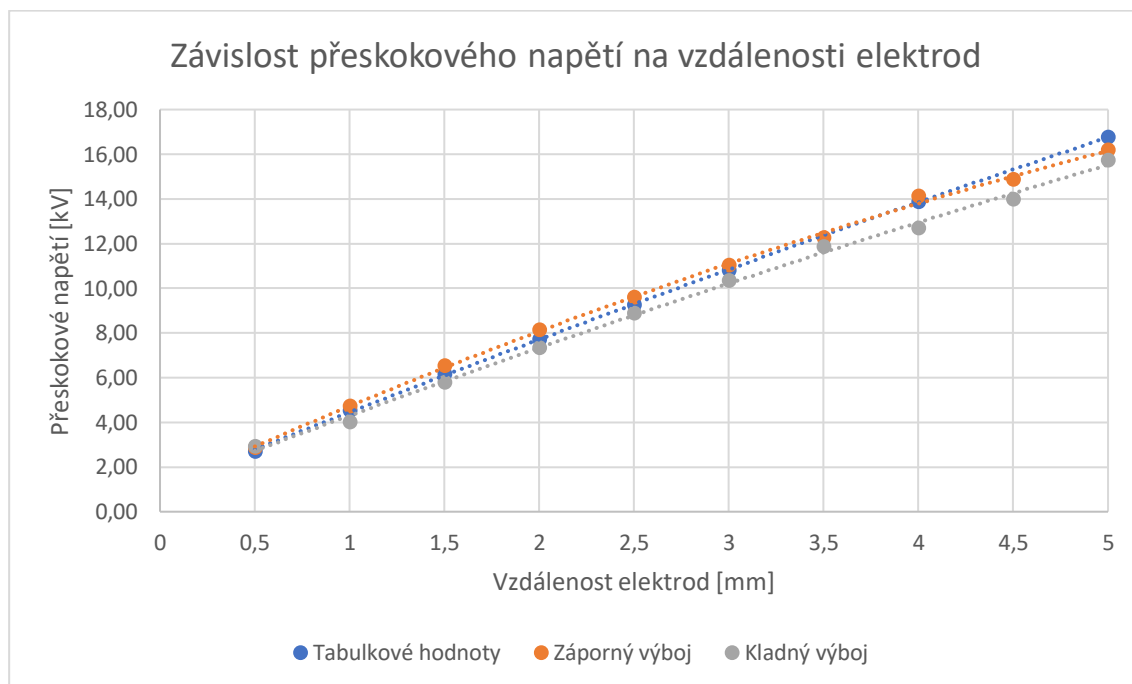
Kde  $\delta$  je korekční koeficient na tlak a teplo,  
 $p$  je tlak v konkrétních podmínkách,  
 $p_0$  je tlak v referenčních podmínkách,  
 $t$  je teplota v konkrétních podmínkách,  
 $t_0$  je teplota v referenčních podmínkách,  
 $k_v$  je korekční faktor na vlhkost,  
 $v$  je vlhkost v konkrétních podmínkách,  
 $U$  je přeskovové napětí v konkrétních podmínkách,  
 $U_N$  je přeskovové napětí v referenčních podmínkách.

Během mého měření byl v laboratoři tlak 98,29 kPa, teplota 22,7 °C a absolutní vlhkost 9,155 g/m<sup>3</sup>. Po dosazení do rovnic 1, 2 a 3 tak koeficient  $\delta$  vychází 0,961 a koeficient  $k_v$  1,002. Předpokládané přeskovové napětí přepočítané na podmínky za mého měření je poté zobrazeno v Tabulce 2. Elektrody v mém jiskřišti mají průměr 2 cm, proto jsem přepočítal pouze hodnoty přeskovového napětí z prvního sloupce na Obrázku 44 do vzdálenosti elektrod 5 mm.

Vzdálenost [mm]	Un [kV]	U [kV]
0,5	2,8	2,7
1,0	4,7	4,5
1,5	6,4	6,2
2,0	8,0	7,7
2,5	9,6	9,2
3,0	11,2	10,8
4,0	14,4	13,9
5,0	17,4	16,8

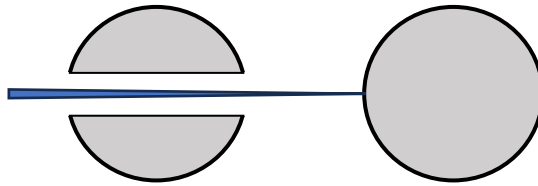
**Tabulka 2:** Přepočítané hodnoty přeskovového napětí

Výsledná závislost přeskovového napětí na vzdálenosti elektrod je znázorněna v Obrázku 45. Je patrné, že závislost přeskovového napětí na vzdálenosti na mém jiskřišti má podobný průběh jako průběh korigovaného přeskovového napětí z Tabulky 2. Lze tak předpokládat, že moje jiskřiště se chová správně. Nicméně odchylky mého měření od předpokládaných hodnot se vyskytly. Kladné výboje nastaly ve všech vzdálenostech až na tu nejmenší dříve, než se předpokládalo, naopak záporné výboje nastávaly až při vyšších hodnotách napětí. To mohlo být způsobeno nepřesností kulových elektrod, vyosením pohyblivé elektrody či nečistotami na elektrodách.



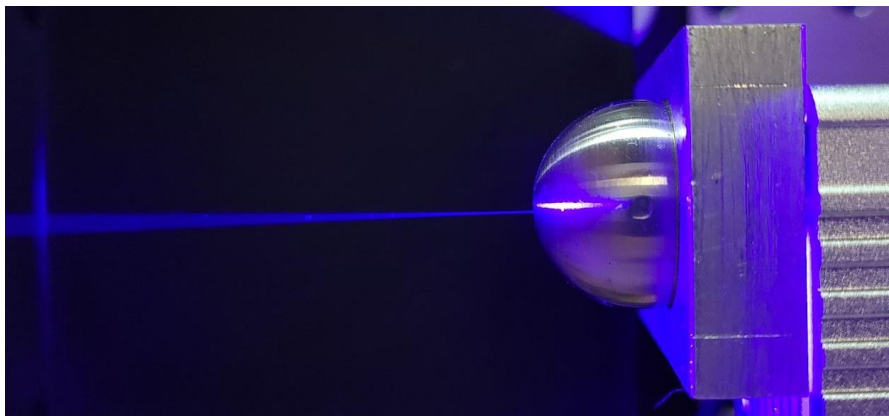
**Obrázek 45:** Graf závislosti přeskovového napětí na vzdálenosti elektrod

### 3.2.3. Spouštění výbojů pomocí laserového paprsku v ose elektrod



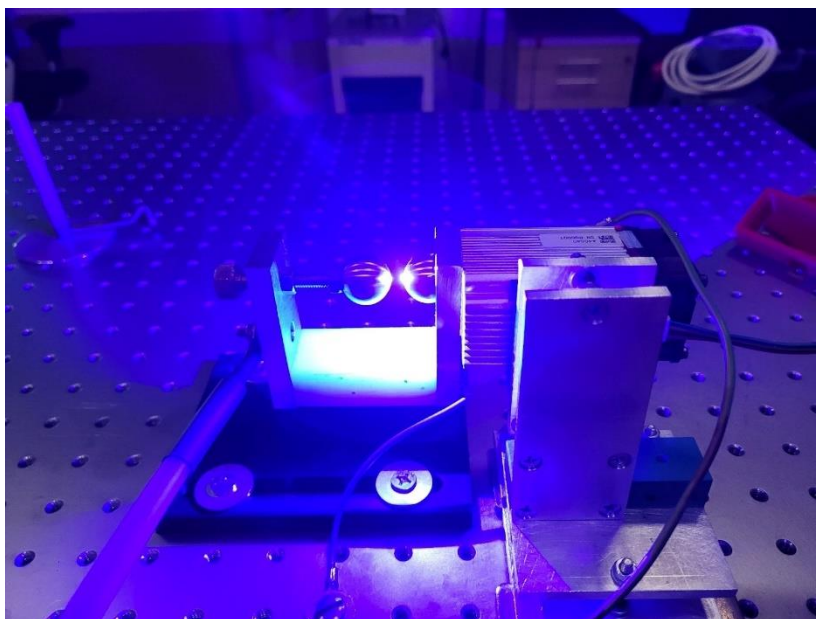
*Obrázek 46: Schématické zobrazení laserového paprsku v ose elektrod*

V prvním měření s laserem byl laserový paprsek veden tak, aby byl rovnoběžný s osou elektrod. Paprsek procházel otvorem v uzemněné elektrodě a byl zaměřen přímo na druhou elektrodu. Laserový paprsek byl nastavený tak, aby dosahoval nejmenšího průřezu v mezeře mezi elektrodami. Z Obrázku 47, kde není zobrazena druhá elektroda, je patrné, že se laserový paprsek rozšiřuje směrem od elektrody s otvorem. Paprsek tak byl skutečně zaměřen tak, aby nejmenší průřez byl mezi elektrodami. Laser byl spouštěn pomocí modulu, který umožňoval spustit laser ihned na plný výkon.



*Obrázek 47: Detail laserového paprsku v ose elektrod*

V části měření s laserem jsem se nejprve snažil zjistit, jestli je laserový paprsek z mého laseru schopný spustit elektrický výboj. Mezera mezi elektrodami byla nastavena na 2 mm a na elektrodu bylo přivedeno záporné napětí. Při této vzdálenosti elektrod se elektrické výboje začaly samovolně objevovat při napětí 8 kV a vyšším. Pro ověření funkčnosti laseru bylo napětí nastaveno na hodnotu těsně pod 8 kV, kdy samovolné elektrické výboje nevznikaly. Po zapnutí laseru se okamžitě objevil elektrický výboj, a to i při opakovaných pokusech. Z tohoto měření tak vyplývá, že laserový paprsek je schopný spouštět elektrické výboje.



*Obrázek 48: Detail spouštění výbojů laserovým paprskem v ose elektrod*

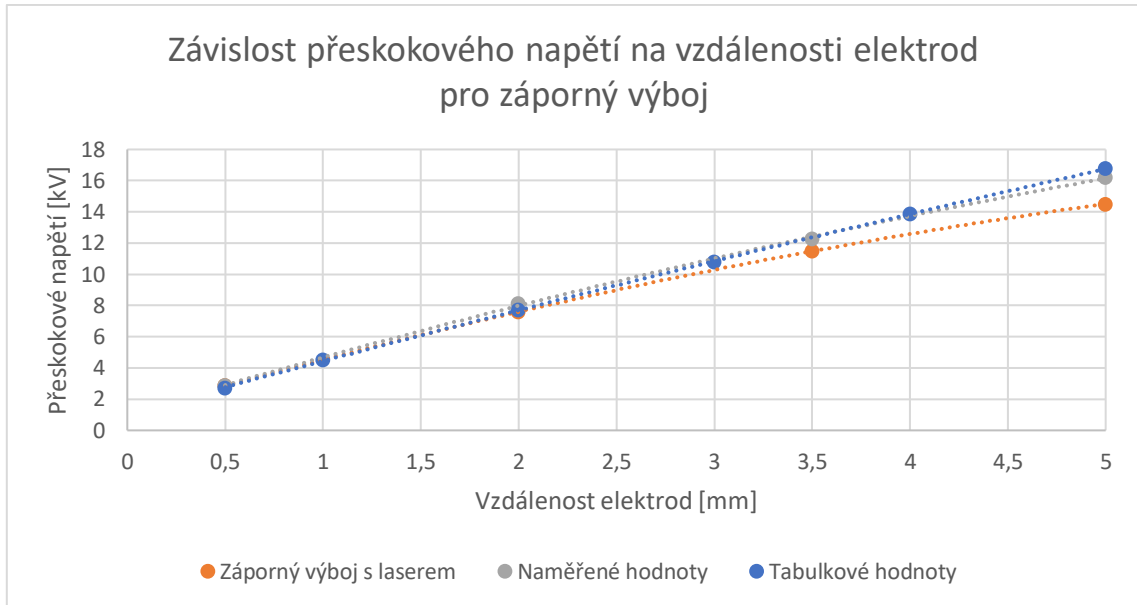
Dále jsem také zjišťoval, jestli je možné elektrický výboj při stejné vzdálenosti elektrod spustit s nižším výkonem laseru. Pro toto měření jsem tak použil druhý ovládací modul, který umožňoval změnu výkonu laseru. Na jiskřišti jsem nastavil opět napětí blízké 8 kV, kdy nenastávaly samovolné výboje mezi elektrodami. Výkon laseru jsem postupně zvyšoval od 1 %, dokud se nezačaly objevovat elektrické výboje. Výboje se při tomto měření začaly objevovat při 25 % výkonu laseru, což by odpovídalo laseru s výkonem 3 W.

Ovládací modul umožňující změnu výkonu, byl ale náchylnější na elektromagnetické pole generované výboji a hůře se s ní laser ovládal. Z těchto důvodů jsem v dalších experimentech používal pouze druhý ovládací modul. Všechny další experimenty byly provedeny při 100% výkonu laseru.

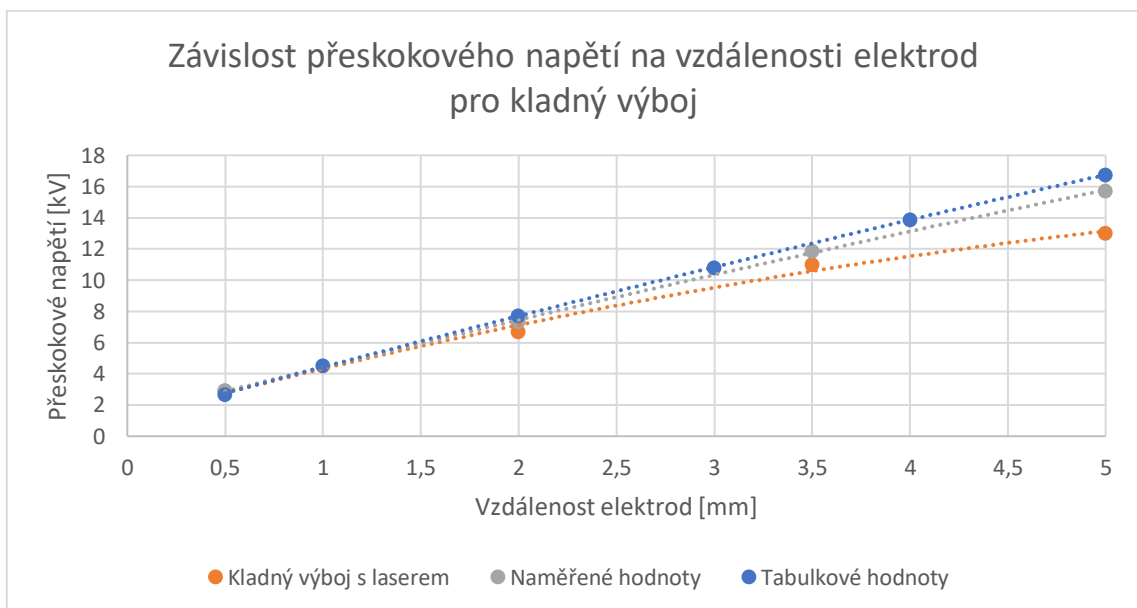
V následujícím experimentu jsem místo výkonu laseru měnil velikost mezery mezi elektrodami a zjišťoval o kolik je schopný laserový paprsek snížit přeskokové napětí. Měření probíhalo tak, že jsem při zvolené vzdálenosti zvyšoval napětí, dokud nenastal samovolný výboj. Následně jsem snižoval napětí a po daných krocích jsem spouštěl laser a zjišťoval, zda stále dokáže spustit elektrický výboj. Silné elektromagnetické pole generované výboji bohužel několikrát vyplo zdroj napětí pro laser, proto jsem pro každou polaritu napětí zvolil jen 3 vzdálenosti elektrod, aby se snížila šance poškození zdroje napětí. Pro nejmenší vzdálenost elektrod 0,5 mm laser nedokázal výrazně snížit přeskokové napětí, nicméně výboje i tak dokázal spouštět při hodnotách napětí blízkých hodnotě naměřené bez laseru.



Pro ilustraci snížení přeskovového napětí jsem vynesl do grafu nejnižší přeskovové napětí za použití laseru a porovnal ho s průběhy tabulkových hodnot a naměřených hodnot přeskovového napětí bez laseru (Záporný výboj: Obrázek 49, Kladný výboj: Obrázek 50). Pro vzdálenost elektrod 0,5 mm jsem použil hodnotu přeskovového napětí naměřenou bez laseru.



**Obrázek 49:** Graf závislosti přeskovového napětí na vzdálenosti elektrod pro záporný výboj



**Obrázek 50:** Graf závislosti přeskovového napětí na vzdálenosti pro kladný výboj

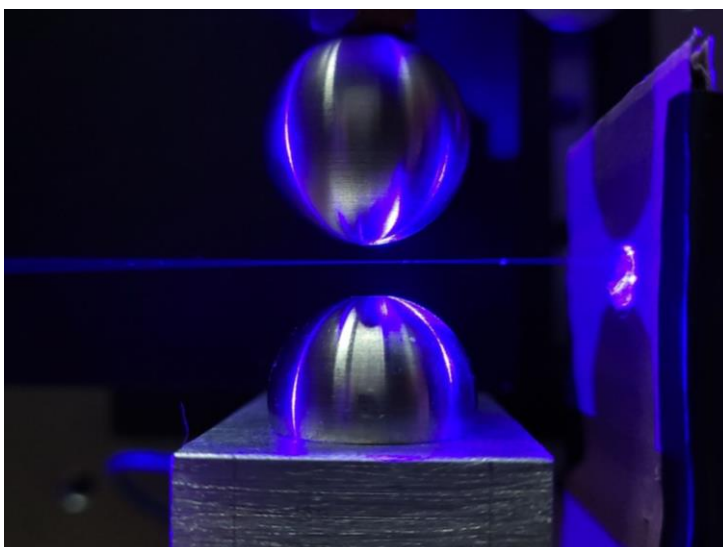
Při tomto měření se ukázalo, že laser dokázal více snížit přeskovové napětí při větší vzdálenosti elektrod (Tabulka 3). Zatímco u vzdálenosti 2 mm se přeskovové napětí díky laseru snížilo o 6,9 % pro záporný výboj a 8,7 % pro kladný výboj, tak při vzdálenosti 5 mm se přeskovové napětí snížilo o 10,5 % pro záporný výboj a pro kladný výboj se snížilo dokonce o 17,4 %.

Vzdálenost [mm]	Záporný výboj	Kladný výboj
0,5	0 %	0 %
2,0	6,9 %	8,7 %
3,5	6,2 %	7,3 %
5	10,5 %	17,4 %

*Tabulka 3: Procentuální snížení přeskovového napětí díky laserovému paprsku*

### 3.2.4. Spouštění výbojů pomocí laserového paprsku kolmo k ose elektrod

V posledním experimentu jsem se snažil spouštět elektrický výboj pomocí laserového paprsku, který byl kolmý k ose elektrod. Laserový paprsek byl zaměřen tak, aby nejmenší průměr paprsku byl mezi elektrodami.



*Obrázek 51: Detail laserového paprsku kolmo k ose elektrod*

Tento experiment se však ukázal jako neúspěšný. Z toho usuzuji, že pro spouštění výboje je třeba, aby byl laserový paprsek namířen na elektrodu, kde může odpařit materiál z povrchu elektrody nebo elektrodu zahřát a způsobit tak termickou ionizaci.

### 3.3. Závěr praktické části

Cílem praktické části mé diplomové práce bylo navrhnout laserový mechanismus, který by umožňoval spouštění elektrických výbojů na jiskřišti. Z experimentů je zřejmé, že můj návrh mechanismu je schopný spouštět elektrické výboje. Laserový paprsek dokázal navíc i snížit hodnotu přeskovového napětí. Toto snížení přeskovového napětí se více projevovalo při větších

vzdálenostech elektrod. Při největší vzdálenosti elektrod 5 mm bylo toto snížení přeskokového napětí větší než 10 % pro obě polaritu výbojů. Toto snížení přeskokového napětí přidává laserovému mechanismu větší manipulační prostor při nastavování napětí na elektrodách. Důležitým výsledkem experimentů je také, že výboj na stejnou vzdálenost šlo spustit i při nižším výkonu laseru. Použití laseru s nižším výkonem by výrazně zlevnilo celý mechanismus.



*Obrázek 52: Detail poškozené elektrody*

Během experimentů jsem identifikoval také nevýhodu tohoto mechanismu. Elektroda, na kterou byl namířený laserový paprsek, měla poškozený povrch. Laserový paprsek tak zřejmě během experimentů odpařoval materiál z povrchu elektrody. Tomu by však šlo zamezit použitím nižšího výkonu laseru nebo použitím elektrod z odolnějšího materiálu. Dalším zlepšením mechanismu by mohlo být použití složitějších optických soustav či optických vláken, tím by šlo laser odsunout do bezpečné vzdálenosti od jiskřiště a provádět tak experimenty s větším napětím na elektrodách. Dalším možným použitím takovýchto laserových mechanismů je pro výboje generované na větší vzdálenost. Pro větší vzdálenosti elektrod by poté byly vhodnější pulsní lasery s velmi krátkou dobou pulsu jako jsou například femtosekundové lasery. U těchto laserů se projevuje jev zvaný laserová filamentace, který dokáže zionizovat mezeru mezi elektrodami a připravit tak cestu pro elektrický výboj. Posledním krokem je poté využití těchto laserů pro spuštění přírodního bleskového výboje. Takovéto lasery by šlo použít jako aktivní hromosvody a spouštět a navádět tak bleskové výboje. Tím by šlo aktivně chránit objekty před bleskovými výboji. Takovéto použití laserů je však ještě stále futuristickou představou, jelikož jsou nesmírně drahé a se svým velmi vysokým výkonem velmi nebezpečné zvláště pro leteckou dopravu.

## 4. Ekonomické zhodnocení

---

V poslední kapitole provedu ekonomické porovnání mého návrhu s konvenční metodou spouštění elektrických výbojů. Tato konvenční metoda spočívá ve využití trigatronu. Porovnání provedu z více pohledů, nejprve stanovím cenu celého mého návrhu a následně analyzuji z ekonomického hlediska provoz mého návrhu a konvenční metody v průběhu jednoho roku a také v delším časovém horizontu.

### 4.1. Ocenění mého návrhu

V Tabulce 4 jsou zobrazeny všechny položky, které bylo třeba pořídit pro sestavení mého návrhu. Nejdůležitější a také nejdražší položkou celého návrhu je laserový modul. Ostatní položky tvoří jen velmi malou část výdajů na celý návrh. V položkách „materiál“ jsou zahrnuty materiály potřebné pro sestavení konstrukce jiskřiště a laserového modulu.

Položka	Cena
Jiskřiště	342 Kč
Elektrody	92 Kč
Materiál	200 Kč
Podložka	50 Kč
Laser	9 151 Kč
Laserový modul	8 951 Kč
Materiál	200 Kč

*Tabulka 4: Součástky pro laserový návrh*

Toto jsou však jen součástky, které je třeba spojit do jednoho funkčního celku. Pro sestavení jiskřiště a konstrukce pro laserový modul jsem navíc využil práci technika, protože bylo třeba, aby bylo jiskřiště precizně sestaveno a konstrukce laseru umožňovala alespoň malý posun všemi směry. Práce specializovaného technika na jiskřišti i na konstrukci laserového modulu čítala přibližně stejný čas, a to konkrétně 4 hodiny. S hodinovou sazbou jeho práce 350 Kč se jedná o významnější položku celkových nákladů mého návrhu.

Kvůli vysokému výkonu laseru bylo též třeba pořídit ochranné brýle, které byly v mém návrhu nezbytné. V Tabulce 5 jsou zobrazeny veškeré náklady na vytvoření mého návrhu. Celková cena mého návrhu je 14 255 Kč.

Položka	Cena
Jiskřiště	1 742 Kč
Elektrody	92 Kč
Materiál	200 Kč
Podložka	50 Kč
Práce technika	1 400 Kč
<b>Laser</b>	<b>12 513 Kč</b>
Laserový modul	8 951 Kč
Materiál	200 Kč
Práce technika	1 400 Kč
Ochranné brýle	1 962 Kč
<b>Celkem</b>	<b>14 255 Kč</b>

*Tabulka 5: Všechny položky pro ocenění laserového návrhu*

Z Tabulky 5 je patrné, že i po zahrnutí práce technika tvoří laserový modul více než polovinu celkových nákladů mého návrhu. V praktické části jsem však dokázal spustit výboj i při nižším výkonu laserového modulu. Levnější laserový modul s nižším výkonem by tak dokázal značně snížit náklady na celý návrh, proto se na tuto položku zaměřím v citlivostních analýzách.

## 4.2. Porovnání mého návrhu s konvenční metodou

Porovnání provozu provedu ve dvou časových horizontech. První porovnání bude na základě ročních výdajů na provoz obou zařízení a druhé na základě kritéria čisté současné hodnoty výdajů na provoz během pěti let.

### 4.2.1. NPV

Čistá současná hodnota (*Net Present Value*) je jedním z nejpoužívanějších kritérií hodnocení investic. NPV vyjadřuje rozdíl mezi současnou hodnotou příjmů a výdajů a umožňuje efektivně porovnávat různé investice. Výhodou tohoto kritéria je, že hodnota NPV vždy existuje a lze spočítat pro jakoukoliv investici. Další výhodou je, že respektuje cenu peněz. Ta je vyjádřena diskontem, pomocí kterého se všechny budoucí hotovostní toky přepočítají na současnou hodnotu. Diskont reprezentuje návratnost či riziko dané investice. Diskont se může během doby porovnání měnit, to však značně komplikuje samotný výpočet. Za předpokladu konstantního diskontu je NPV definováno vztahem:

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (4)$$

Kde  $NPV$  je čistá současná hodnota,

$CF_t$  je hotovostní tok v roce  $t$ ,  
 $r$  je diskont,  
 $n$  je doba porovnání.

Investice je většinou hotovostní tok v nultém roce, hodnota investice je tak již v současné hodnotě a není třeba ji diskontovat. Proto se pro lepší přehlednost často uvádí také vzorec s vyjádřenou investicí:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} - INVESTICE \quad (5)$$

Z rovnice 5 vyplývá, že hodnota NPV roste společně s kladným rostoucím hotovostním tokem v jednotlivých letech. Pro hledání nejlepší investice pomocí tohoto kritéria je třeba hledat investici s největší hodnotou NPV.

Jistou modifikací tohoto kritéria je NPV výdajů. Tato varianta přichází v úvahu, když investici chybí informace o příjmech nebo sama příjmy negeneruje, a je tak možné počítat jen s výdaji. V tomto případě výsledná hodnota NPV výdajů vyjadřuje součet diskontovaných výdajů za dobu porovnání. Když se jedná o sumu výdajů, tak nejlepší investice bude mít hodnotu NPV výdajů nejmenší.

## 4.2.2. Předpoklady pro modely provozu

Obě metody porovnáám v provozu výzkumné instituce (fakulty), kde je potřeba úspěšně spustit určitý počet výbojů v průběhu roku. Pro obsluhu celého zařízení stačí pouze jeden člověk, takže budu uvažovat jednoho zaměstnance v průběhu celé doby porovnání.

### 4.2.2.1. Konvenční metoda

Jako konvenční metodu spouštění elektrických výbojů jsem zvolil použití trigatronu. Trigatron lze pořídit za cenu pohybující se okolo 7 300 Kč. Cena trigatronu bude v mém modelu 7 300 Kč a při pětileté době porovnání bude cena nového trigatronu růst společně s mírou inflace.

### 4.2.2.2. Úspěšnost spouštění výbojů

V mých experimentech jsem dokázal laserovým paprskem výboj spustit vždy, když bylo napětí na elektrodách blízko předpokládanému přeskokovému napětí. V modelu provozu laserového systému tak budu v dalších výpočtech uvažovat, že tento systém dokáže vždy spustit elektrický

výboj. Tato skutečnost nejde předpokládat u trigatronu, ten úspěšně spouští výboje pouze v těsné blízkosti předpokládaného přeskokového napětí. Při nastavování napětí na elektrodách se může stát, že výboj vznikne samovolně, protože napětí na elektrodách je potřeba nastavit velmi blízko přeskokovému napětí. V opačném případě se může stát, že nastavené napětí na elektrodách je velmi malé a nepovede se vůbec spustit elektrický výboj. Z těchto důvodů budu uvažovat úspěšnost spouštění výbojů trigatronu v 95 % případů. Na trigatronu je třeba uskutečnit více pokusů, aby se podařilo spustit předem daný počet výbojů.

#### **4.2.2.3. Doba živostnosti**

Dalším důležitým parametrem obou metod je doba životnosti. U laserového modulu uvádí výrobce, že za optimálních podmínek dokáže laser fungovat více než 5 let. Nicméně laser je určen pro gravírování. Proto se během těchto 5 let předpokládá, že bude dlouhodobě namáhán, což je zcela opačný případ použití než v popisovaném návrhu. V mém návrhu stačí laserový modul pouze na chvíli (přibližně na 1 sekundu) zapnout a spustit výboj. Proto předpokládám, že laserový modul bude fungovat po celou dobu porovnávání a nebude jej třeba měnit. U trigatronu toto nepředpokládám, jelikož při jeho provozování může docházet k opotřebování či poškození spouštěcí elektrody při neúspěšných pokusech. Předpokládám, že bude třeba pořídit nový trigatron po realizaci cca 10 000 experimentů.

#### **4.2.2.4. Časová náročnost pokusů**

Dalším faktorem v mém modelu je časová náročnost pokusů. Zařízení v průběhu doby porovnání obsluhuje jeden zaměstnanec a čas jednotlivých pokusů tak stanovuje jeho pracovní dobu. Časová náročnost standardního pokusu, kdy je třeba nastavit celý systém, je 5 minut. Při opakovaných pokusech předpokládám, že lze ušetřit 1 minutu nastavování celého systému, a proto je časová náročnost opakovaných pokusů 4 minuty.

#### **4.2.2.5. Náklady na zaměstnance**

Spouštění elektrických výbojů je nebezpečná činnost, nicméně po důkladném proškolení by mohl celý systém ovládat i zdatnější brigádník či stážista, a tak hodinovou sazbu zaměstnance stanovím na 200 Kč/hod. Hodinová sazba zaměstnance však bude v pětiletém modelu růst společně s mírou inflace.

#### 4.2.2.6. Náklady na provoz a energii

Jelikož se jedná pouze o mechanismus spouštění výbojů, který sám o sobě nemá velkou spotřebu elektrické energie, předpokládám, že obě metody budou mít srovnatelnou spotřebu elektrické energie. Náklady na elektrickou energii ve svém modelu nebudu uvažovat, neboť jsou relativně velmi nízké.

Dalším přijatým předpokladem je, že laserový paprsek nepoškozuje elektrody. Při mém experimentování elektroda, na kterou byl namířený laserový paprsek, lehce poškodila. V modelu provozování laserového mechanismu ale nepředpokládám, že se bude elektroda opotřebovávat. Tomuto poškození lze předejít použitím menšího výkonu laserového modulu či použitím elektrod z jiného odolnějšího materiálu nebo na elektrodu nanést tenkou vrstvu odolnějšího materiálu jako je například titan či wolfram. Obě metody jsou velmi nenáročné na údržbu, tyto náklady jsou v modelu zanedbatelné, a proto je nebudu uvažovat. Provozní náklady obou metod jsou tak prakticky pouze náklady na zaměstnance.

#### 4.2.2.7. Stanovení diskontu a inflace

Inflace má odlišný vliv na obě varianty kvůli rozdílným výdajům během doby porovnání, proto je třeba počítat víceletý model v nominálních cenách. Hlavním rozdílem obou variant z tohoto pohledu jsou výdaje nové trigatrony, které budou v průběhu doby porovnání poznamenané vzrůstem cenové hladiny. U varianty s laserem předpokládám, že laserový modul nebude potřeba v průběhu doby porovnání měnit, tato varianta je tak méně závislá na inflaci. Dle prognózy ČNB z léta 2023 bude v roce 2023 inflace ve výši 11 % a v dalších letech se vrátí na inflační cíl 2 % a dokonce by mohla být i nižší. Ve svém modelu tak budu inflaci modelovat v nultém roce 11 % a v dalších letech konstantně 2 %. [23]

Diskont má charakter ceny ušlé příležitosti. V tomto případě se jedná o cenu peněz výzkumného instituce, který by peníze investoval jinak do jiného výzkumu. Proto stanovím reálný diskont velmi malý, na 1 %, po celou dobu porovnávání. Následně je potřeba přepočítat reálný diskont na nominální podle vztahu:

$$r_n = (1 + r_r)(1 + \alpha) - 1 \quad (6)$$

Kde  $r_n$  je nominální diskont,  
 $r_r$  je reálný diskont,  
 $\alpha$  je míra inflace.



Diskont se však projeví při výpočtu NPV až v prvním roce. Od prvního roku doby modelování je v mém modelu inflace konstantní, nominální diskont bude také při výpočtech konstantní a podle rovnice 6 nabývá hodnoty: 3,02 %.

### 4.2.3. Porovnání metod v ročním provozu

Jako první kritérium pro porovnání obou variant jsem zvolil analýzu ročních výdajů. Posledním faktorem mého modelu je počet potřebných úspěšných experimentů. Pro počet experimentů zvolím 3 scénáře výzkumu: malý, střední a velký výzkum. V malém výzkumu je potřeba provést měsíčně 100 úspěšných experimentů, ve středním výzkumu 500 úspěšných experimentů a ve velkém výzkumu 1 000 úspěšných experimentů.

Laser	Měsíční hodnoty			Roční hodnoty		
Počet úspěšných experimentů	100	500	1 000	1 200	6 000	12 000
Počet provedených experimentů	100	500	1 000	1 200	6 000	12 000
Časová náročnost [h]	8,3	41,7	83,3	100	500	1 000
Náklady na zaměstnance [Kč]	1 667	8 333	16 667	20 000	100 000	200 000

*Tabulka 6: Časová náročnost a náklady na zaměstnance pro laserový návrh*

Trigatron	Měsíční hodnoty			Roční hodnoty		
Počet úspěšných experimentů	100	500	1 000	1 200	6 000	12 000
Počet provedených experimentů	106	527	1 053	1 264	6 316	12 632
Časová náročnost [h]	8,7	43,5	86,9	104,3	521,1	1 042,1
Náklady na zaměstnance [Kč]	1 747	8 693	17 373	20 853	104 213	208 427

*Tabulka 7: Časová náročnost a náklady na zaměstnance pro trigatron*

Z Tabulky 6 a Tabulky 7 je zřejmá hlavní výhoda laserového mechanismu, tento mechanismus dokáže spustit všechny výboje. Při provozování laserového mechanismu nejsou třeba žádné opravné pokusy. Trigatron nicméně tuto výhodu nemá, při jeho provozování jsou potřeba opravné pokusy.

Rozdílová tabulka	Měsíční hodnoty			Roční hodnoty		
Počet úspěšných experimentů	0	0	0	0	0	0
Počet provedených experimentů	6	27	53	64	316	632
Časová náročnost [h]	0,4	1,8	3,5	4,3	21,1	42,1
Náklady na zaměstnance [Kč]	80	360	707	853	4 213	8 427

*Tabulka 8: Rozdíl hodnot z Tabulky 6 a Tabulky 7*

V Tabulce 8 je zobrazen rozdíl mezi použitím laserového mechanismu a trigatronu. Kladná hodnota znamená ušetřené jednotky při použití laseru na místo trigatronu. Z této tabulky je zřejmé, že laserový mechanismus dokáže pro malý výzkum (100 spuštěných výbojů měsíčně)

ušetřit 64 experimentů za rok, pro střední výzkum (500 spuštěných výbojů měsíčně) 316 experimentů za rok a pro velký výzkum (1 000 spuštěných výbojů měsíčně) 632 experimentů za rok. Po časové stránce pak laserový mechanismus dokáže ušetřit pro malý výzkum 4,3 hodiny, pro střední výzkum 21,1 hodin, a pro velký výzkum 42,1 hodin. V případě velkého výzkumu tak dochází k největší úspoře nákladů na zaměstnance téměř až 8 500 Kč za rok.

#### 4.2.3.1. Výsledné porovnání ročních výdajů

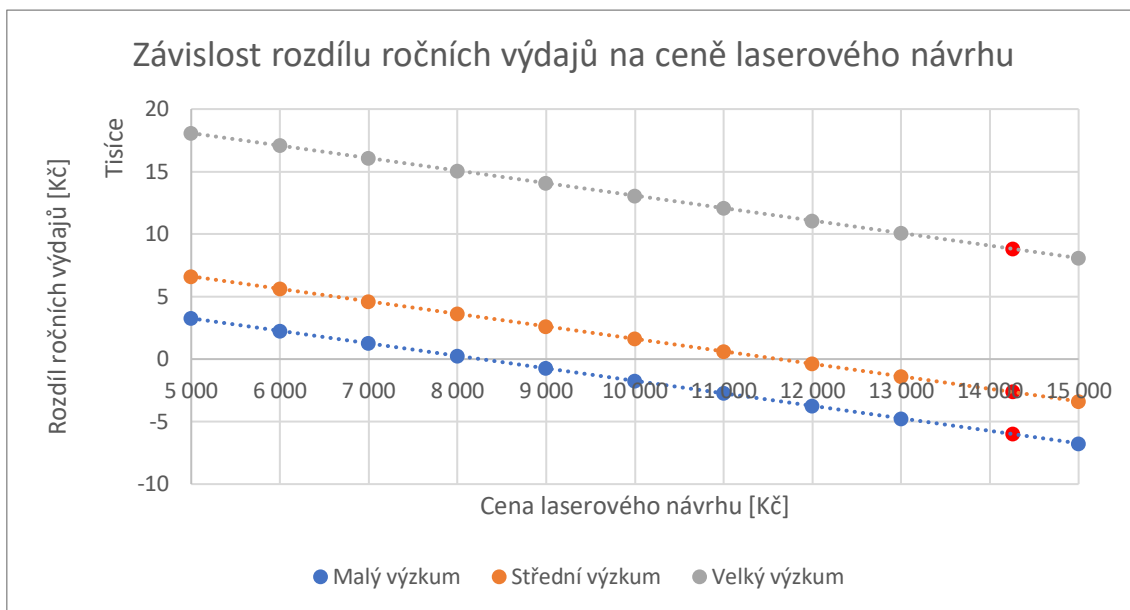
Počet úspěšných experimentů	Celkové výdaje na roční provoz		
	1 200	6 000	12 000
Laser	34 255 Kč	114 255 Kč	214 255 Kč
Trigatron	28 260 Kč	111 620 Kč	223 080 Kč
<b>Rozdíl</b>	<b>-5 995 Kč</b>	<b>-2 635 Kč</b>	<b>8 825 Kč</b>

*Tabulka 9: Výsledné hodnoty ročních nákladů pro obě varianty*

Z výsledné Tabulky 9 celkových ročních výdajů je zřejmé, že laserový mechanismus je výhodnější jen při největší potřebě úspěšných experimentů. Při malém a středním výzkumu se při porovnání ročních výdajů laserový mechanismus nevyplatí. To je dáno vysokou pořizovací cenou laserového mechanismu a malým rozdílem ve výdajích na provoz obou variant. Při velkém výzkumu se projeví nutnost koupě nového trigatronu, proto se již laserový mechanismus vyplatí.

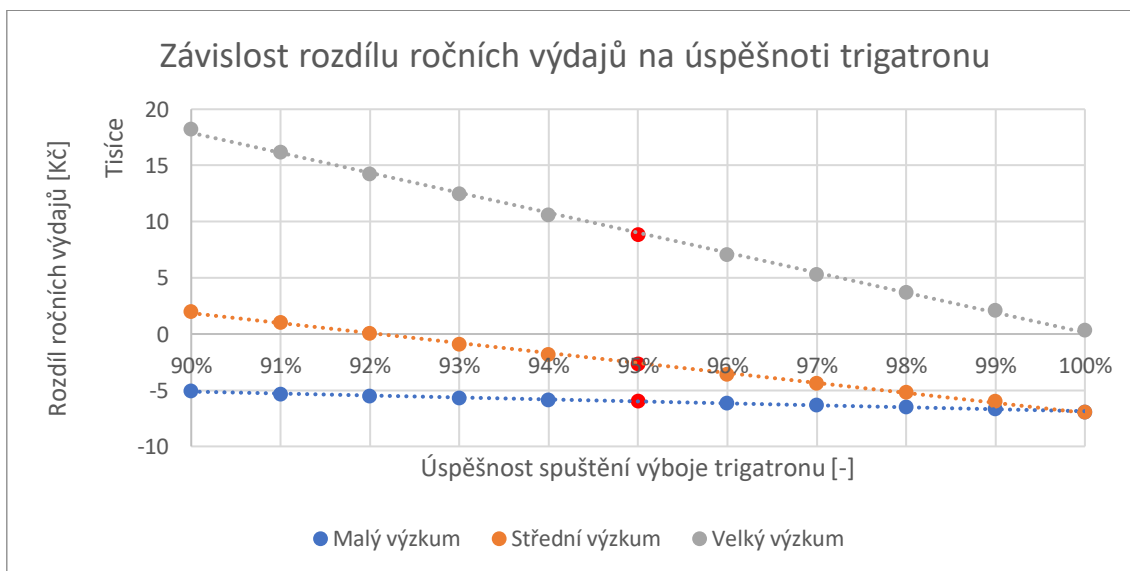
#### 4.2.3.2. Citlivostní analýzy

Citlivostní analýzy jsou vztažené k rozdílu celkových ročních výdajů. Kladný rozdíl celkových ročních výdajů znamená, že trigatron má větší roční výdaje než laserový mechanismus. Laserový mechanismus je při kladném rozdílu výhodnější než trigatron. Cílem citlivostní analýzy na různé parametry je tak nalezení kritické hodnoty parametrů, kdy je již laserový mechanismus výhodnější.



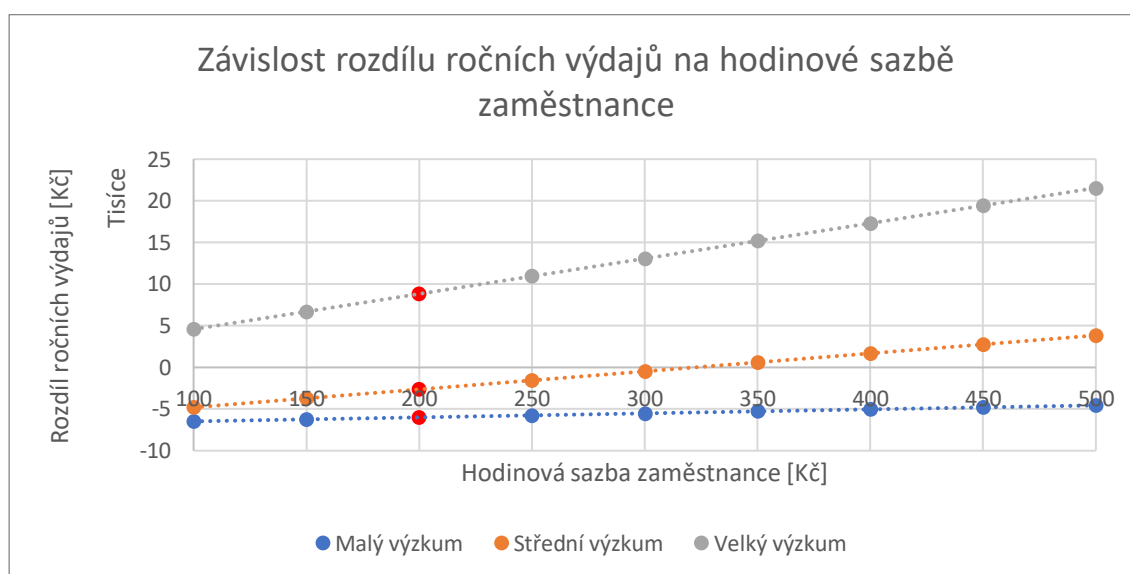
**Obrázek 53:** Graf závislosti rozdílu ročních výdajů na ceně laserového návrhu

Z citlivostní analýzy na cenu laserového návrhu (Obrázek 53) vyplývá, že existuje kritická hodnota ceny pro všechny zvolené varianty výzkumu. Pro velký výzkum je laserový mechanismus vždy výhodnější. Pro střední výzkum je laserový mechanismus výhodnější při ceně 11 600 Kč a nižší. Pro malý výzkum je laserový mechanismus výhodnější při ceně mechanismu pod 8 250 Kč. Je tak otázkou, za jakou nejnižší cenu je možné sestavit funkční laserový mechanismus, to rozeberu v 54



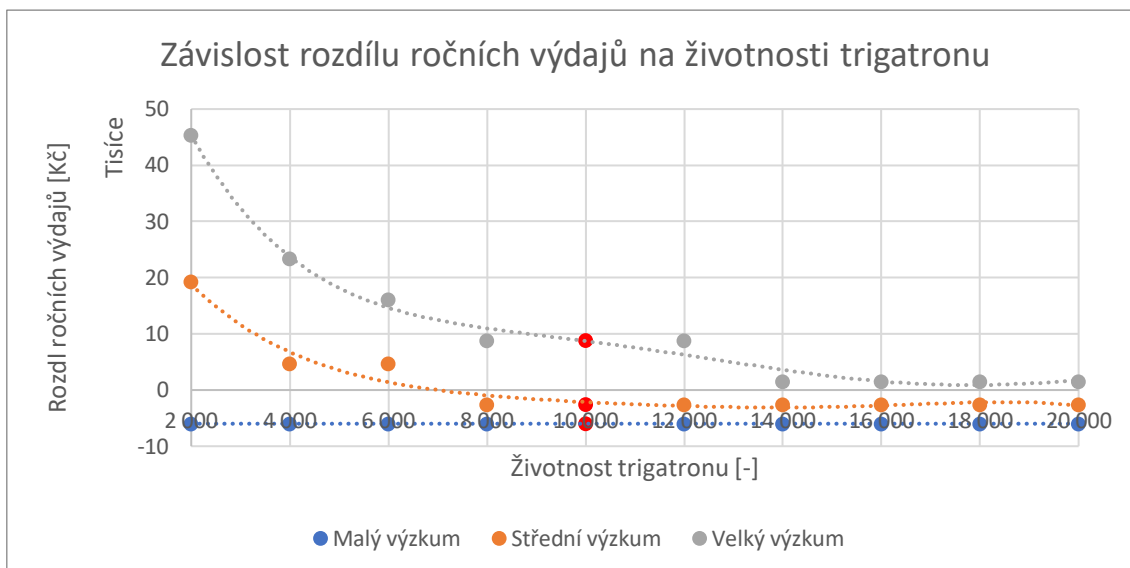
**Obrázek 54:** Graf závislosti rozdílu ročních výdajů na úspěšnosti trigatronu

Z citlivostní analýzy na úspěšnost spouštění výboje pomocí trigatronu (Obrázek 54) je zřejmé, že při nižší úspěšnosti trigatronu je laserový mechanismus výhodnější. Je také zřejmé, že ve velkém výzkumu se laserový mechanismus vyplatí i při 100% úspěšnosti trigatronu. Velký rozdíl oproti malému a střednímu výzkumu je opět způsoben nutností pořízení nového trigatronu ve velkém výzkumu. Kritická hodnota úspěšnosti trigatronu, při které již je laserový mechanismus ve středním výzkumu výhodnější, je 92 %. Pro malý výzkum je tato kritická hodnota 70 %, což je ale velmi nízká hodnota, takže pro malý výzkum není výsledek rozhodnutí závislý na úspěšnosti trigatronu. Nicméně výsledek rozhodnutí u středního výzkumu již závislý na úspěšnosti trigatronu je. Úspěšnost 92 %, kdy se mění rozhodnutí na laserový mechanismus, je velmi blízko původně zvoleným 95 %.



**Obrázek 55:** Graf závislosti na hodinové sazbě zaměstnance

Citlivostní analýza na hodinovou cenu zaměstnance (Obrázek 55) opět ukazuje, že ve velkém výzkumu je výhodnější laserový mechanismus ve všech případech. Pro malý výzkum se laserovým mechanismus opět nevyplatí, kritická hodnota hodinové ceny zaměstnance, kdy je laserový mechanismus výhodnější je 1 450 Kč/hod, což je velmi velká hodnota. Lze uvést, že pro malý výzkum je rozhodnutí, zda využít laserový mechanismus pro spouštění výbojů, nezávislé na hodinové sazbě zaměstnance. Pro střední výzkum se rozhodnutí mění při hodinové sazbě zaměstnance 330 Kč/hod, což je hodnota relativně vysoká, avšak ne nereálná.



**Obrázek 56:** Graf závislosti rozdílu ročních výdajů na životnosti trigatronu

Citlivostní analýza na životnost trigatronu (Obrázek 56) ukazuje, že pro malý výzkum je vždy výhodnější trigatron. To je dáno tím, že během jednoho roku při malém výzkumu není potřeba pořizovat nový trigatron. Pro střední výzkum se rozhodnutí mění při životnosti trigatronu 6 320 pokusů. Při výše uvedené životnosti trigatronu je již třeba během ročního provozování pořídit nový přístroj, a tím se změní výsledek rozhodnutí o výhodnější variantě. Nicméně takováto životnost trigatronu je značně malá a předpokládám bych její skutečnost jedině v krajních případech. Pro velký výzkum je opět vždy výhodnější laserový mechanismus.

#### 4.2.4. Porovnání metod ve víceletém provozu

Druhé porovnání obou návrhů provedu na základě hodnot NPV víceletého provozu. Dobu porovnání jsem zvolil 5 let. Stejně jako v předešlém porovnání uvažuji 3 scénáře pro počet úspěšných experimentů. V tomto případě je jen tento počet přepočítaný na roční hodnotu. V malém výzkumu je třeba provést 1 200 úspěšně spuštěných výbojů za rok, ve středním výzkumu 6 000 výbojů za rok a ve velkém výzkumu 12 000 výbojů za rok.

Laser	Pětileté hodnoty		
Počet úspěšných experimentů	6 000	30 000	60 000
Počet provedených experimentů	6 000	30 000	60 000
Časová náročnost [h]	500	2 500	5 000
Náklady na zaměstnance	109 805 Kč	549 026 Kč	1 098 052 Kč

**Tabulka 10:** Časová náročnost a náklady na zaměstnance pro laserový mechanismus

Trigatron	Pětileté hodnoty		
Počet úspěšných experimentů	6 000	30 000	60 000
Počet provedených experimentů	6 316	31 579	63 158
Časová náročnost [h]	521,1	2 605,3	5 210,5
Náklady na zaměstnance	114 490 Kč	572 159 Kč	1 144 317 Kč

*Tabulka 11: Časová náročnost a náklady na zaměstnance pro trigatron*

Z Tabulky 10 a Tabulky 11, kde jsou zobrazeny pětileté hodnoty počtu experimentů, časové náročnosti a náklady na zaměstnance, je opět zřejmý hlavní nedostatek trigatronu (potřeba jeho výměny), který se v delším časovém horizontu projeví výrazněji. V Tabulce 12 níže je vidět, že laserový mechanismus dokáže při největším počtu úspěšných experimentů ušetřit až 3 158 experimentů. Tím pádem laserový mechanismus dokáže ušetřit ve velkém výzkumu 46 265 Kč, při středním výzkumu 23 132 Kč a při malém výzkumu 4 685 Kč z nákladů na zaměstnance.

Rozdílová tabulka	Pětileté hodnoty		
Počet úspěšných experimentů	0	0	0
Počet provedených experimentů	316	1579	3 158
Časová náročnost [h]	21,1	105,3	210,5
Náklady na zaměstnance	4 685 Kč	23 132 Kč	46 265 Kč

*Tabulka 12: Rozdíl hodnot z Tabulky 10 a Tabulky 11*

#### 4.2.4.1. Výsledné porovnání NPV

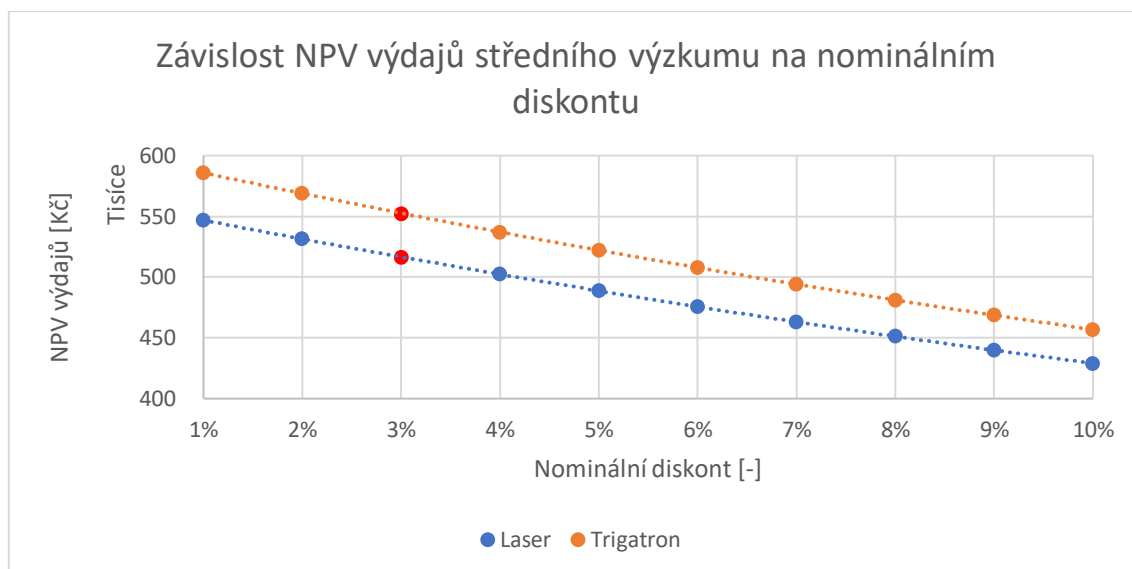
	NPV		
Počet úspěšných experimentů	6 000	30 000	60 000
Laser	114 654 Kč	516 252 Kč	1 018 249 Kč
Trigatron	111 983 Kč	552 289 Kč	1 097 497 Kč
<b>Rozdíl</b>	<b>-2 671 Kč</b>	<b>36 037 Kč</b>	<b>79 248 Kč</b>

*Tabulka 13: Výsledné hodnoty NPV obou variant*

Z výsledné Tabulky 13, která zobrazuje výsledné hodnoty NPV, lze usoudit, že laserový mechanismus je při delší době porovnání výhodnější i při středním výzkumu. To je dáno tím, že v delším časovém horizontu je třeba udělat více experimentů a vícekrát vyměnit trigatron.

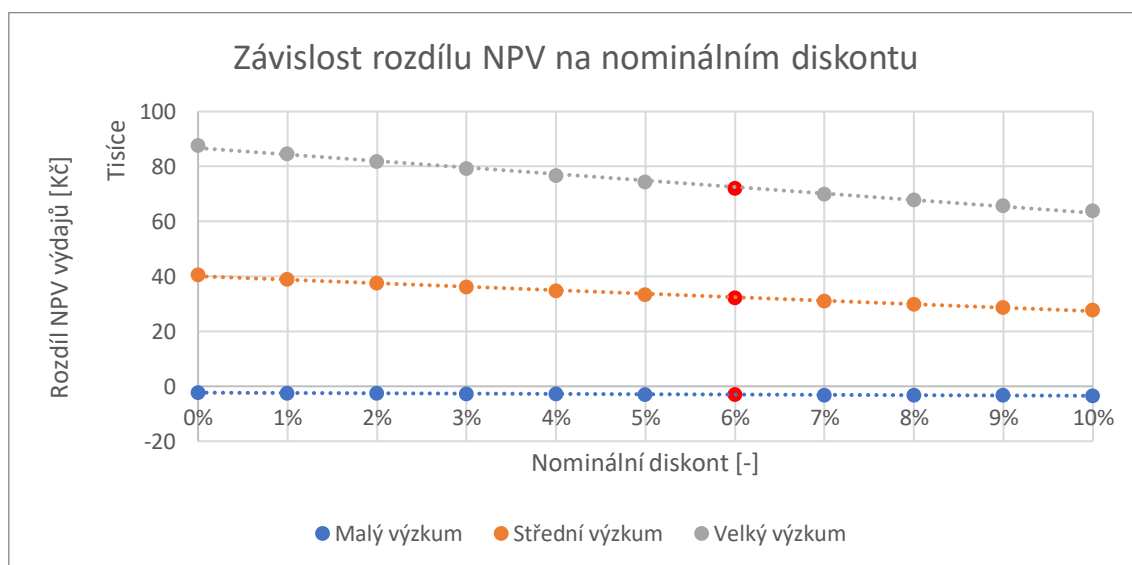
#### 4.2.4.2. Citlivostní analýzy

Citlivostní analýzy jsou vztaženy k rozdílu hodnot NPV obou variant. Opět platí, že při kladném rozdílu NPV je trigatron horší než laserový mechanismus. Jediný graf na Obrázku 57 není vztažen k rozdílu hodnot NPV ale ke konkrétním hodnotám obou variant.



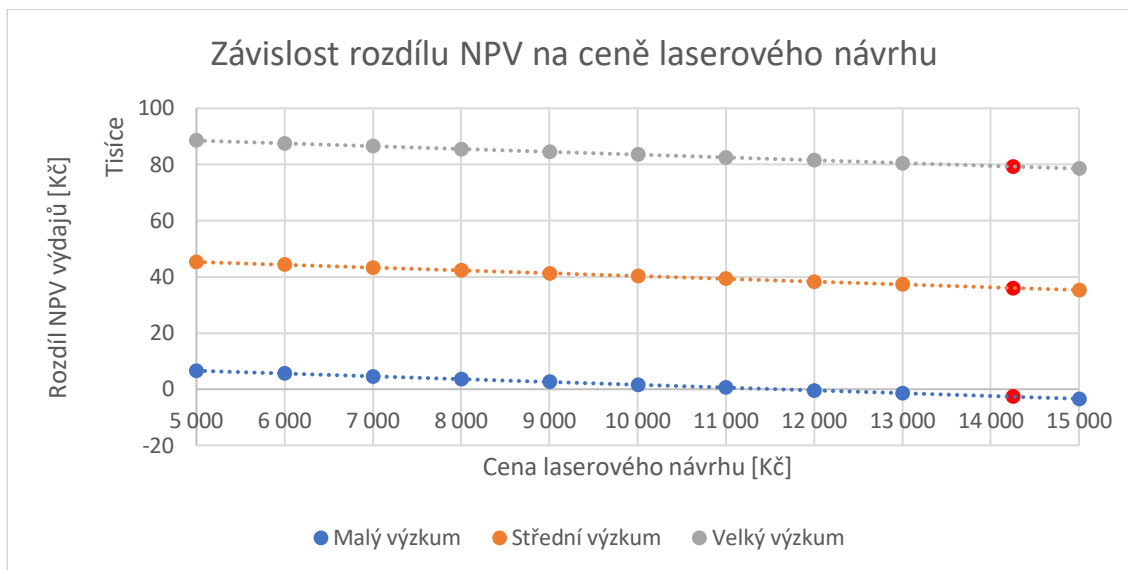
Obrázek 57: Graf závislosti NPV výdajů středního výzkumu na nominálním diskontu

První citlivostní analýza je na změnu nominálního diskontu obou variant ve středním výzkumu (Obrázek 57). Je zřejmé, že změna nominálního diskontu má stejný vliv na obě varianty. Stejný výsledek je i pro malý a velký výzkum. Neexistuje žádná rozumná hodnota nominálního diskontu, při které by se měnilo rozhodnutí, že laserový mechanismus je výhodnější pro střední výzkum.



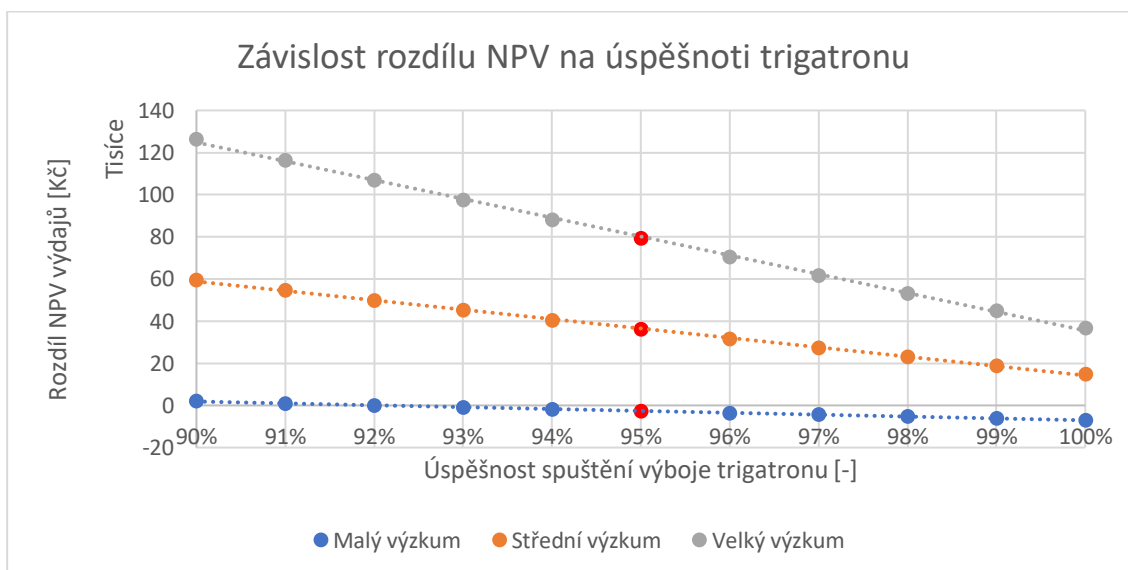
Obrázek 58: Graf závislosti rozdílu NPV na nominálním diskontu

Citlivostní analýza na změnu rozdílu NPV při změně nominálního diskontu (Obrázek 58) ukazuje, že neexistuje žádná rozumná hodnota nominálního diskontu pro všechny 3 scénáře výzkumu, při které by se měnilo rozhodnutí o výhodnější variantě.



**Obrázek 59:** Graf závislosti rozdílu NPV na ceně laserového návrhu

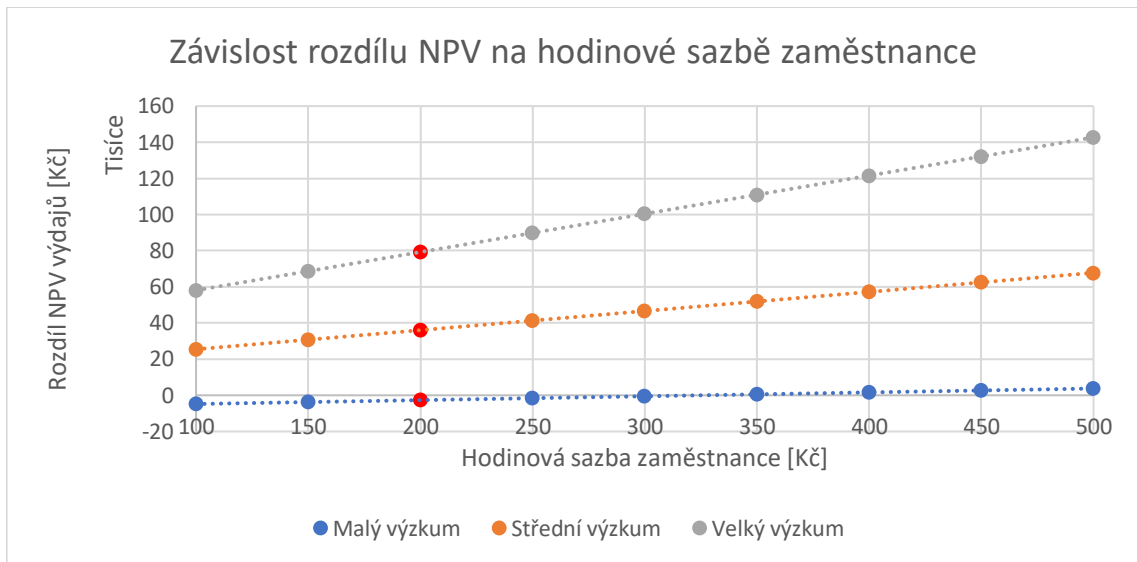
Z citlivostní analýzy na ceně laserového návrhu (Obrázek 59) je zřejmé, že pro střední a velký výzkum je laserový mechanismus vždy výhodnější. To je dáno především tím, že při delší době porovnání se více projeví kratší životnost trigatronu, a tím nutnost kupovat nový přístroj během výzkumu. Pro malý výzkum již existuje kritická hodnota ceny laserového mechanismu, která je 11 500 Kč. Pokud by bylo možné laserový návrh zlevnit na cenu 11 500 Kč a méně, tak by byl výhodnější než trigatron. Možné zlevnění laserového mechanismu rozeberu v 54



**Obrázek 60:** Graf závislosti rozdílu NPV na úspěšnosti trigatronu

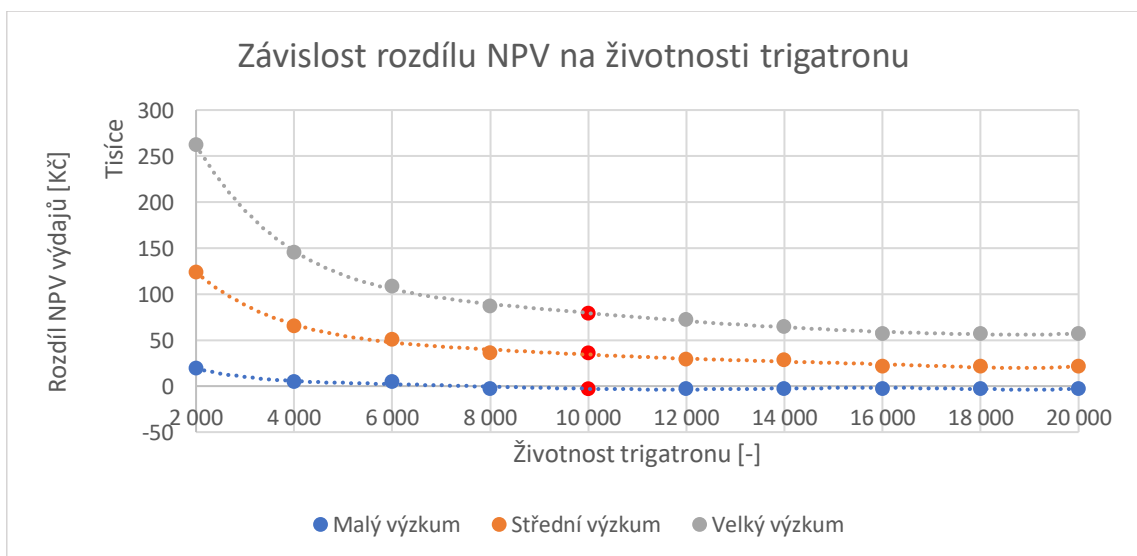


Z citlivostní analýzy na úspěšnost trigatronu (Obrázek 60) vyplývá, že pro střední i velký výzkum je laserový mechanismus vždy výhodnější, dokonce i při 100% úspěšnosti trigatronu. Při komparaci variant s delší dobou porovnání se více projeví menší životnost trigatronu a laserový mechanismus je i přes stejnou úspěšnost spouštění výbojů vhodnější. Pro malý výzkum se rozhodnutí mění při 92% úspěšnosti trigatronu, což je relativně reálná hodnota, takže pro malý výzkum jsou v tomto případě obě varianty téměř rovnocenné.



**Obrázek 61:** Graf závislosti rozdílu NPV na hodinové sazbě zaměstnance

Citlivostní analýza na hodinovou cenu zaměstnance (Obrázek 61) opět ukazuje, že pro velký a střední výzkum je laserový mechanismus vždy výhodnější. Pro malý výzkum je kritická hodnota hodinové ceny zaměstnance, kdy se mění rozhodnutí, 330 Kč. Tato hodinová sazba je relativně vysoká, nicméně výsledky obou variant jsou pro malý výzkum opět velmi podobné.



**Obrázek 62:** Graf závislosti NPV na životnosti trigatronu

Citlivostní analýza na životnost trigatronu (Obrázek 62) ukazuje, že při velmi malé životnosti je laserový mechanismus výhodnější. Laserový mechanismus je vhodnější dokonce i pro malý výzkum, pokud je životnost trigatronu nižší než 6 320 experimentů. Při takové životnosti je již v průběhu doby porovnání třeba pořídit nový trigatron, což se projeví na značném ekonomickém zhoršení této varianty. Pro velký a střední výzkum je laserový mechanismus výhodnější i při dvojnásobné životnosti trigatronu.

#### 4.2.5. Možnost zlevnění laserového mechanismu

V jednom z experimentů jsem dokázal, že laserový mechanismus dokáže spustit elektrický výboj i při nižším výkonu, konkrétně se jednalo o výkon přibližně 3 W. Lze uvést, že mnou zvolený laserový modul s výkonem až 11 W byl předimenzovaný. Nabízí se první možnost, jak zlevnit celý laserový návrh výběrem laserového modulu s nižším výkonem. Cena laserových modulů s výkonem 3 W se pohybuje okolo 3 000 Kč, což by znamenalo úsporu téměř 6 000 Kč z výsledné ceny celého návrhu. Další možností, jak zlevnit návrh, je využít možnosti 3D tisku. V mém návrhu jsem nechal vytvořit konstrukce jiskřiště a laserového modulu technikem, což značně zdražilo celý návrh. Tyto části však lze vytisknout na 3D tiskárně a výrazně tak ušetřit za jejich výrobu. Jednotlivé konstrukce nemají složitý tvar a s přesným tiskem by také nebylo potřeba řešit možnost posunu laserového modulu všemi směry. Návrhy konstrukcí pro 3D tisk by zabraly přibližně 3 hodiny, s hodinovou sazbou 200 Kč by tak náklady na návrh obou konstrukcí byly 600 Kč. Na materiál konstrukce je třeba počítat přibližně se 100 Kč. Dále je nutné opatřit mosazné šrouby, kterými by se přichytily kulové elektrody. V poslední řadě je případně možné upustit od nákupu bezpečnostních brýlí, pokud by se celý návrh zapouzdřil a laserový paprsek by nemohl pronikat ven z pouzdra. Jako pouzdro by šlo využít například větší krabice, takže cenu pouzdra neuvažuji stejně jako nutnost využití brýlí. Všechny komponenty levnějšího návrhu jsou zobrazeny v Tabulce 14.

Položka	Cena
Jiskřiště	812 Kč
Elektrody	92 Kč
Šrouby	20 Kč
3D tisk	700 Kč
<b>Laser</b>	<b>3 700 Kč</b>
Laserový modul	3 000 Kč
3D tisk	700 Kč
<b>Celkem</b>	<b>4 512 Kč</b>

Tabulka 14: Všechny položky pro ocenění levnějšího laserového návrhu

S výslednou cenou 4 512 Kč se jedná o velmi značné snížení ceny prakticky až na třetinu z původního návrhu vyčísleného na 14 255 Kč. Z citlivostní analýzy (Obrázek 53) změny ročních výdajů na provoz obou variant vyplynulo, že laserový mechanismus je výhodnější pro malý výzkum při ceně 8 250 Kč a nižší, pro střední výzkum poté při ceně 11 600 a nižší. V citlivostní analýze (Obrázek 59) změny NPV se ukázalo, že laserový mechanismus je výhodnější pro malý výzkum při ceně 11 500 Kč a nižší. Cena nového levnějšího návrhu je nižší než všechny tyto tři kritické hodnoty ceny laserového návrhu. Závěrem této analýzy vyplývá, že při využití levnějšího návrhu je laserový mechanismus vždy vhodnější než trigatron, což je potvrzeno i v Tabulce 15 a Tabulce 16.

	Celkové výdaje na roční provoz		
Počet úspěšných experimentů	1 200	6 000	12 000
Laser	24 512 Kč	104 512 Kč	204 512 Kč
Trigatron	28 260 Kč	111 620 Kč	223 080 Kč
<b>Rozdíl</b>	<b>3 748 Kč</b>	<b>7 108 Kč</b>	<b>18 568 Kč</b>

*Tabulka 15: Výsledné hodnoty ročních nákladů pro levnější laserový návrh*

	NPV		
Počet úspěšných experimentů	6 000	30 000	60 000
Laser	104 911 Kč	506 509 Kč	1 008 506 Kč
Trigatron	111 983 Kč	552 289 Kč	1 097 497 Kč
<b>Rozdíl</b>	<b>7 072 Kč</b>	<b>45 780 Kč</b>	<b>88 991 Kč</b>

*Tabulka 16: Výsledné hodnoty NPV pro levnější laserový návrh*

### 4.3. Závěr ekonomické části

V ekonomické části jsem nejprve analyzoval a pak spočítal cenu mého návrhu. S cenou 14 255 Kč se tak jedná téměř o dvojnásobně dražší alternativu ke konvenční metodě spouštění elektrických výbojů. Následně jsem provedl porovnání laserového mechanismu v provozu výzkumné instituce s konvenční metodou. Provedl jsem dvojí porovnání: první na základě výdajů na provoz během jednoho roku a druhé na základě hodnoty NPV v pětiletém provozu.

Konvenční metoda spouštění výbojů pomocí trigatronu, který je o polovinu levnější než laserové spouštění v mém návrhu, má následující hlavní nevýhodu. Trigatron nedokáže úspěšně spouštět výboje se 100% úspěšností a také má značně menší dobu životnosti. Obě porovnání v provozu jsem provedl pro 3 scénáře různě velkého výzkumu podle počtu potřebných úspěšně spuštěných výbojů. Z porovnání ročních výdajů na provoz obou variant vyšlo, že laserový mechanismus je výhodnější pouze pro velký výzkum, který potřeboval 1 000 spuštěných výbojů ročně. Z citlivostních analýz však vyšlo, že při ceně laserového mechanismu 8 250 Kč a méně je již laserový mechanismus výhodnější než trigatron pro všechny 3 velikosti výzkumu. Z porovnání

hodnoty NPV vyšly pro laserový mechanismus ještě optimističtější výsledky. V tomto porovnání byl laserový mechanismus vhodnější jak pro velký výzkum, tak i pro střední výzkum. Při delší době porovnání se již více projevila menší životnost trigatronu a nutnost jeho obnovy. Pro malý výzkum vyšel trigatron stále lépe než laserový mechanismus, nicméně z citlivostních analýz vyšlo, že je laserový mechanismus výhodnější, pokud se cena laserového mechanismu sníží na hodnotu 11 500 Kč a méně. V poslední části jsem provedl analýzu ceny mého návrhu, jelikož zvolený laser byl předimenzovaný a zvolením levnějšího laseru s menším výkonem by celý mechanismus výrazně zvýhodnilo. Po zvolení levnějšího laseru a s využitím 3D tisku se podařilo snížit cenu celého laserového mechanismu pro spouštění elektrických výbojů na 4 512 Kč. Cena se snížila na třetinu původní ceny v mém návrhu. S touto cenou byl již laserový mechanismus výhodnější než trigatron pro všechny tři velikosti výzkumu.

Z celkové analýzy výsledků je patrné, že laserový mechanismus, který dokáže spouštět výboje ve 100 % případech, je výhodnější při intenzivnějším a delším používání. Kritickým parametrem pro vhodnost laserového mechanismu, který lze nejnázemě měnit, je jeho cena. Pokud se povede laserový mechanismus sestavit za cenu podobnou jako má trigatron, tak vyjde laserový mechanismus vždy výhodněji.

Můj návrh byl využit zejména k ověření, zda lze spouštět elektrické výboje pomocí laserového paprsku. V mém návrhu jsem spouštění docílil pomocí gravírovacího laseru, který v místě dopadu paprsku na elektrodu mohl odpařit část materiálu z elektrody nebo elektrodu zahřát a způsobit termální ionizaci.

Gravírovací lasery však standardně mohou svůj paprsek zaměřit na velmi krátkou vzdálenost, na které zároveň poskytují velmi vysoký výkon. Použití těchto laserů pro účely spouštění elektrických výbojů by si vyžádalo optickou soustavu, která by umožňovala lepší zaměření na větší vzdálenosti. Vhodnější by pro tyto účely byly pulsní lasery. Tyto lasery s dostatečně vysokým výkonem dokáží zionizovat vzduch v cestě paprsku a snáz tak připravit cestu pro elektrický výboj. Ve velkých výzkumech se ke spouštění elektrických výbojů na velké vzdálenosti (jednotky metrů) využívají právě výhradně velmi rychlé pulsní lasery.

V rámci velkých experimentů se tyto lasery využívají ke spouštění samotných bleskových výbojů. To se poprvé povedlo ve Švýcarsku v roce 2021. Nabízí se tak myšlenka využití laserových paprsků jako aktivních hromosvodů, což je zatím idea spíše futuristická. Avšak takovýto aktivní hromosvod by měl spoustu výhod, jednalo by se například prakticky o dokonalou ochranu budov před bleskovými výboji, protože by to umožňovalo bleskový výboj nejen uměle spustit, ale také navést na bezpečné místo. Druhá velká výhoda tohoto aktivního hromosvodu by se projevila ve vědeckém využití.

Bleskové výboje jsou náhodným jevem a je tak velmi těžké odhadnout kam a kdy bleskový výboj uhoří. S laserovým systémem pro spouštění by tato náhodná stránka zcela zmizela. Bleskové výboje by tak šlo častěji, přesněji a bezpečněji studovat. Tyto skutečnosti by jistě v budoucnosti přinesly i ekonomické užítky. Jednalo by se zejména o lepší ochranu před bleskovými výboji, a tím by bylo možné předcházet velkým škodám na majetku. Přínos pro vědecké účely by se projevil zejména na poli studování a pochopení bleskových výbojů.

Můj návrh byl připraven pouze pro laboratorní využití. I to, že můj návrh byl funkční, má přínos pro další badatelskou práci. Laserový mechanismus spouštění elektrických výbojů je velmi robustní a bezpečný mechanismus spouštění elektrických výbojů. Laserový modul lze pomocí optických soustav či vláken přesunout do bezpečné vzdálenosti od jiskřiště. Celý mechanismus je relativně jednoduchý, stačí pouze dovést laserový paprsek k elektrodám, pomocí optických vláken by se tato činnost výrazně zjednodušila.

## 5. Závěr

---

V první kapitole mé diplomové práce jsem se zaměřil na vysvětlení fyzikálních a technických souvislostí bleskových výbojů. Nejprve jsem popsal bouřkový oblak a způsob jeho elektrifikace. Dále jsem představil různé typy bleskových výbojů, od těch relativně běžných až po výboje, které téměř ani nelze spatřit okem člověka. Ve své práci jsem se poté zaměřil pouze na bleskové výboje mezi zemí a bouřkovým oblakem a procesem vzniku jejich kanálů. V poslední části první kapitoly jsem představil hlavní myšlenky, které charakterizují samotný vznik celého bleskového výboje, který dosud není zcela prozkoumán.

V druhé kapitole jsem se věnoval možnostem, jak lze bleskové, respektive elektrické, výboje zkoumat. Představil jsem hlavní důvody jejich studia. Následně jsem popsal jejich dva hlavní směry výzkumu. První směr zkoumání bleskových výbojů je jejich umělé spouštění v přírodních podmínkách. Z metod pro umělé spouštění bleskových výbojů jsem se zaměřil na spouštění pomocí raket a laserů. Druhým směrem zkoumání je jejich simulování v laboratorních podmínkách, toto zkoumání jsem popsal v poslední části druhé kapitoly.

Ve třetí kapitole jsem uvedl můj vlastní návrh na spouštění elektrických výbojů pomocí laserového paprsku. Návrh se skládal z laserového modulu a malého jiskřiště s mezerou mezi kulovými elektrodami až 5 mm. Funkčnost mého návrhu se ukázala již při prvním měření, kdy laserový paprsek dokázal spustit všechny elektrické výboje v mezeře 2 mm mezi elektrodami. Dále jsem dokázal elektrický výboj na stejné vzdálenosti elektrod spustit i při nižším výkonu laseru, což je velmi příznivé zjištění pro ekonomickou část. Dále jsem naměřil o kolik dokáže laserový paprsek snížit přeskokové napětí oproti předpokládané hodnotě pro obě polarity napětí. Toto snížení se ukázalo významnější při větších vzdálenostech elektrod. Pro vzdálenost elektrod 2 mm bylo přeskokové napětí sníženo o minimálně 6,9 % pro obě polarity výbojů. Pro vzdálenost elektrod 5 mm bylo přeskokové napětí sníženo dokonce o více než 10 % pro obě polarity. V posledním měření jsem se snažil zjistit, jestli laserový paprsek – namířený mezi elektrody – dokáže také spustit výboj. Toto měření však bylo neúspěšné. Závěrem této části uvádím, že laserový paprsek v mém návrhu musí být namířen na elektrodu, aby dokázal spustit výboj.

V ekonomické části jsem nejprve spočítal cenu mého návrhu a následně jsem porovnal z ekonomického hlediska provoz mého návrhu s konvenční metodou. Toto porovnání jsem provedl z pohledu provozu ve výzkumné instituce v jednoletém a pětiletém výzkumu. V jednoleté době komparace jsem porovnával obě metody podle ročních výdajů na provoz. V pětileté době jsem porovnával výsledné hodnoty NPV výdajů obou metod. Z obou metod porovnání vyšlo, že laserový mechanismus spouštění elektrických výbojů je výhodnější při dlouhodobějším

a intenzivnějším používání. To je způsobeno zejména dvojnásobnou cenou oproti konvenční metodě. Proto jsem se v poslední části zaměřil na možné zlevnění laserového návrhu. Zejména díky zjištění z praktické části, že laserový paprsek dokázal výboj spustit i při nižším výkonu a že je výhodné využití 3D tisku, bylo možno laserový mechanismus sestavit za třetinu původní ceny. Tento levnější návrh již byl v porovnání vždy výhodnější než konvenční metoda i při méně intenzivním používání.

Závěrem uvádím, že laserový mechanismus je schopný spouštět elektrické výboje. Mechanismus dokonce dokáže snižovat přeskokové napětí, a tím přináší větší volnost při spouštění elektrických výbojů. V mém návrhu bylo třeba pro spuštění výboje zamířit paprsek přímo na elektrodu. Nicméně při použití výkonnějších pulsních laserů by tato podmínka nemusela být splněna, jelikož paprsky těchto laserů dokáží zionizovat vzduch. A lze s nimi spustit i samotný bleskový výboj.

## Použitá literatura

---

- [1] *How Lightning Strikes* [online]. 2018 [cit. 2023-07-06]. Dostupné z: <https://scienceatyourdoorstep.com/2018/04/25/how-lightning-strikes/>
- [2] RAKOV, Vladimír A. a Martin A. UMAN. *Lightning: Physics and Effects*. New York: Cambridge University Press, 2002. ISBN 978-0521035415.
- [3] MIKEŠ, Jan. *Přednášky: Ekonomika ochrany před bleskovými výboji* [online]. [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://moodle.fel.cvut.cz/course/view.php?id=6022>
- [4] LAMB, Dennis a Johannes VERLINDE. *Physics and Chemistry of Clouds* [online]. Cambridge University Press, 2011 [cit. 2023-07-07]. ISBN 9780521899109. Dostupné z: [doi:10.1017/CBO9780511976377](https://doi.org/10.1017/CBO9780511976377)
- [5] *Lightning* [online]. 2011 [cit. 2023-07-08]. Dostupné z: [http://www.atmo.arizona.edu/students/courselinks/spring13/atmo589/ATMO489\\_online/lecture\\_14/lect14\\_lightning\\_pt1.html](http://www.atmo.arizona.edu/students/courselinks/spring13/atmo589/ATMO489_online/lecture_14/lect14_lightning_pt1.html)
- [6] NEUBERT, Torsten, Nikolai ØSTGAARD, Victor REGLERO et al. The ASIM Mission on the International Space Station. *Space Science Reviews* [online]. 2019, **215**(2) [cit. 2023-07-11]. ISSN 0038-6308. Dostupné z: [doi:10.1007/s11214-019-0592-z](https://doi.org/10.1007/s11214-019-0592-z)
- [7] *Types of lightning* [online]. 2017 [cit. 2023-07-11]. Dostupné z: <https://www.rmets.org/metmatters/types-lightning>
- [8] *Gigantic Jets: New Research Will Study Mysterious Effects of Gigantic Jet Lightning* [online]. Atlanta, Georgia USA, 2022 [cit. 2023-07-11]. Dostupné z: <https://research.gatech.edu/gigantic-jets-new-research-will-study-mysterious-effects-gigantic-jet-lightning>
- [9] MASHAO, D.C., M.J. KOSCH, M. FÜLLEKRUG a J. MLYNARCZYK. Lightning parameters of sprites and diameter of halos over South Africa. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* [online]. 2022, **240** [cit. 2023-07-11]. ISSN 13646826. Dostupné z: [doi:10.1016/j.jastp.2022.105957](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2022.105957)
- [10] *Terrestrial Gamma-ray Flashes* [online]. [cit. 2023-07-11]. Dostupné z: [https://vlfstanford.ku.edu.tr/research\\_topic\\_inlin/terrestrial-gamma-ray-flashes/](https://vlfstanford.ku.edu.tr/research_topic_inlin/terrestrial-gamma-ray-flashes/)
- [11] DWYER, Joseph R. a Martin A. UMAN. The physics of lightning. *Physics Reports* [online]. 2014, **534**(4), 147-241 [cit. 2023-07-07]. ISSN 03701573. Dostupné z: [doi:10.1016/j.physrep.2013.09.004](https://doi.org/10.1016/j.physrep.2013.09.004)
- [12] *Lightning strikes upwards on Guatemala mountain, photographer captures incredible phenomenon* [online]. 2019 [cit. 2023-07-06]. Dostupné z: <https://www.timesnownews.com/the-buzz/article/pics-lightning-strikes-upwards-on-guatemala-mountain-photographer-captures-incredible-phenomenon/464545>



- [13] PETERSEN, Danyal, Matthew BAILEY, William H. BEASLEY a John HALLETT. A brief review of the problem of lightning initiation and a hypothesis of initial lightning leader formation. *Journal of Geophysical Research* [online]. 2008, **113**(17) [cit. 2023-05-03]. ISSN 0148-0227. Dostupné z: doi:10.1029/2007JD009036
- [14] RAKOV, Vladimir A. a Alexander M. SERGEEV. *Initiation of lightning in thunderclouds/title* [online]. In: . s. 597512-597512-12 [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: doi:10.1117/12.675583
- [15] HELMAN, D.S. Catching lightning for alternative energy. *Renewable Energy* [online]. 2011, **36**(5), 1311-1314 [cit. 2023-07-05]. ISSN 09601481. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2010.10.027
- [16] ZHANG, Haitao, Qihang GONG, Pu WANG, Franz X. KÄRTNER, Zhiyi WEI, Chunqing GAO a Stefan A. WEBER. Triggering and guiding of lightning by ultrafast lasers. In: *2019 International Conference on Optical Instruments and Technology: Advanced Laser Technology and Applications* [online]. SPIE, 2019, s. 53- [cit. 2023-05-03]. ISBN 9781510636521. Dostupné z: doi:10.1117/12.2550060
- [17] HOUARD, Aurélien, Pierre WALCH, Thomas PRODUIT et al. Laser-guided lightning. *Nature Photonics* [online]. 2023, **17**(3), 231-235 [cit. 2023-07-13]. ISSN 1749-4885. Dostupné z: doi:10.1038/s41566-022-01139-z
- [18] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. *Ochrana před bleskem - Část 1: Obecné principy*. 09/2011.
- [19] LA FONTAINE, Bruno, Daniel COMTOIS, Ching-Yuan CHIEN et al. Guiding large-scale spark discharges with ultrashort pulse laser filaments. *Journal of Applied Physics* [online]. 2000, **88**(2), 610-615 [cit. 2023-07-19]. ISSN 0021-8979. Dostupné z: doi:10.1063/1.373710
- [20] *Tripping of Impulse Generator* [online]. [cit. 2023-08-01]. Dostupné z: <https://www.eeguide.com/tripping-of-impulse-generator/>
- [21] SCHUBERT, Elise, Ali RASTEGARI, Chengyong FENG et al. HV discharge acceleration by sequences of UV laser filaments with visible and near-infrared pulses. *New Journal of Physics* [online]. 2017, **19**(12) [cit. 2023-07-28]. ISSN 1367-2630. Dostupné z: doi:10.1088/1367-2630/aa9b76
- [22] *KJ\_Tabulka* [online]. 2011 [cit. 2023-07-22]. Dostupné z: [https://www.powerwiki.cz/wiki/KJ\\_Tabulka](https://www.powerwiki.cz/wiki/KJ_Tabulka)
- [23] *Prognóza ČNB – léto 2023* [online]. 2023 [cit. 2023-08-05]. Dostupné z: <https://www.cnb.cz/cs/menova-politika/prognoza/>