

Univerzita Karlova

Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geografie

Studijní obor: Fyzická geografie a geoekologie



Lucie Pacovská

**Porovnání měření pozemních sítí detekujících blesky
nad územím Česka**

Comparison of lightning detection networks over Czechia

Diplomová práce

Vedoucí práce: RNDr. Jana Popová, Ph.D.

Praha, 2023

Charles University

Faculty of Science

Zadání diplomové práce

Název práce:

Porovnání měření pozemních sítí detekujících blesky nad územím Česka

Cíle práce:

Cílem této práce je porovnat různé charakteristiky blesků nad územím Česka za použití tří pozemních detekčních sítí.

Použité pracovní metody, zájmové území, datové zdroje:

V práci jsou použity základní statistické metody pro analýzu statistických souborů. Jsou zpracovávána data z celosvětové sítě WWLLN (World Wide Lightning Location Network), amatérské sítě Blitzortung a evropské sítě EUCLID (EUropean Cooperation for LIghtning Detection). Zájmovým územím je oblast se středem nad Českem, konkrétně mezi $48,45^{\circ}$ - $51,19^{\circ}$ severní zeměpisné šířky a mezi $11,87^{\circ}$ - $18,48^{\circ}$ východní zeměpisné délky.

Datum zadání práce: 30.11.2021

Jméno studenta: Lucie Pacovská

Podpis studenta:

Jméno vedoucího práce: RNDr. Jana Popová, Ph.D.

Podpis vedoucího práce:

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne

Bc. Lucie Pacovská

Abstrakt:

Práce se zaměřuje na pozemní detekci bleskových výbojů, jež stále mají každoročně na svědomí ztrátu na lidských životech. Po představení několika pozemních detekčních sítí blesků, jsou analyzována data ze tří pozemních detekčních sítí nad územím Česka v období 2015 - 2021. Konkrétně se jedná o celosvětovou síť World Wide Lightning Location Network (WWLLN), amatérskou síť Blitzortung a evropskou síť EUropean Cooperation for LIghtning Detection (EUCLID). V práci jsou zkoumány a porovnávány časoprostorové charakteristiky bleskových výbojů ze tří uvedených detekčních sítí, dále vztah mezi bleskovými výboji a krajinným pokryvem z dat CORINE Land Cover a bleskovými výboji a typy povětrnostních situací z dat Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ). Z výsledků vyplývá, že v časových a prostorových charakteristikách bleskových výbojů se sledované detekční sítě příliš neliší. Vztah mezi bleskovou aktivitou a krajinným pokryvem se ukázal u sledovaných sítí stejný. U vztahu bleskové aktivity s povětrnostní situací se sledované detekční sítě shodnou pouze na největším zastoupení typů B (brázda nízkého tlaku nad střední Evropou) a Bp (brázda postupující přes střední Evropu).

Klíčová slova

blesk, výboj, EUCLID, BLIDS, WWLLN, Blitzortung, Česko

Abstract:

This thesis focuses on ground-based lightning detection which is important since lightning discharges still cause casualties yearly worldwide. The thesis provides description of several ground-based lightning detection networks and an analysis of lightning data of three lightning detection networks covering the Czech Republic during 2015 - 2021. Specifically, the data of the World Wide Lightning Location Network (WWLLN), the amateur network Blitzortung and the European network EUropean Cooperation for LIghtning Detection (EUCLID) are investigated. The thesis examines the spatial and temporal characteristics of lightning discharges from the three detection networks, the relationship between lightning discharges and land cover from CORINE Land Cover data, and the relationship of lightning discharges with types of weather situations based on the Czech Hydrometeorological Institute (CHMI) data. The results show that there is not much difference in the temporal and spatial characteristics of lightning discharges among the three detection networks. The relationship between lightning activity and land cover is the same for the three networks. Unlike the relationship between lightning activity and land cover, the relationship between lightning activity and weather types is in good agreement among the three lightning detection networks for only the most dominant types, which is B (low pressure trough) and Bp (migratory low pressure trough).

Keywords

Lightning, discharge, EUCLID, BLIDS, WWLLN, Blitzortung, Czechia

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala především RNDr. Janě Popové, Ph.D. za její trpělivost, podporu a za cenné rady a nápady při odborném vedení této práce. Další poděkování patří Ing. Jakubu Šleglovi za získání dat ze sítě Blitzortung. Poslední poděkování patří mé rodině, za to, že mi jsou neustálou oporou.

Obsah

Seznam použitých zkratk	10
Úvod do problematiky bleskové detekce.....	12
Pozemní detekce bleskové aktivity.....	14
2.1. Metody lokalizace bleskového výboje	15
2.1.1. Direction Finding (DF).....	15
2.1.2. Time od Arrival (TAO)	17
2.1.3. Interferometrie.....	18
Příklady pozemních detekčních sítí.....	19
3.1. LINET (Lightning Location Network).....	19
3.2. ENTLN (Earth Networks Total Lightning Network).....	20
3.3. LMA (Lightning Mapping Array).....	20
3.4. LOFAR (LOW-Frequency ARray)	21
3.5. WWLLN (World Wide Lightning Location Network)	22
3.6. Blitzortung.....	24
3.7. EUCLID - BLIDS	27
4. Zájmové území, data a metody.....	29
4.1. Zájmové území	29
4.2. Data bleskové aktivity	31
4.2.1. WWLLN.....	32
4.2.2. Blitzortung.....	32
4.2.3. EUCLID (BLIDS).....	32

4.3. Krajinový pokryv	34
4.4. Typizace povětrnostních situací	34
4.5 Použité metody	35
4.5.1. Časoprostorové charakteristiky	35
4.5.2. Vztah mezi bleskovou aktivitou a krajinovým pokryvem	37
4.5.3. Vztah mezi bleskovou aktivitou a povětrnostní situací.....	38
5. Výsledky.....	39
5.1. Časové charakteristiky bleskové aktivity	39
5.2. Prostorové charakteristiky bleskové aktivity	42
5.3 Časoprostorové charakteristiky bleskové aktivity.....	46
5.4. Blesková aktivita a krajinový pokryv.....	52
5.5. Blesková aktivita a povětrností situace	53
Diskuze	55
Shrnutí a závěr	58
Seznam použitých zdrojů.....	60
Seznam obrázků.....	64
Seznam grafů	65
Seznam tabulek.....	66
Seznam příloh	66

Seznam použitých zkratk

BLIDS = der Blitz Informationsdienst von Siemens

Cb = oblak Cumulonimbus

CC = blesk cloud-to-cloud (uvnitř oblaku)

CG = blesk cloud-to-ground (do země)

ČMeS = Česká meteorologická společnost

DF = Direction Finding

ENTLN = Earth Networks Total Lightning Network

EUCLID = EUropean Cooperation for LIghtning Detection

GOES = Geostationary Operational Environmental Satellites

IC = blesk intracloud (uvnitř oblaku)

LF = low frequency

LINET = Lightning Location Network

LIS = Lightning Imager Sensor

LMA = Lightning Mapping Array

LOFAR = LOw-Frequency ARray

MTG = Meteosat Third Generation

TOA = Time of Arrival (čas příchodu)

VLF = very low frequency

VHF = very high frequency

WWLLN = World Wide Lightning Location Network

Úvod do problematiky bleskové detekce

Blesky jsou jedny z nejkrásnějších a zároveň nejnebezpečnějších jevů v atmosféře. Způsobují nejen škody na majetku, ale ohrožují i zdraví a lidské životy. I to je jedním z důvodů, proč je kompletní porozumění tohoto jevu tak důležité. Ačkoli se tématem bleskové aktivity zabývají vědci po celém světě, některé otázky zůstávají stále nezodpovězeny. Velkým pomocníkem a zároveň důležitým nástrojem k pochopení jevů v atmosféře vedoucích ke vzniku blesků jsou detekční sítě bleskové aktivity. Tyto detekční sítě pomáhají, spolu se zpřesňováním detekce díky zlepšování technického vybavení, nacházet jasnější odpovědi na otázky řešené v této vědní disciplíně.

Problematicke elektrických výbojů v atmosféře, tj. bleskům, se věnuje řada autorů. Příkladem mohou být práce Keighton, a kol. 1991; Bednář a kol. 1993; Rakov, Uman 2003, či novější práce Tran a Rakov 2016; Kopáček, Bednář a Žák 2020; či Rakov a kol. 2022. Pro tuto práci je důležité, že každý bleskový výboj emituje elektromagnetické záření, které může být zaznamenáno senzory pozemních detekčních sítí (Rakov, Uman 2003).

Bleskové výboje jsou ve většině případů vázány na oblaky druhu Cumulonimbus (Cb). Konkrétně bleskový výboj vzniká mezi centry elektrického napětí opačných polarit a to jak mezi dvěma oblaky, tak mezi oblakem a zemským povrchem. V prvním případě se blesky označují CC (cloud-to-cloud) a druhý typ je označován CG (cloud-to-ground). CG blesky představují asi jen 10 % celkové bleskové aktivity. Výskyt jak CG tak CC blesků je značně časově i prostorově variabilní a oba typy jsou zdrojem záření v různých částech elektromagnetického spektra. Této skutečnosti využívají detektory, jejichž úkolem je bleskovou aktivitu zachytit (Bednář, Popek 2012).

Detektory mohou být jak pozemní, tak umístěné na družicích. Tato práce se věnuje pozemní detekci, která je dosud nejrozšířenější. Pozemních detekčních sítí existuje celá řada. Důvodem je, že detektory mohou fungovat na různých frekvencích a zaměřovat se tak na různou část elektromagnetického spektra, jež blesky emitují (Rakov a kol. 2022). Cílem této práce je porovnat různé charakteristiky blesků za použití dat z několika

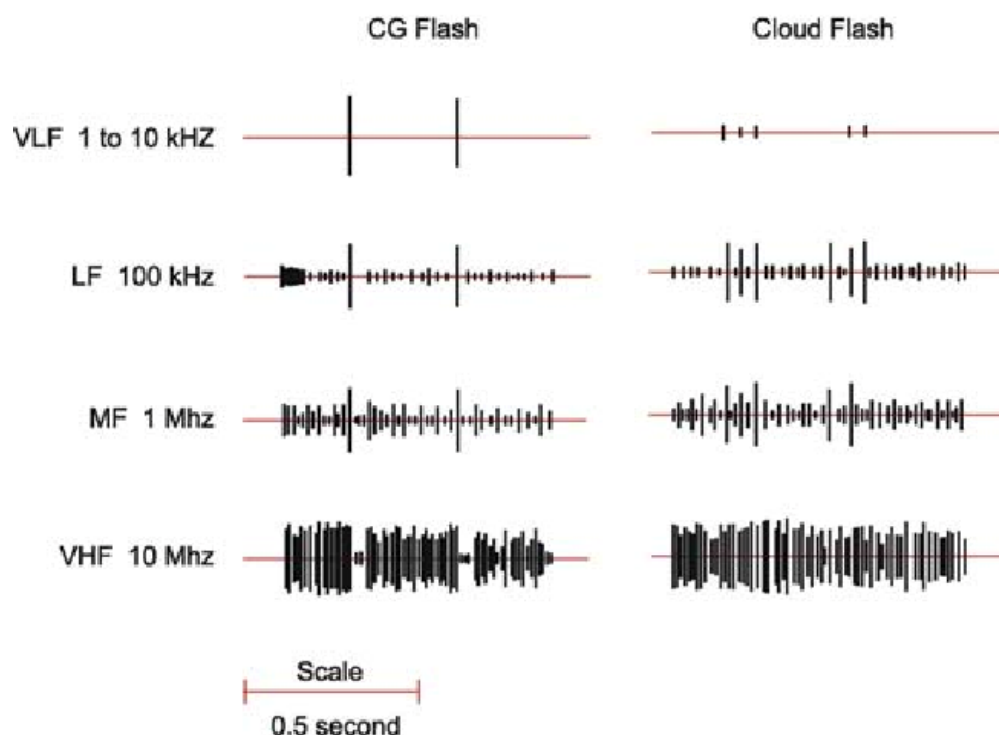
pozemních detekčních sítí a zjistit, zda tyto zjištěné charakteristiky vycházejí podobně v případě každé sítě či se odlišují, případně v čem.

Po této úvodní kapitole kapitola 2 popisuje pozemní detekci bleskové aktivity a metody lokalizace blesku. V kapitole 3 jsou představeny některé z pozemních detekčních sítí, přičemž větší pozornost je věnována sítím WWLLN (World Wide Lightning Location Network), Blitzortung a EUCLID (EUropean Cooperation for LIghtning Detection), jejichž data jsou zpracovávána v praktické části této práce. Následuje kapitola 4, ve které je popsáno zájmové území, které zahrnuje širší oblast Česka, použitá data z pozemních detekčních sítí WWLLN, Blitzortung a EUCLID, data krajinného pokryvu a synoptické typy. Dále jsou zde uvedeny metody zjišťování časoprostorových charakteristik blesků. Kapitola 5 představuje výsledky této práce, jež jsou v kapitole 6 diskutovány. Kapitola 7 pak tuto práci uzavírá.

Pozemní detekce bleskové aktivity

Pozemní detekční systémy se zaměřují na elektromagnetické vlnění, které se šíří atmosférou od bleskového výboje a senzory pozemní detekce snímají právě toto elektromagnetické záření procházející atmosférou. Podle hlavních frekvenčních pásem, ve kterých tyto detektory snímají, je lze rozdělit do tří skupin. První z nich snímá v pásmu od 30 do 300 MHz a označuje se VHF (very high frequency). Druhou skupinou jsou senzory LF (low frequency), které snímají v pásmu od 30 do 300 kHz, a třetí skupinou jsou senzory VLF (very low frequency), které se zaměřují na pásmo od 3 do 30 kHz (Rakov, Uman 2003).

Podle autorů Schulz a Lojou (2006) CC a CG blesky vyzařují elektromagnetické vlnění v různém rozsahu. Proto se k jejich detekci využívá senzorů fungujících v různých elektromagnetických pásmech. Na *obrázku 1* je zobrazen rozdíl ve vyzařování radiofrekvenčního záření pro CC a CG blesky.



Obrázek 1: Rozdíl radiofrekvenčního záření při CG blesku (vlevo) a CC blesku (vpravo).
Převzato z Schulz, Lojou (2006).

ČMeS (online) uvádí, že detekce v pásmu VLF/LF je vhodná zejména pro detekci CG blesků na velké ploše, tedy pro měřítka států, kontinentů nebo dokonce v globálním měřítku. Naproti tomu detekce v pásmu VHF se používá k detailnímu studiu prostorového rozložení všech typů bleskových výbojů na malých územích (řádově do stovek km²). Dle Betz a kol. (2009) detekce v pásmu VHF není vhodná pro velká území a k rozlišování mezi CC a CG blesky.

K samotné detekci bleskového výboje, tedy ke zjištění, zda se ve sledovaném území blesk vyskytl či nikoliv, je možné použít pouze jeden detektor. Jeden senzor ovšem nedokáže bleskový výboj přesněji lokalizovat (Rakov, Uman 2003). Pro co nejpřesnější určení polohy bleskového kanálu nebo místa úderu blesku do země je zapotřebí více senzorů, které dohromady tvoří detekční síť.

2.1. Metody lokalizace bleskového výboje

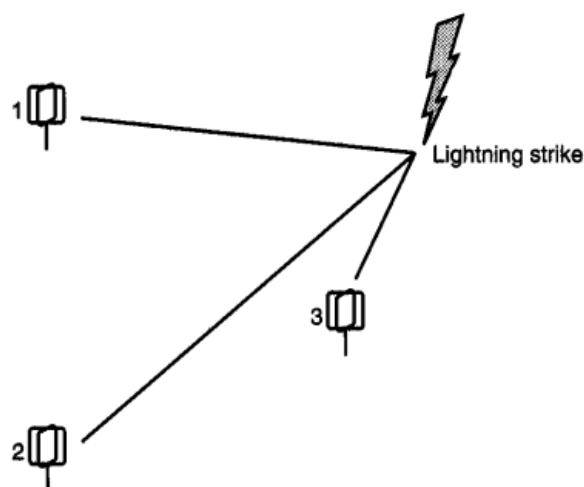
K přesné lokalizaci blesku z pozemních detekčních sítí se v dnešní době využívá dvou hlavních metod. První z nich je metoda Direction Finding (DF), někdy označovaná také jako Magnetic Direction Finding (MDF), druhá metoda nese název Time of Arrival (TOA).

2.1.1. Direction Finding (DF)

U metody Direction Finding (DF), jak již název napovídá, jde o určení přesného směru, odkud elektromagnetické záření k detektoru přichází. Tato metoda využívá Faradayova indukčního zákona. Každá anténa detekční sítě, je tvořena ze dvou vertikálních a navzájem kolmých (ortogonálních) vodivých smyček, z nichž jedna leží v rovině orientované ze severu na jich (NS) a druhá v rovině orientované z východu na západ (EW). Tyto smyčky, právě díky Faradayově indukčnímu zákonu, mohou měřit magnetické pole i směr z vertikálně orientovaného zdroje (v našem případě bleskového kanálu), pro který lze

předpokládat horizontálně orientované magnetické pole. O blesku je v tomto případě zjednodušeně uvažováno jako o vertikálním vodiči, jehož magnetické pole tvoří horizontální soustředné kružnice. Protože jsou smyčky vůči sobě kolmé, napětí na jedné smyčce je úměrné cosinu a druhé sinu úhlu mezi vektorem magnetického pole a normálou dané smyčky. Z těchto údajů lze dopočítat úhel mezi severem a zdrojem magnetického pole, tedy bleskem (Rakov 2013).

Teoreticky jsou k lokalizaci blesku u této metody nutné alespoň dvě antény, v praxi se ale používá senzorů více v rámci detekčních sítí (Rakov, Uman 2003). Na *obrázku 2* je schematicky znázorněno určení polohy blesku metodou DF.



Obrázek 2: Schematické znázornění určení polohy blesku metodou DF. Převzato z: MacGorman, Rust (1998)

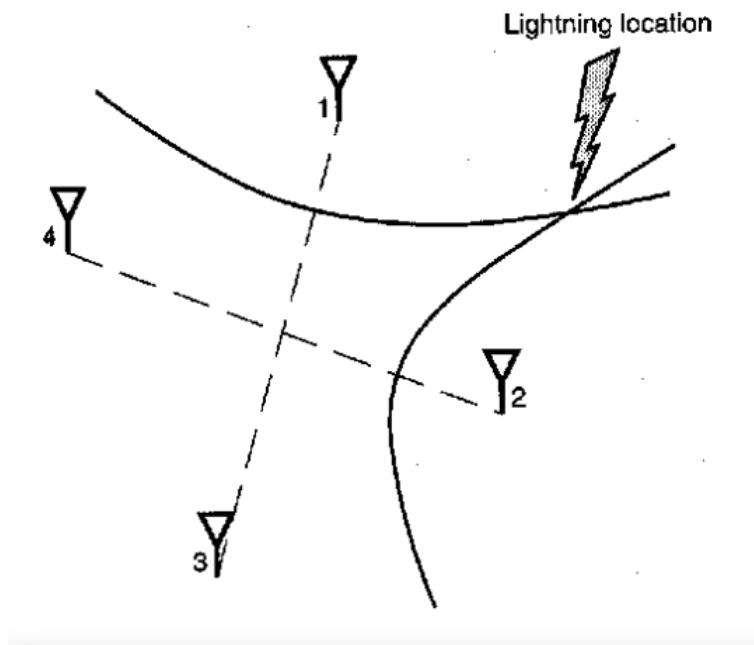
2.1.2. Time od Arrival (TAO)

Principem této metody detekce blesků je měření rozdílů časů, kdy je bleskový výboj zaznamenán na jednotlivých senzorech detekční sítě. Výsledná poloha blesku se následně určuje jako průsečík hyperbol pro stejné časové difference několika senzorů (Řezáčová a kol. 2007). Systémy, které pracují s metodou TAO lze rozdělit na tři typy podle vzdálenosti senzorů od sebe:

- velmi krátká vzdálenost – senzory jsou od sebe vzdáleny desítky až stovky m
- krátká vzdálenost – senzory jsou od sebe vzdáleny desítky km
- dlouhá vzdálenost – senzory jsou od sebe vzdáleny stovky až tisíce km

Systémy s krátkou vzdáleností mezi senzory jsou obvykle určeny k poskytování informací o bleskovém kanálu a časovém vývoji jednotlivých výbojů blesku. Systémy s dlouhou vzdáleností mezi senzory se používají většinou k určení místa úderu blesku do země nebo “průměrného“ místa lokalizace blesku (Rakov 2013).

Na *obrázku 3* je schematicky znázorněno určení polohy blesku metodou TAO.



Obrázek 3: Schematické znázornění určení polohy blesku metodou TAO.

Převzato z: MacGorman, Rust (1998)

2.1.3. Interferometrie

Interferometrie je metoda, která využívá faktu, že blesk je také zdrojem tzv. shluků elektromagnetických pulsů trvajících desítky až stovky mikrosekund. Lokalizace těchto shluků je obtížná pomocí technik TAO a neumožňuje identifikovat jednotlivé impulzy shluků. Výhodou interferometrie je však to, že identifikace jednotlivých impulzů není nutná - stačí porovnat fázový rozdíl změřeného signálu v úzkém frekvenčním rozsahu mezi dvěma nebo více senzory umístěnými blízko sebe. Vzdálenost mezi senzory obvykle odpovídá vhodným násobkům vlnové délky měřeného záření (Rakov, Uman 2003; Rakov 2013). Při lokalizaci bleskového výboje funguje fázový rozdíl zjištěný interferometrií obdobně jako časový rozdíl při použití TAO. Rakov a Uman (2003) uvádějí, že první interferometr pochází z roku 1979.

Příklady pozemních detekčních sítí

Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, k detekci blesků se v praxi téměř nepoužívají samostatné detektory, ale detekční sítě. Na Zemi existuje více než 60 sítí určených k lokalizaci blesku, které většinou fungují v pásmu VLF/LF. Informace o detekčních sítích a detekci se věnovali např. práce Rakov, Uman (2003); Cummins, Murphy (2009) a Betz a kol. (2009). V této kapitole budou představeny některé z pozemních detekčních sítí bleskové aktivity.

Větší pozornost je věnována detekčním sítím, jejichž data jsou použita v praktické části této práce. Konkrétně se jedná o celosvětovou detekční síť World Wide Lightning Location Network (WWLLN), amatérskou síť Blitzortung a evropskou síť EUCLID (EUropean Cooperation for LIghtning Detection).

3.1. LINET (Lightning Location Network)

První představenou sítí je detekční síť vyvinuta na univerzitě v Mnichově - LINET (Lightning Location Network). Vývoj této detekční sítě začal v roce 1994. Největší výhodou této sítě měla být vysoká účinnost detekce zejména pro výboje, produkující slabou změnu elektromagnetického pole. Navržený systém však předčil očekávání, když svou schopností detekce blesků (zejména CC blesků) výrazně předčil ostatní, do té doby používané detekční systémy. V dnešní době využívá data z detekčního systému LINET i Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ) (Betz a kol. 2009).

Detektory této sítě pracují v pásmu VLF/LF, konkrétně 1 - 200 kHz (Rakov 2013), a to i při lokalizaci CC blesků. Betz a kol. (2009) uvádějí, že kvůli značnému překrývání elektromagnetických signálů nelze v tomto případě zcela odlišit blesk CG od CC. Systém LINET k tomuto využívá faktu, že CG blesky vyzařují VLF/LF záření převážně z částí kanálu blesku blízko země, zatímco emise CC nutně pocházejí ze segmentů kanálu blesku uvnitř oblaků, většinou vysoko nad zemí. Tyto odpovídající rozdíly jsou zaznamenány díky

kombinaci metod DF a TAO. Díky tomu je také dosaženo poměrně velké přesnosti prostorové lokalizace blesku. Pro CG blesky se přesnost lokalizace pohybuje okolo 150 m (Betz a kol. 2009). Kromě přesné lokalizace blesku formou zeměpisných souřadnic, lze v datech z detekční sítě LINET nalézt také informaci o nadmořské výšce, v jaké byl blesk naměřen, což není mezi evropskými detekčními systémy běžné (Betz a kol. 2004).

3.2. ENTLN (Earth Networks Total Lightning Network)

Tato síť se skládá z více než 1500 širokopásmových senzorů (snímajících v rozmezí 1 Hz až 12 MHz) (Rakov 2013), rozmístěných ve více než 40 zemích světa téměř na všech kontinentech, přičemž více než 900 senzorů je umístěno na území Spojených států Amerických (USA). K lokalizaci blesku používá síť ENTLN metodu TAO (Zhu a kol. 2017). O každém výboji je zjištěn přesný čas, polarita výboje (kladná nebo záporná) a typ výboje (CG nebo CC) určeného na základě tvaru elektromagnetické vlny. Účinnost detekce se pohybuje kolem 50 % a přesnost klasifikace na CG / CC přes 65 % (Mallick a kol. 2015). Jako CG blesky jsou klasifikovány ty blesky, které obsahují alespoň jeden zpětný výboj, ostatní jsou označeny jako CC blesky (Zhu a kol. 2017).

3.3. LMA (Lightning Mapping Array)

Lightning Mapping Array (LMA) je lokální detekční síť fungující na území USA, skládající se většinou z VHF přijímačů, které snímají většinou v rozsahu 60 - 66 MHz (Rakov 2013). Nízkofrekvenční LF LMA také existují, ale VHF systémy jsou běžnější (Lyu a kol. 2014). Obvykle se LMA zaměřují na radiové rozmezí 60 - 66 MHz. LMA je schopen určit místo a čas výboje blesku, pomocí metody TOA. Většinou LMA zahrnuje centrální stanici, která je obklopena 7 až 20 LMA anténami. Centrální stanice vypočítává čas a polohu blesku včetně nadmořské výšky, ve které byl blesk detekován (Thomas a kol. 2004).

Systém dokáže rozlišit, zda se jedná o CG nebo CC blesk. Antény jsou od sebe vzdáleny většinou 15 až 20 km a celý systém je obvykle umístěn na odlehlém místě, aby bylo rušení signálu minimalizováno a detekční síť byla co nejúčinnější. Každá takto vytvořená jednotka LMA je schopna účinně detekovat bleskové výboje do vzdálenosti 200 km od centrální stanice, přičemž přesnost detekce s rostoucí vzdáleností od této stanice klesá. Prostorová přesnost detekce se uvádí v nižších desítkách metrů a účinnost detekce je nad 95 % v okruhu 100 km od středu sítě (Chmielewski a Bruning 2016).

3.4 LOFAR (LOW-Frequency ARray)

LOFAR je rádiový interferometr nové generace zkonstruovaný na severu Nizozemska, ale stanice nalezneme také v Německu, Francii, Velké Británii, Polsku, Irsku a Švédsku. LOFAR je v současné době největší radioteleskop na světě, skládající se z velkého počtu malých antén rozmístěných na velké ploše, a je používán převážně k pozorování kosmického záření z astronomických zdrojů. Nicméně dokáže sloužit také jako detekční síť pro lokalizaci blesků (Hare a kol. 2018, Scholten a kol. 2022). V současné době se pro pozorování blesků používají pouze LF antény, pracující v rozsahu 30–80 MHz, (Scholten a kol. 2021).

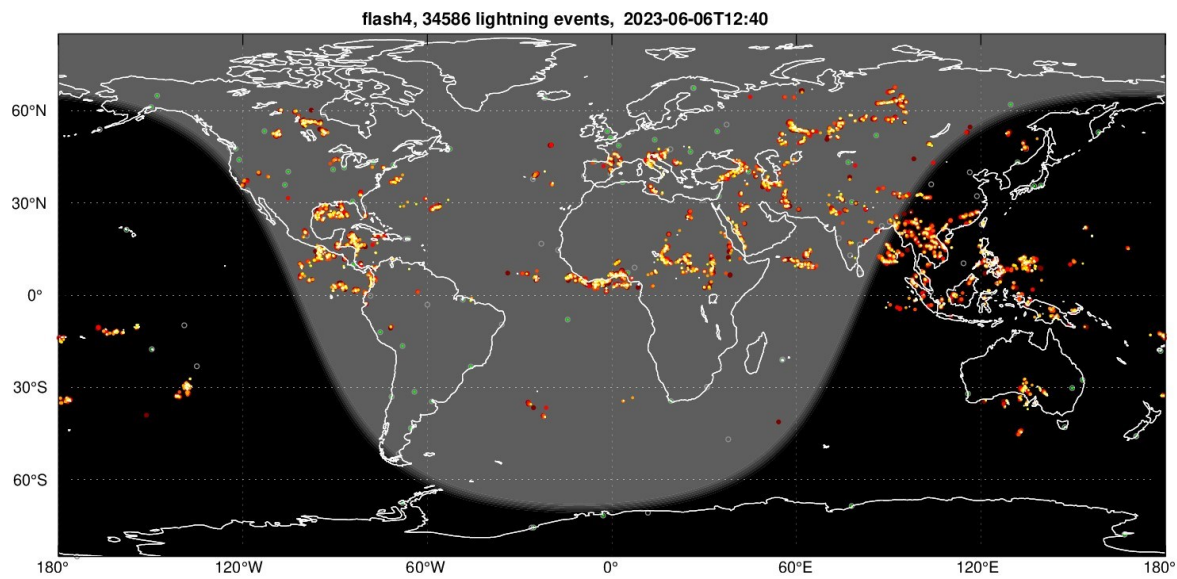
Hare a kol. (2019) uvádějí, že byl vyvinut algoritmus, pomocí kterého lze trojrozměrně zobrazit blesky pomocí rádiových dat shromážděných radioteleskopem LOFAR v rozsahu 30–80 MHz. Ukazuje se, že LOFAR má pro prostorovou lokalizaci blesků takřka bezkonkurenční přesnost. Hare a kol. (2018) tvrdí, že přesnost dosahuje řádu metrů dokonce i pro blesky zaznamenané ve vzdálenosti více než 20 km od oblasti ohraničené anténami LOFAR. Dále se ukazuje, že jde o první systém, který je při mapování blesků citlivý na prostorovou strukturu elektrického proudu během jednotlivých dílčích kroků výbojů blesku.

3.5. WWLLN (World Wide Lightning Location Network)

World Wide Lightning Location Network (WWLLN) je celosvětová pozemní síť, která funguje od roku 2003 a je provozována Washingtonskou univerzitou v Seattlu. Jedná se o nízkonákladovou pozemní síť senzorů snímající ve VLF v rozsahu 6 - 18 kHz (Rakov 2013). V současné době má na celém světě přes 80 senzorů. Výhodou této sítě je, že od sebe mohou být detektory vzdáleny i tisíce kilometrů. Pokud je na alespoň pěti senzorech zaznamenán bleskový výboj, vypočítá se pomocí metody TAO jeho zeměpisná poloha. Přesnější lokalizace je umožněna u bleskových výbojů obklopených detektory ze všech světových stran, než u těch, které takto obklopeny nejsou, přičemž ideální by bylo rovnoměrné rozmístění senzorů kolem Země (WWLLN online). Jeden z detektorů se nachází i na území Česka, konkrétně na Milešovce.

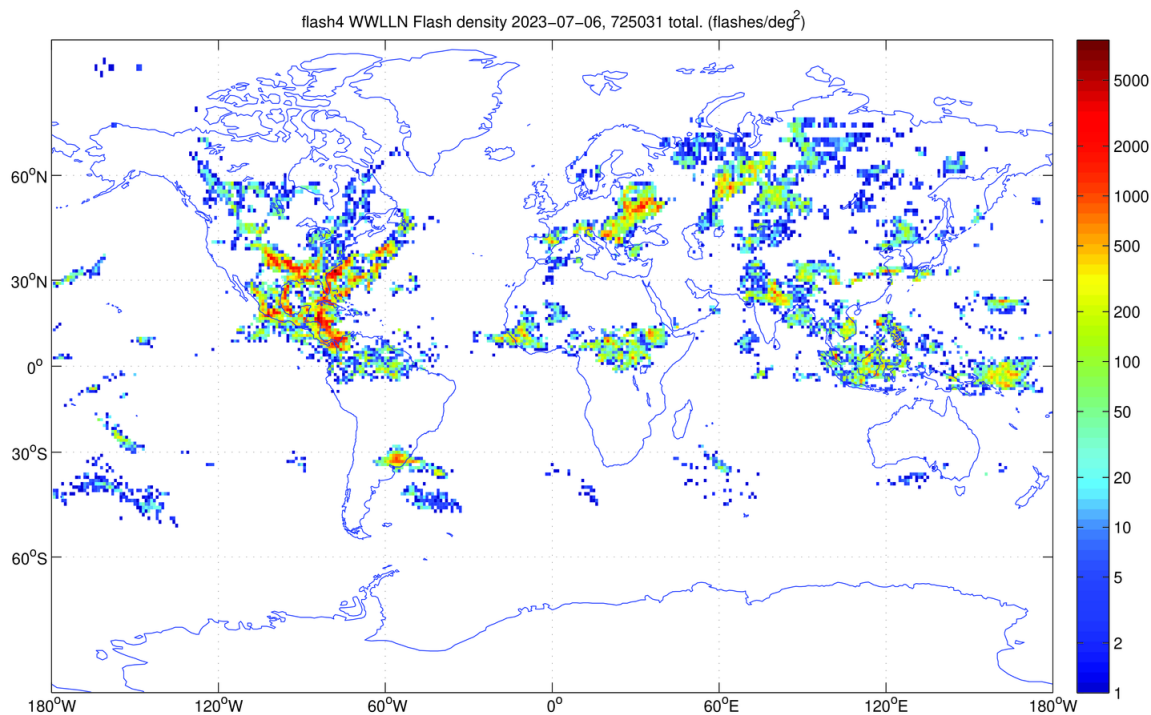
Problematicke lokalizace bleskových výbojů ze sítě WWLLN se věnuje řada autorů (Rodger a kol. 2006; Abarca a kol. 2010; Hutchins a kol. 2012; Rudlosky, Shea 2013; Mezuman a kol. 2014; Holzworth a kol 2021). Všichni se shodují na tom, že účinnost detekce v této síti se stále zlepšuje, vzhledem ke stále rostoucímu počtu detektorů. V dnešní době je možné blesk lokalizovat s přesností pod 5 km a 10 μ s. Každý den lokalizuje WWLLN 600 000 – 800 000 bleskových výbojů. V minulosti dosahovala účinnost detekce 10 % dnešního stavu. Stále ale platí, že čím větší má bleskový výboj špičkový proud, tím přesnější jeho lokalizace je (Ccopa a kol. 2021; Holzworth a kol 2021).

Na *obrázku 4* je vidět rozložení bleskové aktivity na Zemi dne 6.6.2023 (posledních 60 minut do 12:40 UTC - universal time coordinated), tak jak je dostupný na webových stránkách WWLLN (<https://wwlln.net/>).



Obrázek 4: Blesková aktivita na Zemi od 11:40 do 12:40 UTC dne 6.6.2023. Převzato z <http://wwlln.net>. Poloha bleskových výbojů je zobrazena barevnými tečkami podle toho, kolik minut uplynulo od jejich lokalizace. Bílé jsou zobrazeny výboje, které byly naměřeny během posledních 10 minut, žlutě během posledních 20 minut, oranžově během 30, oranžovo-červeně během 40, červeně během 50 a hnědě během posledních 60 minut. Zelené značky označují aktivní senzory WWLLN. Černý podklad značí oblast, kde je noc, kdežto šedý, označuje oblast, kde je den.

WWLLN má na svých webových stránkách mimo mapy zobrazující bleskovou aktivitu za poslední hodinu (*obrázek 4*) také mapu, na které je znázorněna kumulovaná blesková aktivita na Zemi vždy za poslední den (*obrázek 5*). Dále je tamtéž k dispozici animace bleskové aktivity po hodinách pro jednotlivé části světa, včetně satelitního podkladu National Weather Service/Aviation Weather Center pro snazší interpretaci.



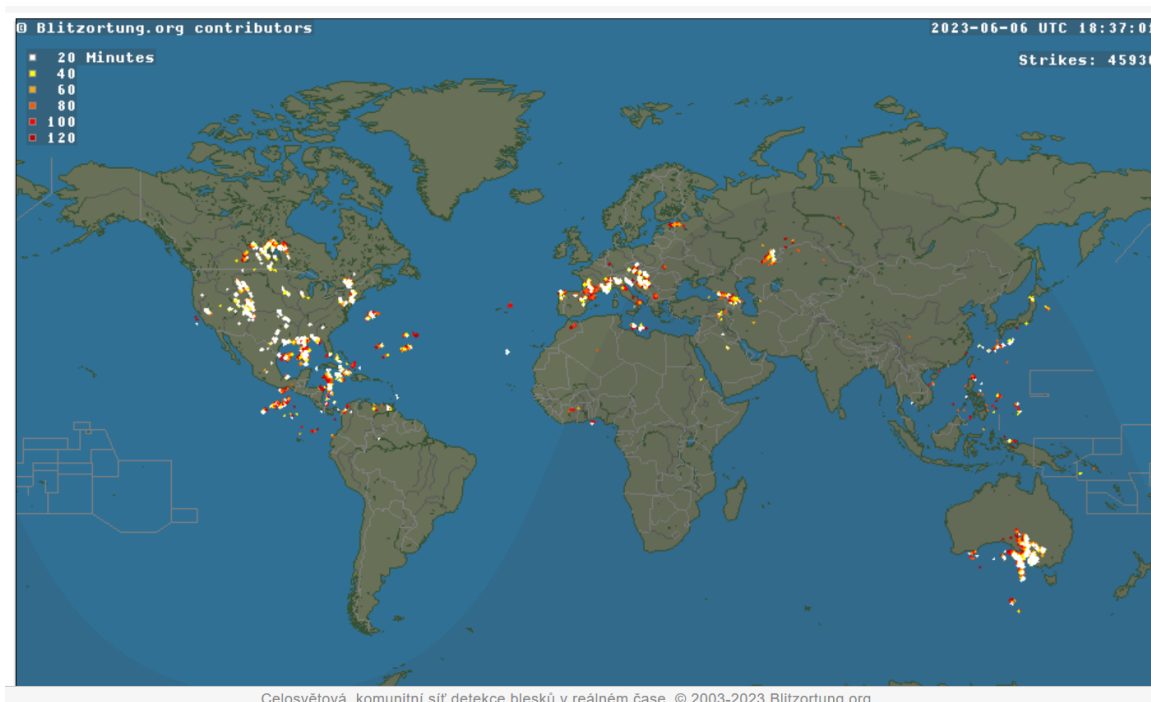
Obrázek 5: Kumulovaná blesková aktivita na Zemi za den 6.7.2023. Převzato z <http://wwlln.net/>. Barevná škála zobrazuje počet výbojů na zeměpisný stupeň na druhou.

3.6. Blitzortung

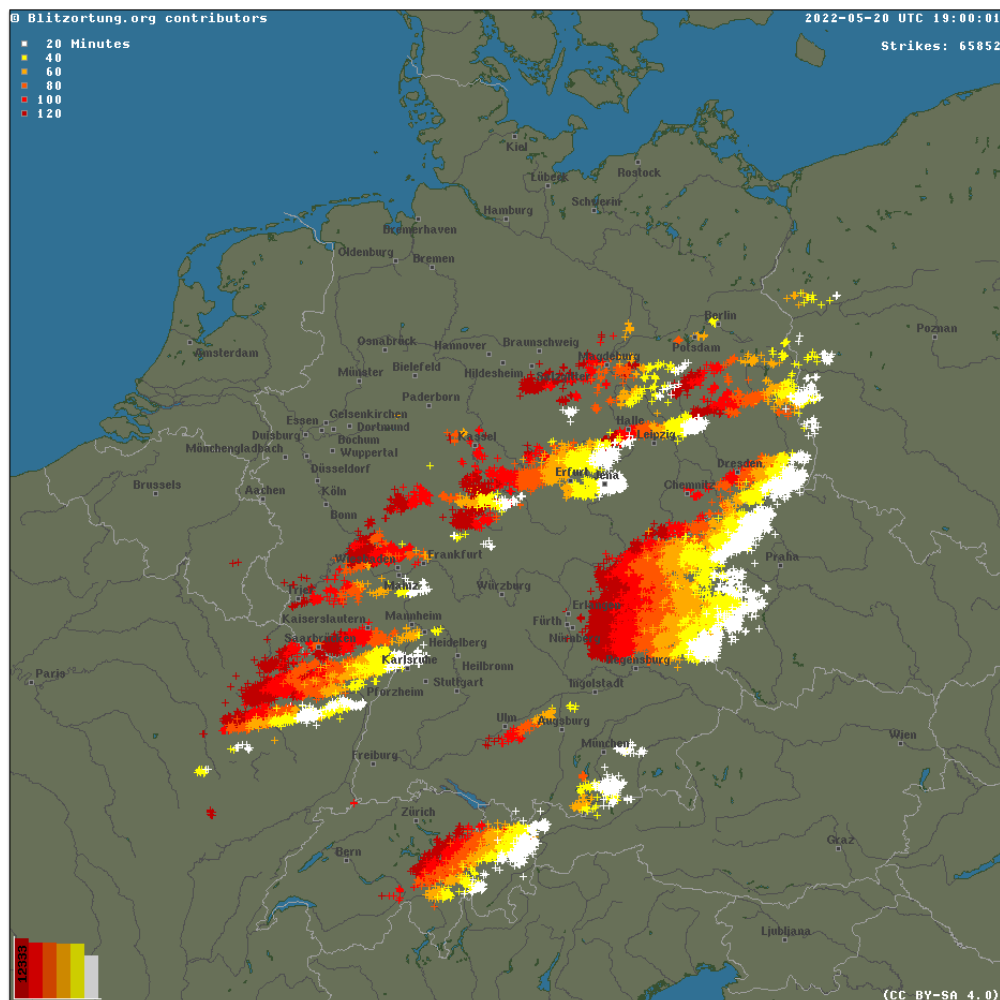
Detekční síť lokalizace blesků Blitzortung je amatérskou sítí spravovanou zájmovým sdružením soukromých osob (Blitzortung.org) fungující od roku 2005. Jedná se o celosvětovou síť přijímačů VLF skládající se z téměř 3000 aktivních stanic rozmístěných po celém světě (Blitzortung online). Každá ze stanic nepřetržitě zaznamenává nízkofrekvenční signál. Pokud detekuje bleskový výboj, zašle informace o poloze a přesném času záznamu na centrálu k vyhodnocení. Pokud na server dorazí během krátkého časového okna data alespoň ze tří stanic, server určí pomocí metody TOA přesnou polohu blesku (Wanke a kol. 2016). Přesnost lokalizace je velmi dobrá a v některých případech menší než 1 km, čímž se v podstatě vyrovná i komerčním profesionálním detekčním sítím (Blitzortung online). Součástí organizace Blitzortung.org se může stát kdokoli, kdo si koupí a sestaví přijímač, a následně se s ním zapojí do sítě, čímž získá také přístup ke všem dostupným datům této sítě. Nezpracovaná původní data z této sítě jsou

zdarma k dispozici všem majitelům jednotlivých přijímačů k nekomerčním účelům (Blitzortung.org online). Pro ostatní zájemce se na webových stránkách Blitzortung.org (<https://www.blitzortung.org>) zobrazují bleskové výboje vždy za poslední dvě hodiny, a to jak pro celou Zemi (obrázek 6), tak pro jednotlivé části světa.

Obrázek 6: Blesková aktivita na Zemi 6.6.2023 mezi 16:37 a 18:37 UTC. Převzato z: <https://www.blitzortung.org>. Barevné tečky označují bleskové výboje a jejich barva odpovídá času, který uběhl od jejich lokalizace.



Na stejné webové stránce je k dispozici také datový archiv, kde je možné zobrazit, popřípadě stáhnout, mapy bleskové aktivity pro jednotlivé dny, resp. dvouhodinová časová okna od roku 2008. Na *obrázku 7* je, jako ukázka dat z archivu, znázorněna blesková aktivita ve střední Evropě ve večerních hodinách 20.5.2022.



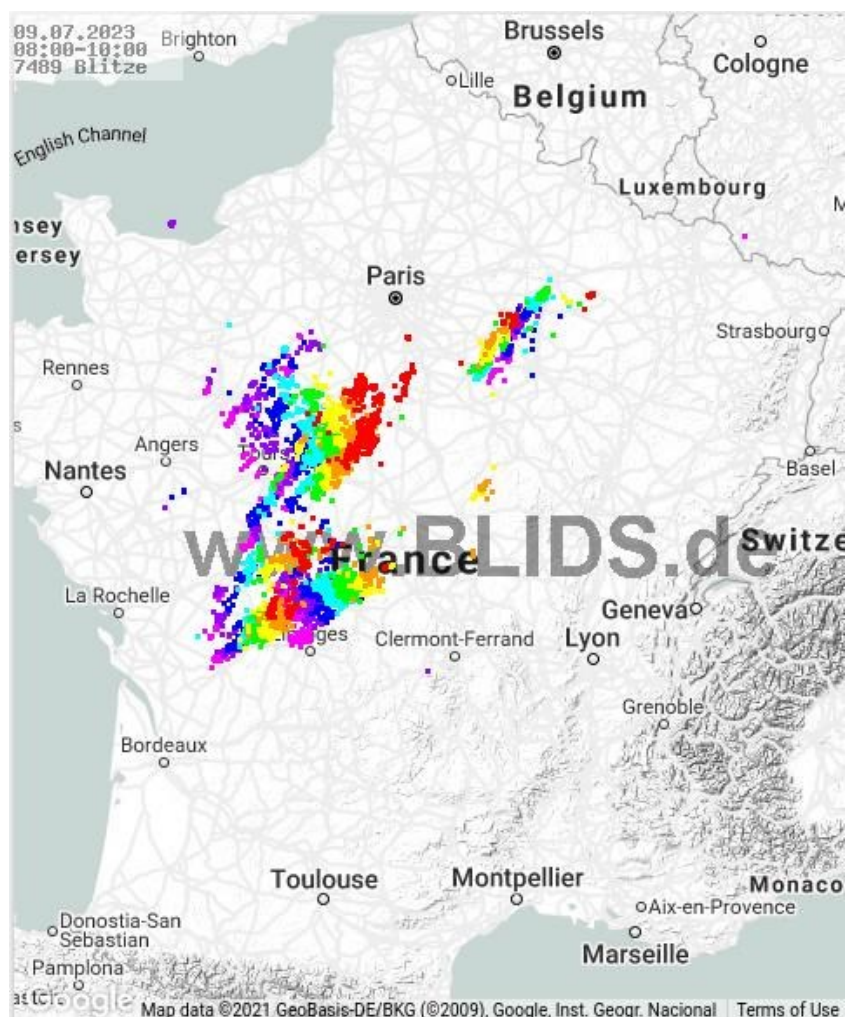
Obrázek 7: Blesková aktivita nad střední Evropou 20.5.2022 mezi 17:00 a 19:00 UTC. Převzato z: <https://www.blitzortung.org>. Barevné křížky označují jednotlivé bleskové výboje a jejich barva odpovídá době, která uplynula od jejich lokalizace.

Ačkoli je Blitzortung amatérskou detekční sítí, data z ní jsou hojně používána pro výzkum. Například práce Fedoniuk a kol. 2021; Sin'kevich a kol. 2020 a Spiridonov a kol. 2021 vyhodnocovaly bleskovou aktivitu nad různými územími na základě archivních map dostupných na Blitzortung.org.

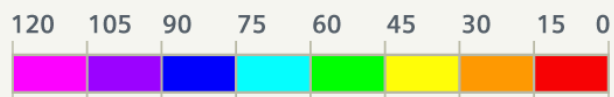
3.7. EUCLID - BLIDS

Poslední sítí, které se tato práce věnuje je EUropean Cooperation for LIghtning Detection (EUCLID), která detekuje blesky nad územím Evropy. Část sítě, která lokalizuje blesky v Německu, Švýcarsku, Velké Británii, Polsku, Beneluxu, České republice, Slovensku a Maďarsku je provozovaná německou společností Siemens, a označuje se BLIDS (der Blitz Informationsdienst von Siemens; BLIDS online). BLIDS poskytuje data meteorologickým službám, energetickým a pojišťovacím společnostem. V současné době se skládá z více než 155 detektorů snímajících ve VHF pásmu, konkrétně v rozsahu 0,4-500 kHz podle toho, jaký je použit senzor. Díky poměrně husté síti detektorů a principu detekce založené na kombinaci obou hlavních metod lokalizace bleskového výboje (TAO a DF) je síť schopna lokalizovat blesky s přesností pod 100 m (BLIDS online). Účinnost detekce je 96 % pro bleskové výboje se špičkovým proudem alespoň 2 kA. (Schulz a kol. 2016).

Ačkoli data ze sítě BLIDS, potažmo EUCLID, nejsou veřejně dostupná, BLIDS na svých webových stránkách zveřejňuje mapy bleskové aktivity za poslední dvě hodiny pro jednotlivé části Evropy, které síť EUCLID pokrývá. Na *obrázku 8* je ukázána blesková aktivita ze dne 9.7.2023 nad Francií.



Alter der Blitze in Minuten



Obrázek 8: Blesková aktivita nad Francií 9.7.2023 mezi 8:00 – 10:00 UTC. Převzato z: <https://new.siemens.com/de/de/produkte/services/blids>. Barevné tečky znázorňují jednotlivé bleskové výboje, barva pak označuje dobu, která uběhla od jejich lokalizace.

4. Zájmové území, data a metody

V této kapitole bude představeno zájmové území, jakož i data bleskové aktivity ze sítí WWLLN, Blitzortung a EUCLID, resp. BLIDS, která byla analyzována v této práci. Dále bude poskytnuto několik základních informací o datech krajinného pokryvu a synoptických situacích, které byly použity. V poslední řadě jsou v této kapitole ukázány metody, které byly v práci aplikovány ke zjištění časových a prostorových charakteristik blesků.

4.1. Zájmové území

Zájmové území odpovídá oblasti pokryté daty bleskových výbojů, která byla k dispozici. Jedná se tedy o oblast geografického průniku bleskových dat ze tří použitých detekčních sítí (WWLLN, Blitzortung a BLIDS). Pro síť WWLLN byla sice k dispozici globální data, limitujícími ale byly sítě Blitzortung a BLIDS, pro které získaná data pokrývala pouze širší oblast Česka. Výsledná poloha zájmového území je zobrazena na obrázku 9. Jedná se o oblast mezi $48,45^{\circ}$ - $51,19^{\circ}$ severní zeměpisné šířky a mezi $11,87^{\circ}$ - $18,48^{\circ}$ východní zeměpisné délky.



Obrázek 9: Poloha zájmové oblasti ve střední Evropě. Satelitní podklad převzat z: Landsat/Copernicus.

Jak je z *obrázku 9* patrné, zájmové území zahrnuje území Česka a pohraniční oblasti Německa, Polska, Slovenska a Rakouska. Díky satelitnímu podkladu jsou dobře patrné i větší zalesněné oblasti, jakými jsou hlavně pohoří Česka, např. Šumava, Český les, Krušné hory, Brdy, Krkonoše, Orlické hory, Jeseníky, Beskydy a Javorníky.

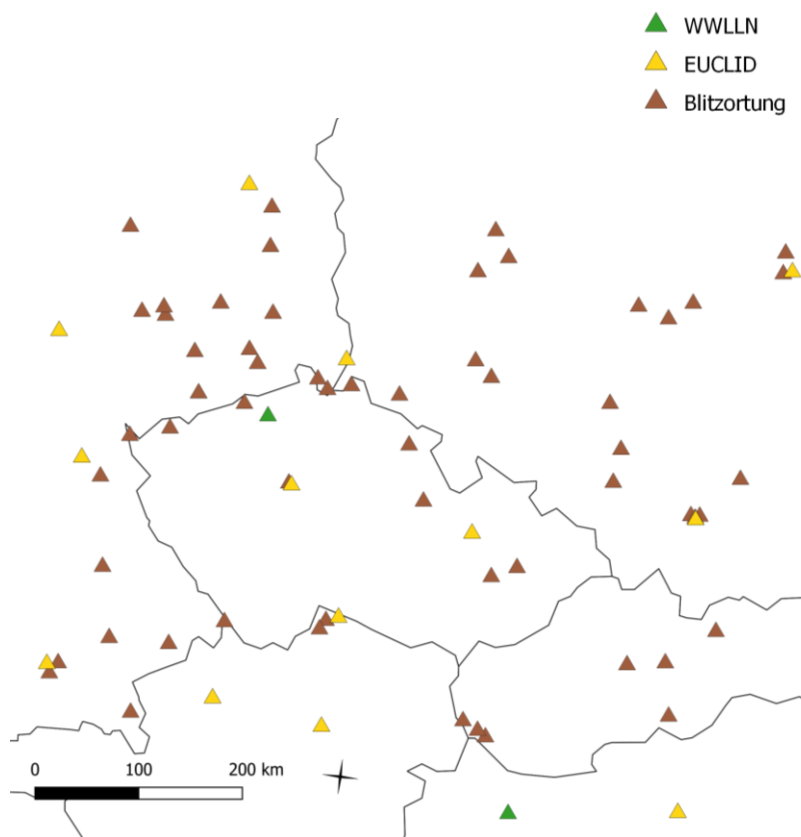
Z klimatologického pohledu spadá zájmové území podle Köppen-Geigerovy klasifikace z větší části do vlhkého oceánského podnebí s teplým létem bez období sucha. Menší části sledované oblasti (zejména horské oblasti Šumavy, Krkonoš a Jeseníků) spadají do kontinentálního podnebí opět s teplým létem a bez období sucha (Světové mapy klasifikace klimatu Köppen-Geiger online; Peel a kol.2007).

Podle Quittovy klasifikace klimatu se ve sledovaném území nachází 13 jednotek ve třech klimatických oblastech. Tyto oblasti se dělí na teplou, mírně teplou a chladnou klimatickou oblast. Teplá oblast se na území Česka vyskytuje na jižní Moravě, Ostravsku, v Polabí a horní části Poohří. Chladnou oblast lze nalézt v oblasti Šumavy, Krušných hor, Slavkovského lesa, Krkonoš, Orlických hor a Jeseníků nebo také v Beskydech. Ostatní území Česka spadají pod mírně teplou oblast (Voženílek 2008).

Zde je nutné ještě podotknout, že v datových sadách pro síť Blitzortung a BLIDS chyběla u některých let data z nejvýchodnější části Česka. Mapové soubory, které níže představují prostorovou charakteristiku rozložení bleskové aktivity a znázorňují dny s výraznou bleskovou aktivitou, jsou proto zpracovávány pro co největší možnou část Česka vždy podle dostupnosti dat v daný rok či den.

4.2. Data bleskové aktivity

Základní popis detekčních sítí WWLLN, Blitzortung a EUCLID (BLIDS) byl podán v předchozím textu (kap. 2). V této části jsou tak podrobněji představeny datové soubory z těchto sítí, jež byly dostupné a použity v praktické části této práce. Každý zápis v datové sadě byl pro účely této práce považován za samostatný bleskový výboj.



Obrázek 10: Poloha stanic detekčních sítí WWLLN, Blitzortung a EUCLID ve střední Evropě.

Na *obrázku 10* je vidět poloha čidel tří studovaných sítí. Jednoznačně zde dominují nízkofrekvenční čidla amatérské sítě Blitzortung, zatímco nízkofrekvenční čidla WWLLN jsou jen dvě. Na druhou stranu vysokofrekvenční čidla EUCLID, jakkoliv je jich méně než čidel Blitzortung se zdají být relativně rovnoměrně rozmístěna.

4.2.1. WWLLN

Data ze sítě WWLLN zahrnují nejdelší časové období ze všech tří zkoumaných detekčních sítí. Konkrétně jde o období let 2015 - 2021. Celkem se jedná o datový soubor, který pro sledované zájmové území nese záznam o 481 927 bleskových výbojích. O každém zaznamenaném bleskovém výboji lze z dat vyčíst datum a čas v UTC, kdy byl výboj naměřen. Stejně tak je zaznamenána přesná poloha, tedy zeměpisné souřadnice. Dále data obsahují údaje o chybě časového určení, o počtu stanic, které výboj lokalizovaly, a o energii výboje.

4.2.2. Blitzortung

Data z detekční sítě Blitzortung byla získána pro roky 2019 - 2021. Konkrétně jde o blesková data z června, července a srpna z let 2019 a 2020 a z května a června roku 2021. Celkem se jedná o 1 076 673 zaznamenaných bleskových výbojů. V datech ze sítě Blitzortung je možné vyčíst datum a přesný čas v UTC zaznamenaného blesku, informace o zeměpisné šířce a délce a dále o maximálním rozsahu časové odchylky a také informaci o tom, do jaké míry je lokalizovaný blesk obklopen senzory (př. 210 stupňů = detektory jsou v sektoru 150 stupňů z pohledu polohy dopadu blesku).

4.2.3. EUCLID (BLIDS)

Jak již bylo nastíněno v kapitole 2.3, síť BLIDS, ze které jsou získána data pro tuto práci, je součástí širší celoevropské sítě EUCLID. Z této sítě byla získána data pro dny s výraznou bleskovou aktivitou v zájmové oblasti z let 2018, 2019, 2020 a 2021. Seznam dní spolu s počtem bleskových výbojů, které byly zaznamenány je představen v tabulce 1. Jedná se celkem o 1 835 463 bleskových výbojů.

Obsahem dat jsou stejně jako u předchozích detekčních sítí informace o datu a přesném čase detekování bleskového výboje (UTC) a geografické souřadnice. Navíc je v datech uložena informace o typu bleskového výboje, zda se jedná o blesk typu CC nebo CG,

o polaritě neseného náboje (kladná či záporná) a o velikosti špičkového proudu. Dále se u dat EUCLID binárně udává informace o kvalitě dat. Ve studovaném datovém souboru byla všechna data považována za kvalitní.

Podíl CG blesků napříč všemi sledovanými událostmi byl 16,23 %, tedy o něco více, než se udává (průměrně se udává 10 %, viz Bednář, Popek 2012).

Tabulka 1: Seznam dní a počtu bleskových výbojů pro data bleskové aktivity ze sítě EUCLID (BLIDS) použitých v této práci. Zdroj dat: BLIDS

datum	počet blesků	datum	počet blesků	datum	počet blesků
01.06.2018	65037	20.05.2019	1275	04.06.2020	5134
10.06.2018	38345	25.05.2019	2287	14.08.2020	86325
11.06.2018	44794	06.06.2019	46989	15.08.2020	10562
27.06.2018	390	10.06.2019	62392	29.08.2020	18143
28.06.2018	174	12.06.2019	45099	15.05.2021	4756
05.07.2018	5407	20.06.2019	31571	17.05.2021	2141
21.07.2018	6096	21.07.2019	24513	10.06.2021	30069
22.07.2018	1716	29.07.2019	28695	22.06.2021	53793
28.07.2018	15598	31.07.2019	18046	23.06.2021	103669
02.08.2018	16869	02.08.2019	2000	24.06.2021	222795
03.08.2018	1694	03.08.2019	25400	29.06.2021	190251
04.08.2018	24498	04.08.2019	624	13.07.2021	184212
08.08.2018	26448	07.08.2019	15224	25.07.2021	115889
13.08.2018	1976	11.08.2019	15873	26.07.2021	58378
17.08.2018	8566	12.08.2019	7947	03.08.2021	35473
23.08.2018	11172	27.08.2019	11869	celkem	1 835 463
24.08.2018	17815	29.08.2019	34352		
21.09.2018	6209	01.09.2019	41659		

4.3. Krajinný pokryv

Ke zjištění vztahu bleskových výbojů s krajinným pokryvem byla využita data CORINE Land Cover z programu Evropské unie Copernicus Land Monitoring Service. Copernicus je evropský program pro monitorování Země, ve kterém jsou data shromažďována družicemi a kombinována s pozorovacími daty ze sítí senzorů na zemském povrchu (Copernicus online). Data krajinného pokryvu se vztahují k roku 2018 a jsou volně dostupná na webových stránkách Copernicus (<https://land.copernicus.eu/>).

Databáze CORINE Land Cover se skládá z inventáře krajinného pokryvu ve 44 třídách. Minimální mapovací jednotka je 25 ha pro plošné jevy a minimální šířku 100 m pro lineární jevy. Jako podklad CORINE Land Cover byla využita satelitní data ze Sentinelu - 2 a doplňující podklad z Landsatu-8. Tomu odpovídá i geometrická přesnost dat, která je udávána pod 10 m (Copernicus online).

4.4. Typizace povětrnostních situací

Systém synoptických typů je vytvořený na základě denních synoptických map pro předpovědní, klimatologické a jiné účely. Součástí typizace povětrnostních situací je kalendář uvádějící synoptické typy, které se vyskytují v jednotlivých dnech. Ve střední Evropě je nejrozšířenější typizace povětrnostních situací Evropy, označovaná též jako typizace P. Hessa a H. Brezowského (ČMeS online).

Pro zjištění vztahu dat bleskové aktivity se synoptickými typy je v této práci, vzhledem k zájmovému území, použita typizace vypracovaná pro území Česka. Jedná se o kalendář synoptických situací, který je vydáván Českým hydrometeorologickým ústavem (ČHMÚ). Z webových stránek ČHMÚ (<https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/typizace-pove-trnost-nich-situaci>) je možné získat data povětrnostních typů s časovým rozlišením jeden den. Tato data ukazují, jaká povětrnostní situace v daný den na území

Česka převládala. V *tabulce 2* je uveden seznam zkratk, jak je používá ČHMÚ a jak jsou použity v této práci.

Tabulka 2: Seznam zkratk povětrnostních situací. Zdroj dat: ČHMÚ.

zkratka	název	zkratka	název
Wc	západní cyklonální situace	Sa	jižní anticyklonální situace
Wcs	západní cyklonální situace s jižní dráhou	SWc1	jihozápadní cyklonální situace
Wa	západní anticyklonální situace	SWc2	jihozápadní cyklonální situace
Wal	západní anticyklonální situace letního typu	SWc3	jihozápadní cyklonální situace
NWc	severozápadní cyklonální situace	SWa	jihozápadní anticyklonální situace
NWa	severozápadní anticyklonální situace	B	brázda nízkého tlaku nad střední Evropou
Nc	severní cyklonální situace	Bp	brázda postupující přes střední Evropu
NEc	severovýchodní cyklonální situace	Vfz	vchod frontální zóny
NEa	severovýchodní anticyklonální situace	C	cyklóna nad střední Evropou
Ec	východní cyklonální situace	Cv	cyklóna výšková
Ea	východní anticyklonální situace	A	anticyklóna nad střední Evropou
SEc	jihovýchodní cyklonální situace	Ap	putující anticyklóna
SEa	jihovýchodní anticyklonální situace		

4.5 Použité metody

4.5.1. Časoprostorové charakteristiky

Datové sady s bleskovými údaji byly nejprve zkoumány z časoprostorových hledisek, za pomoci základních statistických metod. Jednou ze zkoumaných vlastností dat byl jejich denní chod. Pro každou ze tří zkoumaných detekčních sítí byl zjištěn počet bleskových výbojů pro každou jednu denní hodinu (vždy v UTC). Dalším krokem byl výpočet průměrné hodnoty počtu zaznamenaných bleskových výbojů pro jednotlivé detekční sítě za každou hodinu. Protože jsou detekční sítě odlišné, ať již citlivostí detekce nebo jinými parametry a také proto, že datové sady neodpovídaly stejné časové řadě, bylo nutné hodinové průměry sjednotit tak, aby bylo možné jejich porovnání. K tomu dobře posloužilo procentuální zastoupení bleskových výbojů v jednotlivých hodinách dne.

U dat ze sítě WWLLN bylo možné, díky víceleté časové řadě, zjistit meziroční proměnlivost bleskové aktivity. Byly zjištěny měsíční počty bleskových výbojů z této sítě

napříč sledovanými roky. Pro lepší přehlednost byly výsledky ze všech sedmi let zobrazeny do jednoho grafu.

U studia prostorových charakteristik bylo využito programu QGIS. Po prostudování získaných dat se ukázalo, že data bleskové aktivity jsou pouze u 20 dnů (*tabulka 3*) dostupná od všech tří studovaných sítí. Pro každý z dnů uvedených v *tabulce 3* byly vytvořeny tři mapy - pro WWLLN, Blitzortung a EUCLID, resp. BLIDS.

Tabulka 3: Seznam dnů pro porovnání prostorového rozložení bleskové aktivity.

06.06.2019	11.08.2019
10.06.2019	12.08.2019
12.06.2019	27.08.2019
20.06.2019	29.08.2019
29.07.2019	04.06.2020
31.07.2019	15.08.2020
02.08.2019	28.08.2020
03.08.2019	23.06.2021
04.08.2019	24.06.2021
07.08.2019	29.06.2021

Jako další byly vypracovány a vyhodnoceny mapy zobrazující prostorové charakteristiky pomocí počtu bleskových výbojů na určité ploše. Vzhledem k přesnosti lokalizace byla pro detekční síť Blitzortung a EUCLID zvolena síť 1x1 km. U detekční sítě WWLLN, jejíž přesnost lokalizace je menší, pak byla zvolena síť 10x10 km. Pro každý takto vytvořený čtverec byl vypočítán počet bleskových výbojů, který byl na daném km², popř. 10 km² v daný rok lokalizován. Toto bylo provedeno pro každou detekční síť zvlášť. U sítě Blitzortung a EUCLID se jedná pouze o dny nebo měsíce v daném roce, pro která byla k dispozici data.

4.5.2. Vztah mezi bleskovou aktivitou a krajinným pokryvem

Pro porovnání bleskové aktivity a krajinného pokryvu byl také využit program QGIS. Jak bylo zmíněno v popisu dat CORINE Land Cover (kap. 4.3.), databáze CORINE Land Cover pracuje se 44 typy krajinného pokryvu. Pro tuto práci byly uvažovány pouze tematické skupiny podle tříd krajinného pokryvu uvedených v databázi CORINE Land Cover. Těchto 13 skupin krajinného pokryvu je spolu s procentuálním zastoupením v zájmovém území uvedeno v *tabulce 4*.

Každý bleskový výboj byl následně přiřazen ke skupině krajinného pokryvu, nad kterým byl detekován. Následně byl počet bleskových výbojů přiřazený k jednotlivých krajinným typům, resp. tematickým skupinám, vydělen plochou těchto typů. Tím se odstranily nerovnosti spočívající v různé výměře jednotlivých krajinných typů, aby bylo možné výsledky porovnat. Zajímavostí může být velmi vysoký podíl zastoupení kategorie pastvin v zájmovém území. Ten ale vychází z faktu, že databáze CORINE Land Cover do tohoto typu začleňuje i téměř travnatou vegetaci, která byt' jen přechodně slouží k pastvě dobytka. Do této kategorie tak spadá velké území českých pohraničních pohoří.

Tabulka 4: Procentuální zastoupení typů krajinného pokryvu v zájmovém území.

Zdroj dat: CORINE Land Cover

Krajinný pokryv	Procentuální zastoupení
Obytné plochy	16.64
Průmyslové a obchodní zóny, komunikační síť	4.67
Doly, skládky, staveniště	2.93
Plochy umělé, nezemědělské zeleně	1.88
Orná půda	5.18
Stálé kultury	3.02
Pastviny	38.58
Různorodé zemědělské plochy	6.37
Lesy	4.18
Plochy s křovinatou a travnatou vegetací	4.52
Otevřené plochy s malým zastoupením vegetace nebo bez vegetace	3.21
Humidní oblasti	1.71
Vodní plochy	7.11

4.5.3. Vztah mezi bleskovou aktivitou a povětrnostní situací

Pro zjištění vztahu bleskové aktivity s povětrnostními typy bylo, vzhledem k dennímu rozlišení dat povětrnostních typů, nutné vycházet z počtu bleskových výbojů za den. Tyto denní počty byly následně přiřazeny k povětrnostním typům. Dále bylo vypočteno procentuální zastoupení jednotlivých povětrnostních typů, přičemž 100 % odpovídalo všem detekovaným bleskovým výbojům. V *tabulce 5* je zobrazeno procentuální zastoupení povětrnostních typů za letní měsíce (červen, červenec a srpen) v období 2019 - 2021.

Tabulka 5: Procentuální zastoupení typů povětrnostních situací v letních měsících 2019 - 2021.

Zdroj dat: ČHMÚ

Typ povětrnostní situace	Procentuální zastoupení (%)
A	1.81
Ap1	5.80
Ap2	2.90
Ap3	1.81
B	18.84
Bp	10.14
C	1.81
Cv	4.71
Ea	6.16
Ec	1.09
Nc	1.09
NEa	2.54
NEc	7.25
NWa	6.52
NWc	1.09
SEa	4.35
SWa	1.45
SWc1	6.52
SWc2	4.35
Vfz	0.72
Wa	1.45
Wal	5.07
Wc	2.54

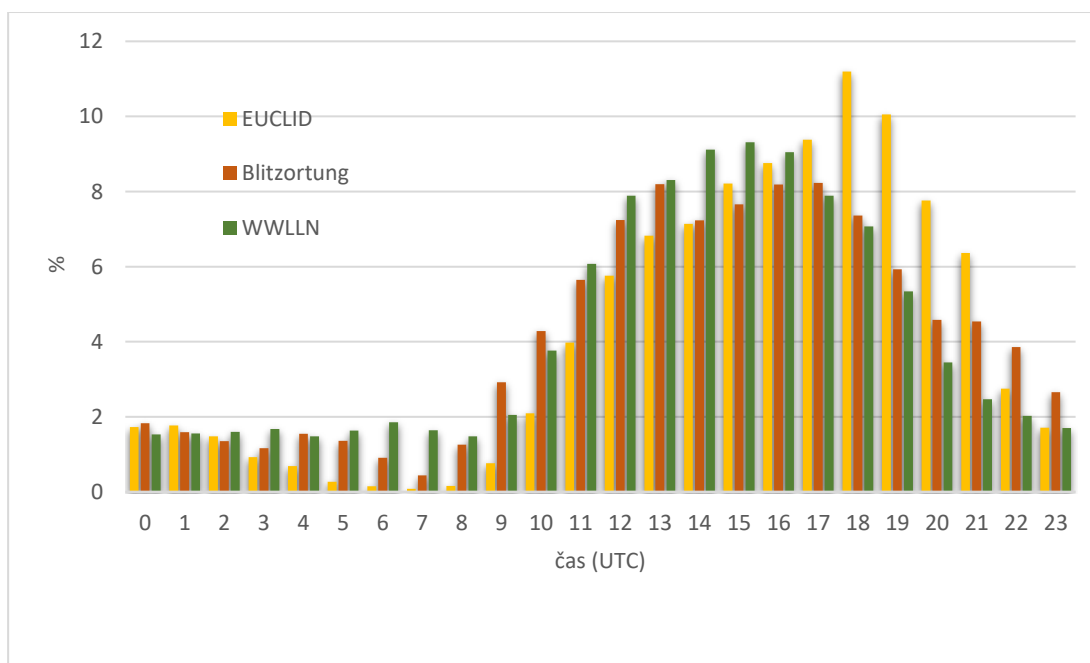
5. Výsledky

V následující části jsou představeny výsledky praktické části této práce. Zejména se jedná o časové a prostorové charakteristiky bleskových výbojů, o vztah mezi bleskovou aktivitou a krajinným pokryvem a mezi bleskovou aktivitou a povětrnostními typy.

5.1. Časové charakteristiky bleskové aktivity

Graf 1 ukazuje porovnání denního chodu bleskové aktivity v zájmovém území pro sítě WWLLN (zeleně), Blitzortung (hnědě) a EUCLID (žlutě). Každý sloupec přitom reprezentuje procentuální zastoupení detekovaných bleskových výbojů v hodinovém intervalu od každé uplynulé celé hodiny UTC, kdy 100 % odpovídá dennímu průměrnému počtu bleskových výbojů.

Graf 1: Denní chod bleskové aktivity (v %) v zájmovém území. Zdroj dat: WWLLN, Blitzortung a EUCLID.



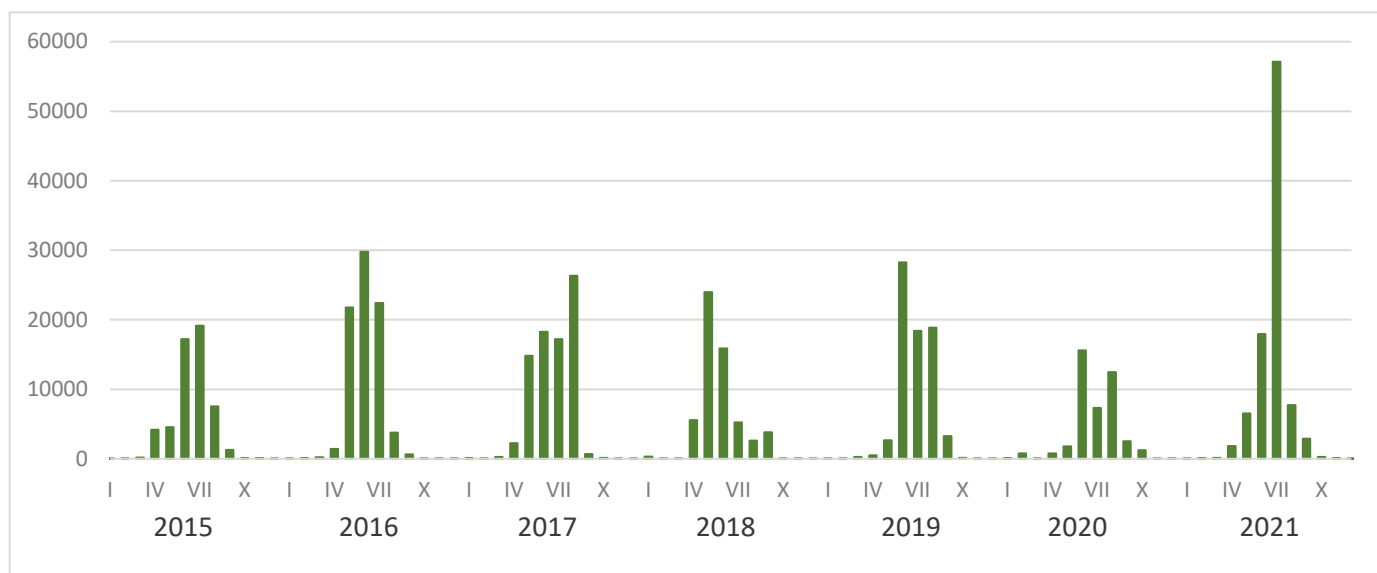
Z grafu 1 plyne, že se minima bleskových výbojů u všech sítí vyskytují v dopoledních hodinách, kdežto maxima v odpoledních hodinách, nehledě na různé fungování jednotlivých detekčních sítí. U sítě WWLLN je procentuální zastoupení detekovaných

bleskových výbojů během nočních a dopoledních hodin srovnatelné. Zastoupení se pohybuje mezi 1 až 2 % hodinových průměrů dat z této sítě. U sítě EUCLID a Blitzortung, lze kromě obdobně malého procentuálního zastoupení bleskových výbojů během nočních a ranních hodin, pozorovat také ještě prohlubující se útlum bleskové aktivity mezi 7. a 9. hodinou UTC. U těchto sítí dosahují dopolední minima bleskové aktivity pod 1 % denních průměrů.

Maxima bleskové aktivity se objevují u všech tří sledovaných sítí v odpoledních hodinách. U sítě WWLLN a Blitzortung je lze nalézt mezi 13. a 17. hodinou UTC a dosahují 8 - 9 % průměrné denní bleskové aktivity. U sítě EUCLID jsou maxima posunuta do pozdějších hodin, objevují se mezi 18. a 19. hodinou UTC a dosahují až 11 % průměrné denní bleskové aktivity. To může souviset s tím, že data ze sítě EUCLID byla k dispozici pouze pro dny s výraznou bleskovou aktivitou, která bývá častá právě v podvečer a maxima tak mohou být posunuta do pozdějších hodin. Např. maxima výskytu krup, spojených s výraznou konvektivní činností, se objevují také v podvečerních hodinách (Novák, Kyznarová 2020).

Díky víceleté časové řadě bleskových dat ze sítě WWLLN bylo možné vytvořit graf ročního chodu bleskové aktivity mezi lety 2015 - 2021 (*graf 2*). Jsou zde zaznamenány měsíční počty bleskových výbojů nad zájmovým územím. Na *grafu 2* jsou dobře patrná maxima bleskové aktivity v letních měsících, a naopak minima v zimních měsících. V roce 2015 a 2021 byl měsícem s nejvyšším počtem blesků červenec, v letech 2016, 2019 a 2020 červen, v roce 2017 to byl srpen, a v roce 2018 květen. Dále lze pozorovat značnou meziroční variabilitu počtu bleskových výbojů. Jako nejméně bleskově aktivní se jeví roky 2015 a 2020, kdy maxima v letních měsících nedosahují ani 20 000 bleskových výbojů za měsíc. V letech 2016 - 2019 dosahují nejvyšší měsíční maxima 25 000 - 30 000 výbojů. Na první pohled z *grafu 2* vyčnívá červencové maximum roku 2021, které dosahuje hodnoty přes 55 000 bleskových výbojů za měsíc. Toto maximum může souviset s výskytem supercel a dvou mezoměřítkových konvektivních systémů z 8. a 9. 7. 2021. Dalším důvodem může být nově nainstalované čidlo sítě WWLLN na Milešovce (na konci roku 2020), které umožnilo zvýšit detekovatelnost výbojů v oblasti střední Evropy, kde dosud bylo čidlo pouze na území Maďarska.

Graf 2: Měsíční počty bleskových výbojů za období 2015 - 2021. Zdroj dat: WWLLN. Na ose x jsou znázorněny měsíce v jednotlivých studovaných letech. Na ose y počet detekovaných výbojů.

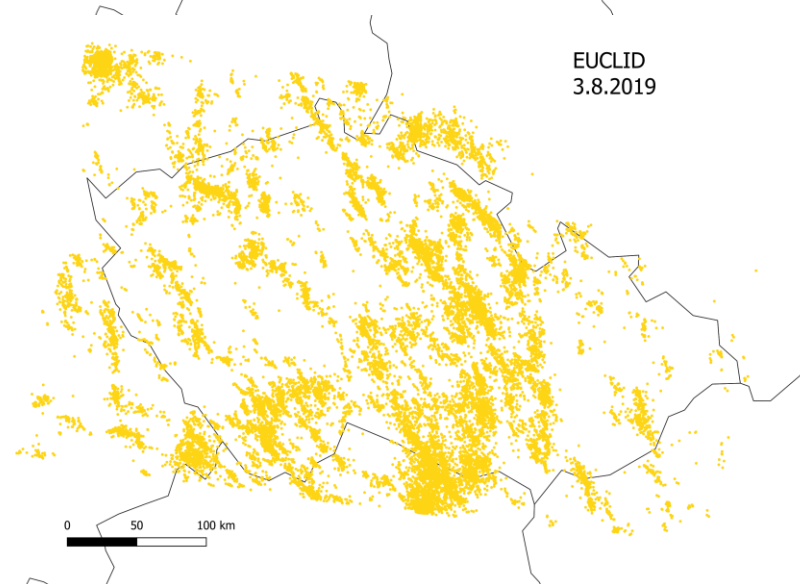
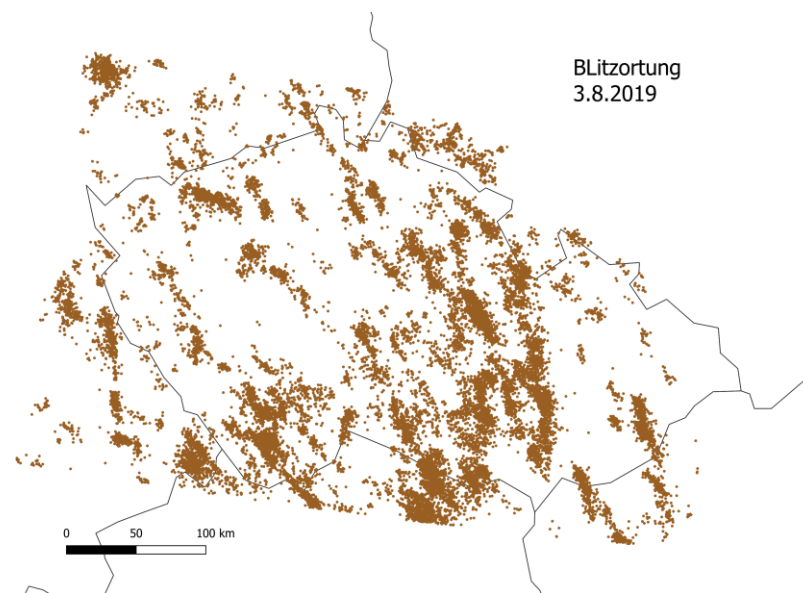
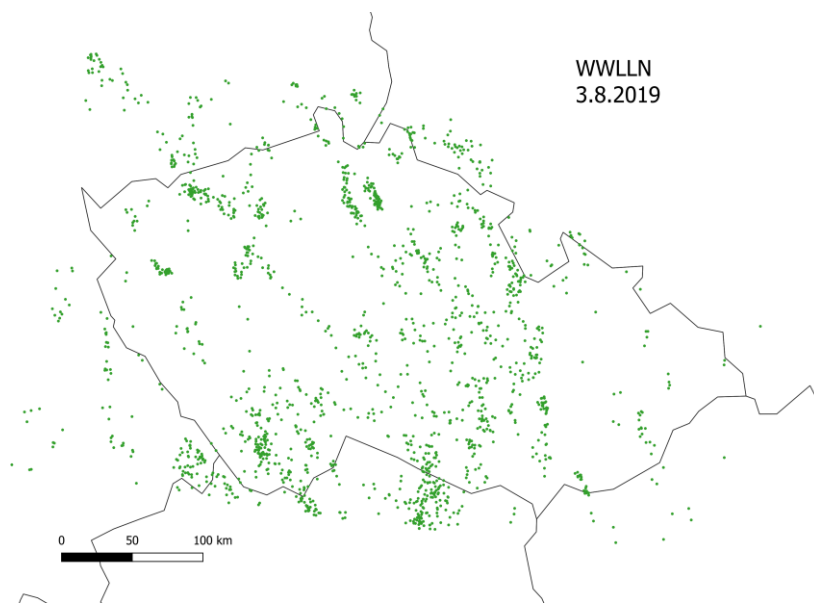


5.2. Prostorové charakteristiky bleskové aktivity

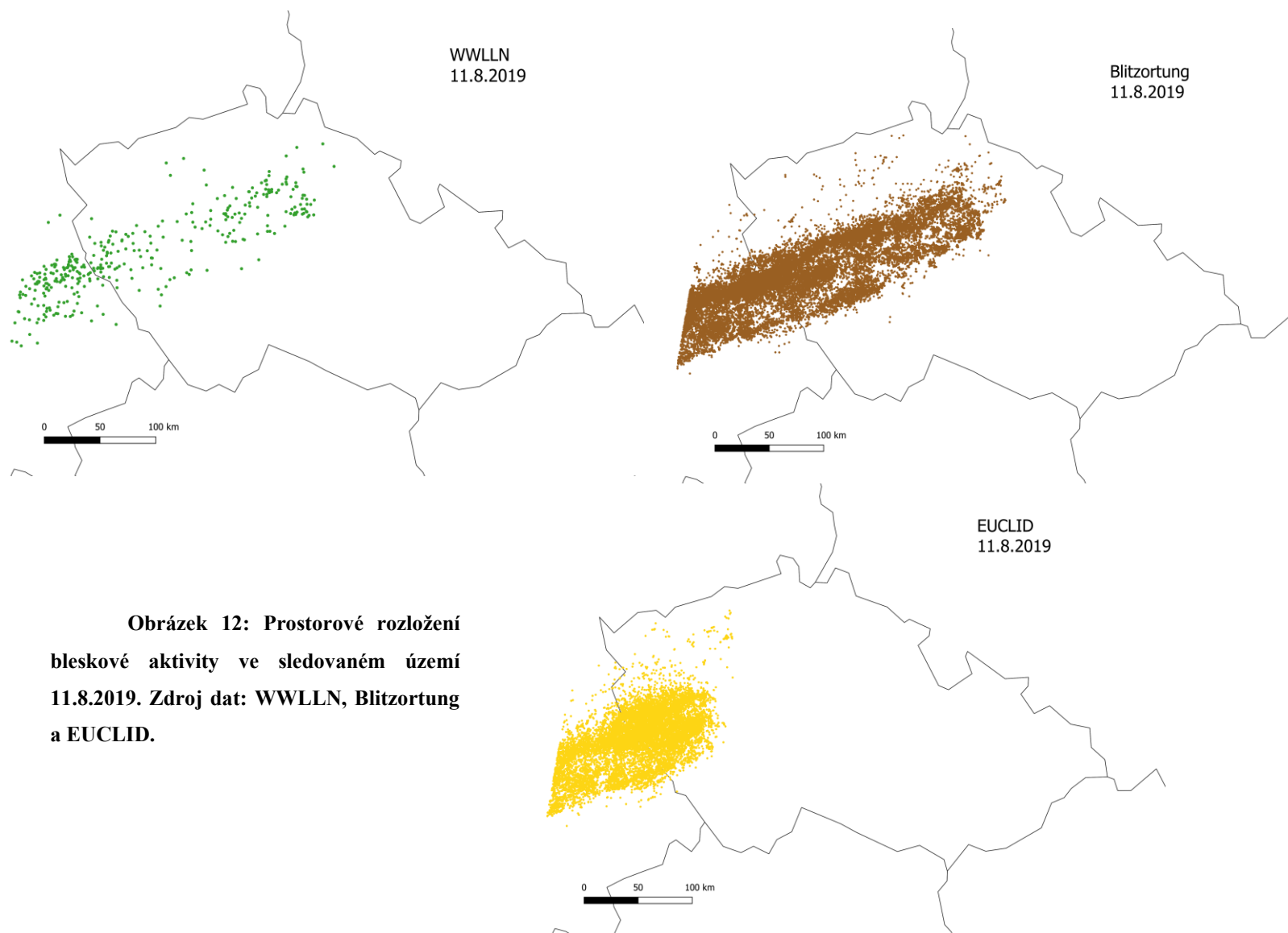
Na následujících stránkách (*obrázky 11, 12 a 13*) je zobrazeno prostorové rozložení bleskové aktivity ze dnů 3.8.2019, 11.8.2019 a 29.6.2021. Obrázky věnující se ostatním sledovaným dnům (viz *tabulka 3*) jsou přidány k této práci jako přílohy.

Na první pohled je znát, že v jednotlivých dnech je nejvíce bleskových výbojů zaznamenáno sítí EUCLID. Nejvíce patrné je to u obrázku 12. Příčinou bude pravděpodobně odlišný princip detekce, který pracuje v rozsahu VHF, na rozdíl od sítí WWLLN a Blitzortung, které snímají VLF. Odlišné množství detekovaných výbojů u WWLLN a Blitzortung je pravděpodobně způsobeno mnohem větším počtem detektorů sítě Blitzortung.

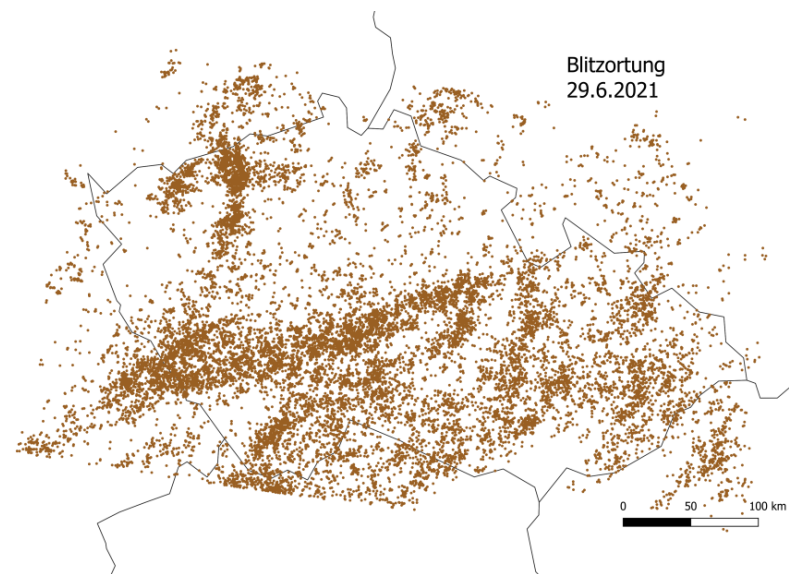
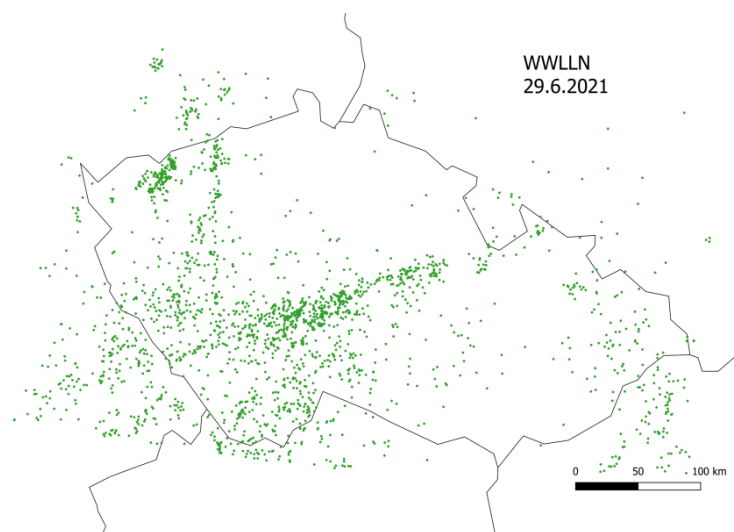
Co se týče prostorového rozložení bleskové aktivity, není ani u jedné ze sledovaných sítí zjištěna výrazná prostorová odchylka od ostatních. Toto zjištění je překvapivé hlavně vůči síti WWLLN, která by měla mít teoreticky nižší schopnost určení přesné polohy bleskového výboje než zbývající sítě vzhledem k její výrazně nižší přesnosti lokalizace (10 km). Nelze si nevšimnout velmi rozdílné četnosti bleskových výbojů u sítě EUCLID dne 11.8.2019 (*obrázek 12*), kde v porovnání se sítěmi WWLLN i Blitzortung chybí značné množství bleskových výbojů. Toto bude pravděpodobně souviset s nějakým výpadkem sítě. Jasně 'uríznutí' dat EUCLID dne 29.6.2021 (*obrázek 13*) je těžko vysvětlitelné. Může souviset s časovým posunem detekce či nějakým problémem východněji položených čidel.



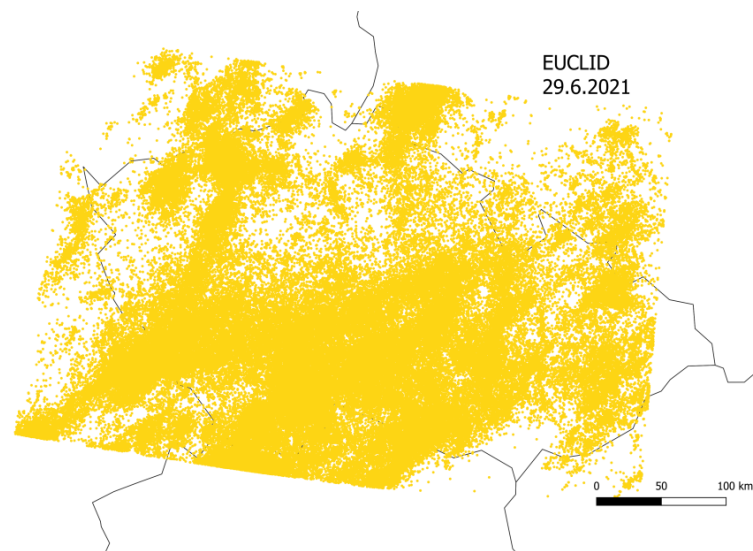
Obrázek 11: Prostorové rozložení bleskové aktivity ve sledovaném území 3.8.2019. Zdroj dat: WWLLN, Blitzortung a EUCLID.



**Obrázek 12: Prostorové rozložení
bleskové aktivity ve sledovaném území
11.8.2019. Zdroj dat: WWLLN, Blitzortung
a EUCLID.**



Obrázek 13: Prostorové rozložení bleskové aktivity ve sledovaném území 29.6.2021. Zdroj dat: WWLLN, Blitzortung a EUCLID.

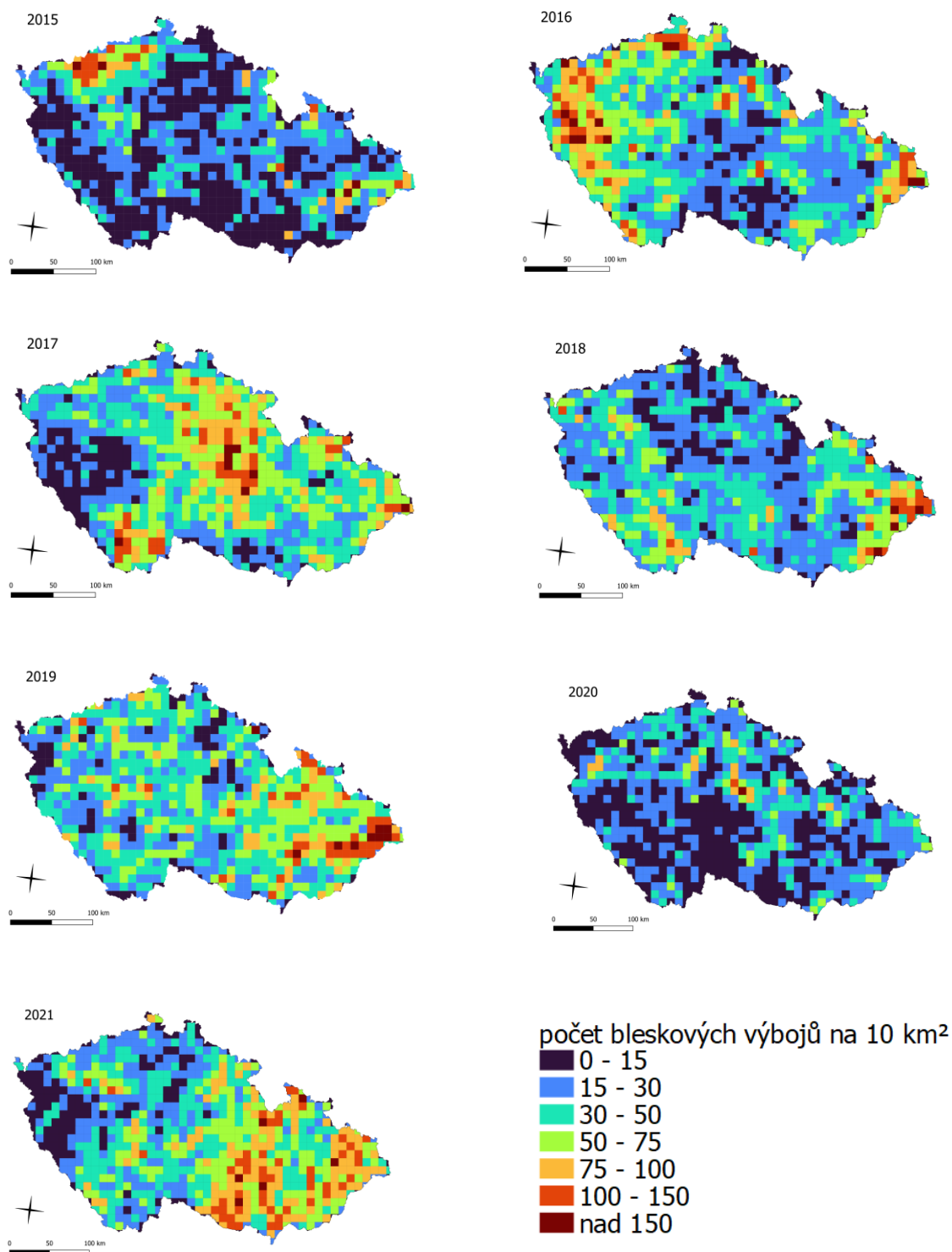


5.3 Časoprostorové charakteristiky bleskové aktivity

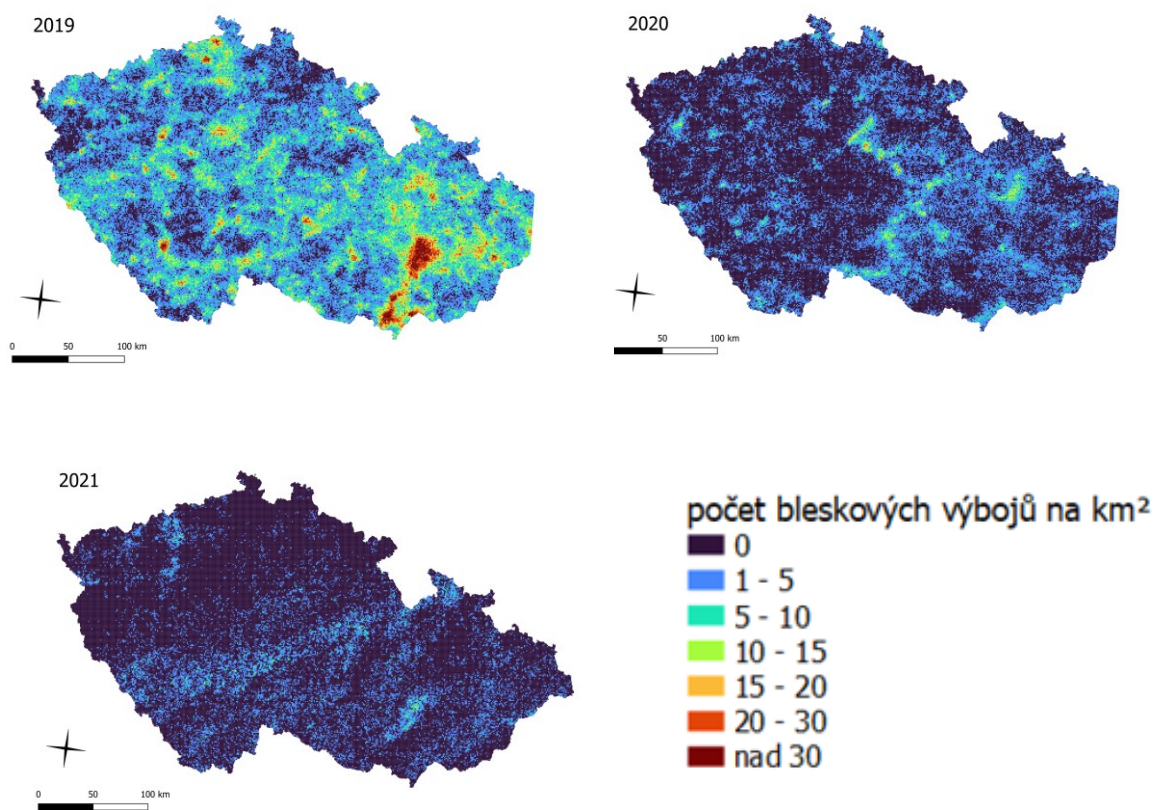
Na následujících stranách je zobrazeno prostorové rozložení bleskové aktivity formou počtu bleskových výbojů na 1 km², popř. 10 km² pro území Česka (*obrázky 14, 15 a 16*) během let, pro které byla k jednotlivým detekčním sítím dostupná data.

Meziroční variabilitu bleskových dat je možná porovnat pouze z dat ze sítě WWLLN (*obrázek 14*), pro kterou byla dostupná data za období 2015-2021. U zbývajících sítí je nutné počítat s tím, že údaje nejsou pro celé uvedené roky, ale jen pro některá časová období, popř. vybrané dny (viz. kap.4.2.) a obrázky jsou tak spíše doplňujícího charakteru, než aby představovaly informace o meziroční variabilitě bleskové aktivity.

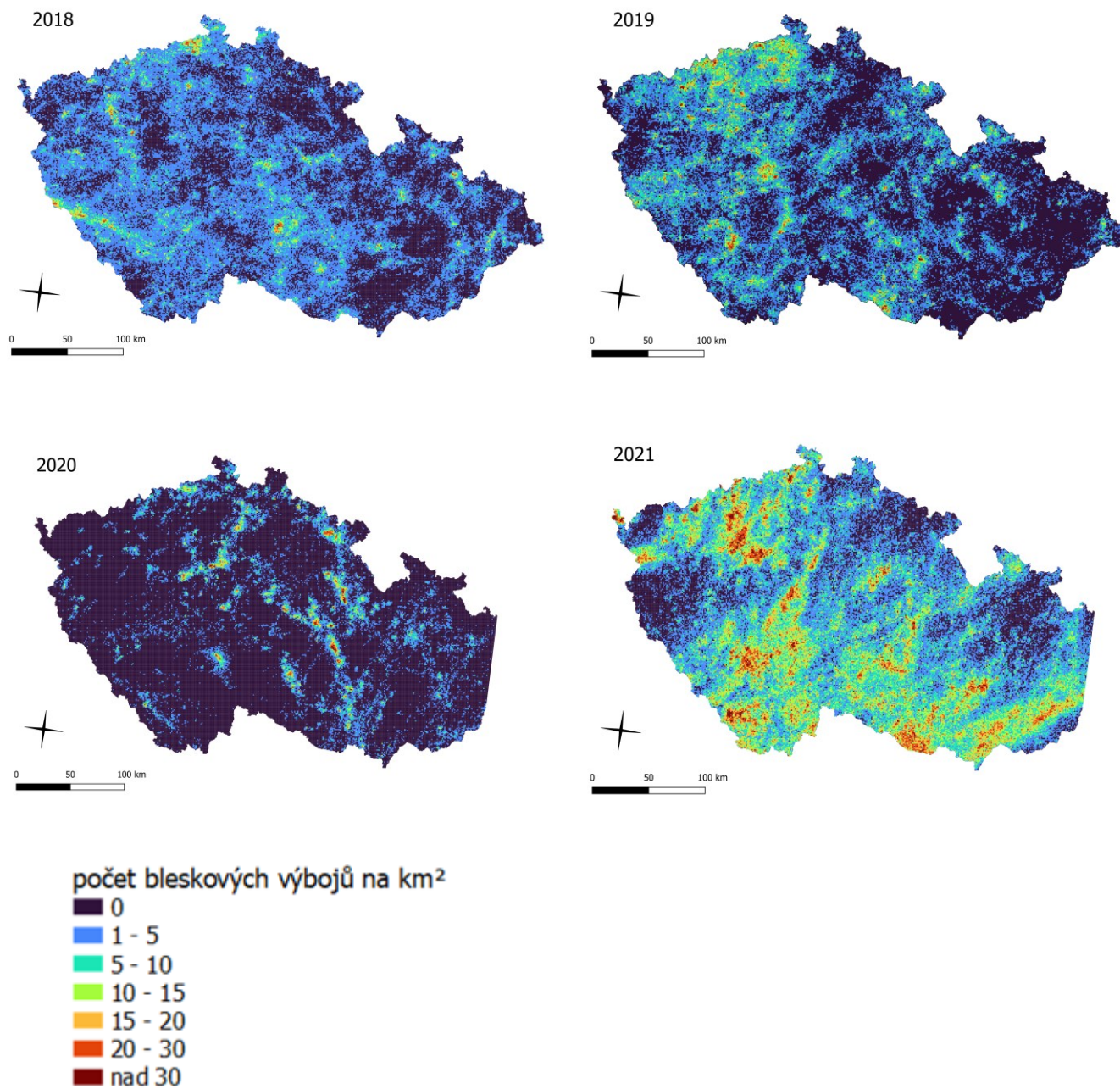
Z *obrázku 14* lze vyčíst, že v roce 2015 byla blesková činnost detekována především v severozápadní oblasti Česka. Během roku 2016 se větší počet bleskových výbojů objevil v celých západních Čechách a také na východě Česka. Zajímavostí může být, že v této nejvýchodnější části Česka se výrazný počet bleskových výbojů objevil i během let 2017, 2018, 2019 a 2021. V roce 2017 se přidává také střední oblast zájmového území. V roce 2021 je výrazně bleskově aktivnější oblast Moravy než zbytek Česka. Jako nejméně bleskově aktivní se jeví roky 2015 a 2020, což potvrzují i informace ze samotných počtů zaznamenaných bleskových výbojů.



Obrázek 14: Počet bleskových výbojů ze sítě WWLLN na ploše 10 km² pro sledované roky.
Zdroj dat: WWLLN.



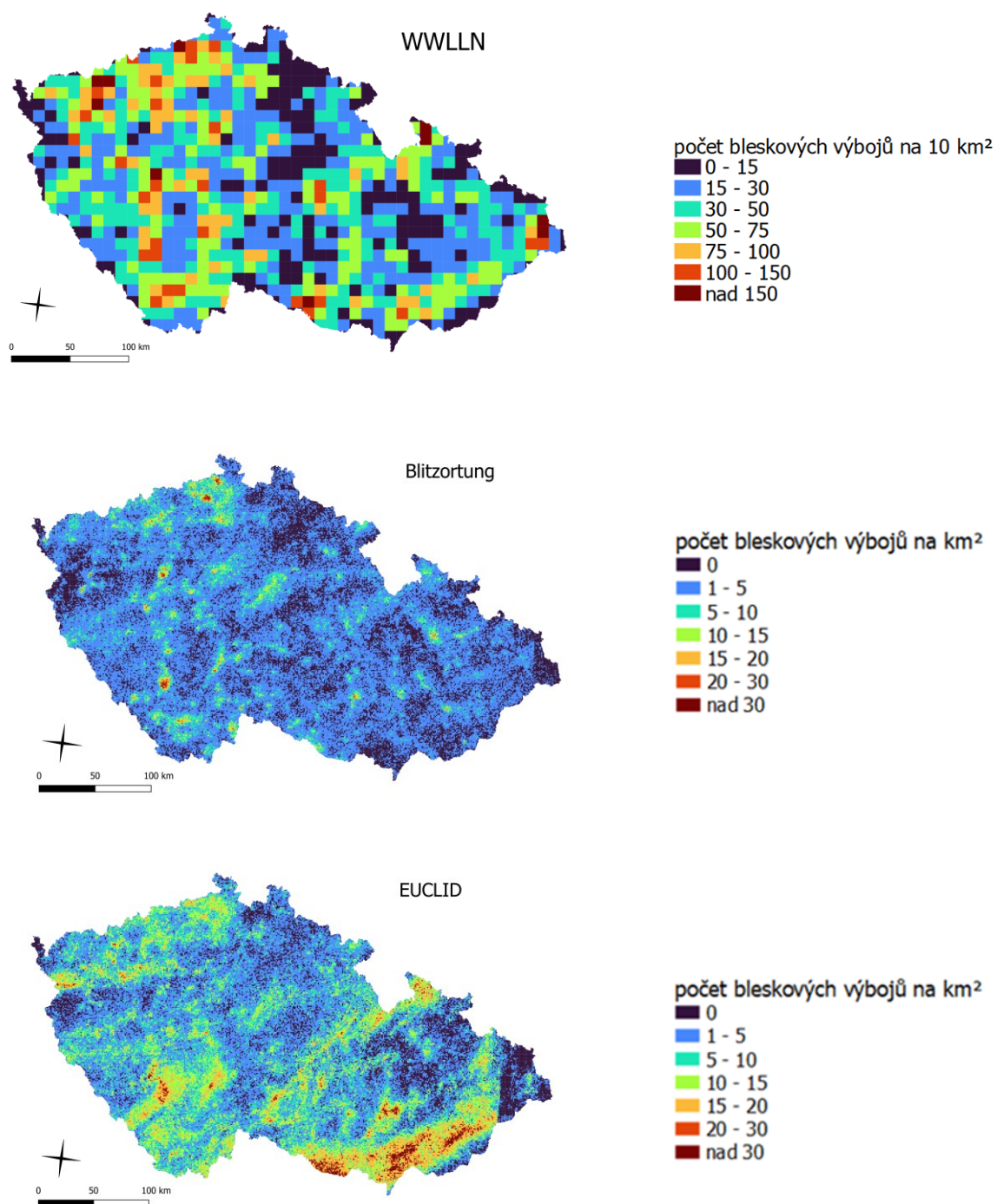
Obrázek 15: Počet bleskových výbojů ze sítě Blitzortung na ploše 1 km² pro dostupná data v letech 2019 - 2021 (kap. 4.2.2.). Zdroj dat: Blitzortung.



Obrázek 16: Počet bleskových výbojů ze sítě EUCLID na ploše 1 km² pro dostupná data v letech 2018 - 2021 (kap. 4.2.3). Zdroj dat: EUCLID.

Z obrázků 14, 15 a 16 jednoznačně vyplývá, že blesková aktivita v Česku je značně meziročně i prostorově variabilní. Vzhledem k neúplnosti dat EUCLID a Blitzortung byl vytvořen obrázek 17, který zobrazuje rozložení pro události v tabulce 3.

Na obrázku 17 je dobře vidět podobné rozložení bleskové aktivity pro data ze sítí WWLLN a EUCLID, a to i přes rozdílné prostorové rozlišení. V obou případech jsou oblastmi s větší bleskovou aktivitou severozápad a jihozápad Čech, dále oblast jižní Moravy a menší část Jeseníků. U sítě Blitzortung lze naopak pozorovat větší odlišnosti v prostorovém rozložení oproti zbývajícím sítím. Takřka úplně zde chybí větší blesková aktivita v oblasti jižní Moravy. To pravděpodobně souvisí s mnohem menším počtem detekovaných výbojů sítě Blitzortung oproti síti EUCLID během velmi silných bouřkových událostí, např. 23.6.2021 a 24.6.2021 (viz. přílohy 16 a 17) a následné rozložení tohoto menšího množství detekovaných výbojů v kilometrové síti. Z tohoto by mohlo vyplývat, že síť Blitzortung není vhodná pro oblast jižní Moravy. Pokud se ale člověk podívá na jednotlivé události zvlášť (viz přílohy 1 - 17), zjistí, že pro většinu z nich se prostorové rozložení bleskové aktivity Blitzortung příliš neliší od EUCLID a WWLLN.

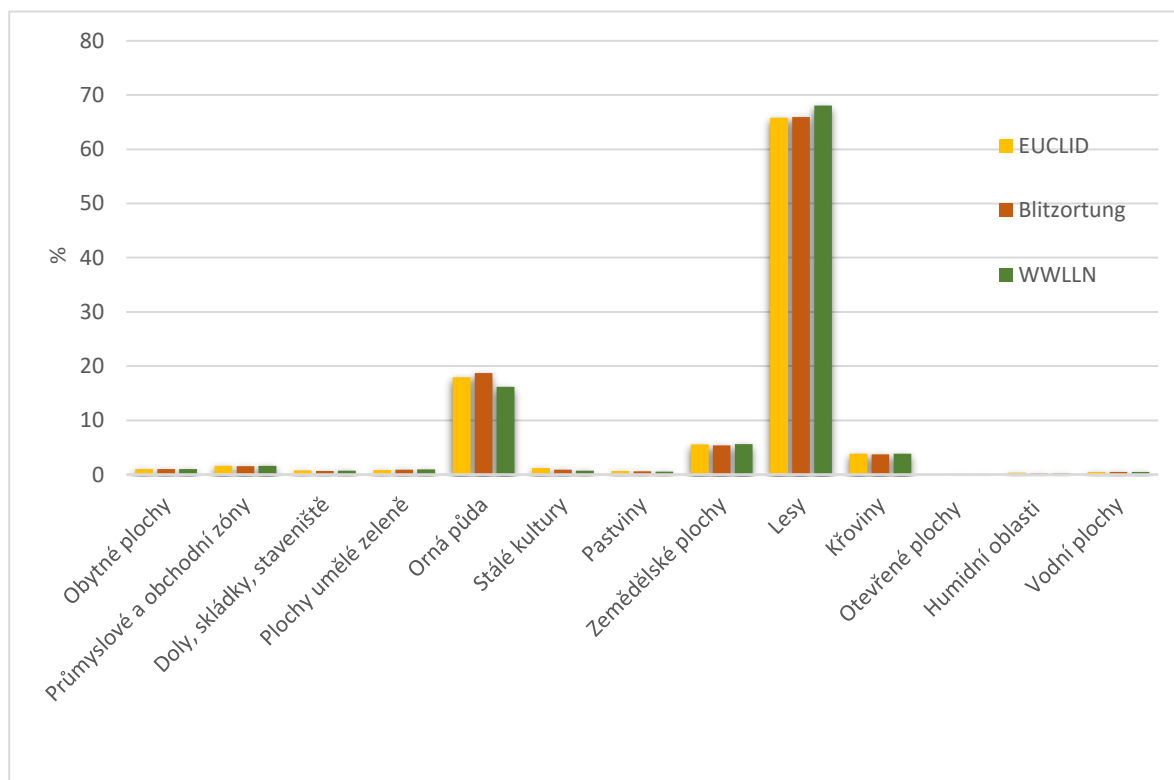


Obrázek 17: Počet bleskových výbojů na ploše 1 km² pro síť Blitzortung a EUCLID, resp. na ploše 10 km² pro síť WWLLN, pro dostupná data z let 2019 – 2021 (viz. *tabulka 3*)

5.4. Blesková aktivita a krajinný pokryv

Data bleskové aktivity byla dále zkoumána z pohledu krajinného pokryvu. Výsledky jsou ve formě procentuálního zastoupení zobrazeny na *grafu 3*.

Graf 3: Procentuální zastoupení bleskových výbojů nad jednotlivými typy krajinného pokryvu.
Zdroj dat: WWLLN, EUCLID, Blitzortung a CORINE Land Cover



Na *grafu 3* můžeme vidět, že největší podíl bleskových výbojů se soustředí nad lesní oblastí. U všech tří detekčních sítí je tomu tak v 60 – 70 %. Druhým nejčastějším krajinným pokryvem, se kterým se bleskové výboje váží, je orná půda, následovaná zemědělskými plochami a křovinami. To je v souladu s očekáváním a u všech tří sítí nalézáme shodu v tomto ukazateli. Zároveň u všech tří sítí nenajdeme blesky nad otevřenými plochami, vodními plochami a humidními oblastmi. Nad otevřenými

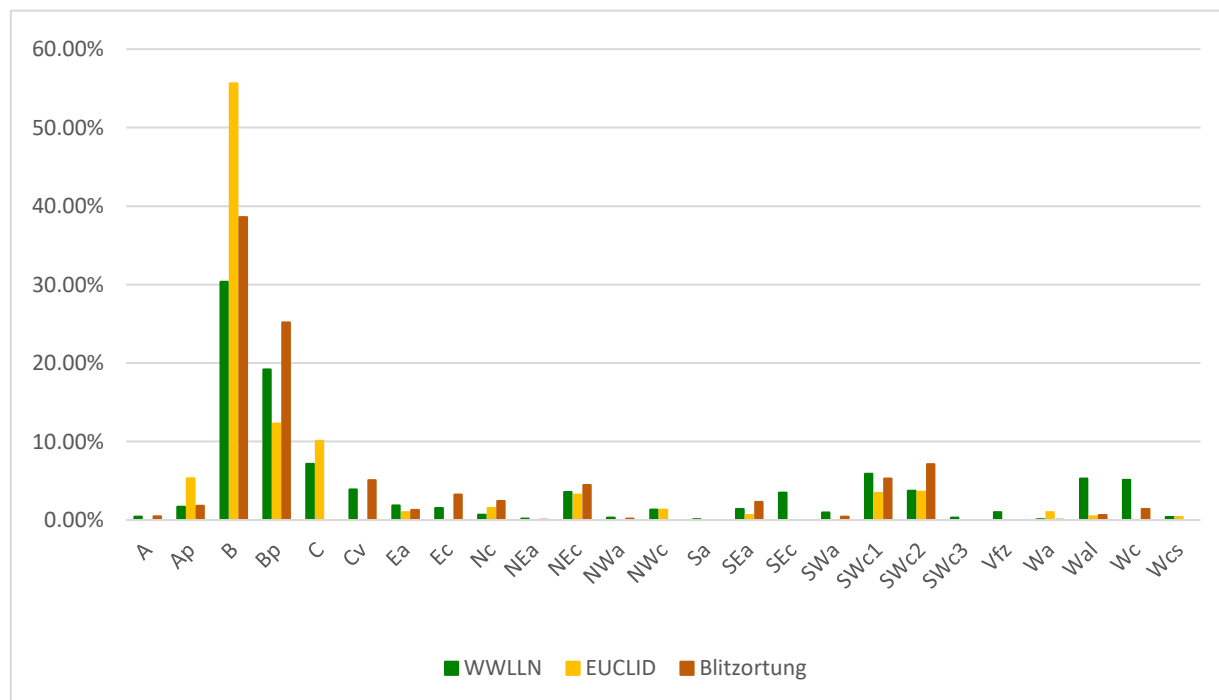
a vodními plochami by se výboje daly očekávat, ale tyto krajinné pokryvy nejsou příliš v zájmovém území zastoupeny (7,11 %) a bleskové výboje jsou velmi lokální a vzácný jev.

Z *grafu 3* tedy vyplývá, že vztah bleskových výbojů s krajinným pokryvem vystihují všechny tři sítě stejně, nehledě na jejich různé frekvenční pásmo, detekovatelnost a přesnost lokalizace.

5.5. Blesková aktivita a povětrnostní situace

Pro zjištění vztahu bleskové aktivity s povětrnostními typy bylo nutné vycházet z denních počtů bleskových výbojů vzhledem k dennímu rozlišení povětrnostních typů. Na *grafu 4* je zobrazeno procentuální zastoupení jednotlivých synoptických typů na celkovém počtu bleskových výbojů detekovaných třemi zkoumanými detekčními sítěmi.

Graf 4: Procentuální zastoupení synoptických typů na celkovém počtu bleskových výbojů. Zdroj dat: WWLLN, Blitzortung a EUCLID. Zkratky na ose X jsou vysvětleny v *tabulce 2*.



Největší podíl bleskových výbojů se u všech tří sítí objevil u synoptických situací B a Bp, tedy u situací spojených s přechodem brázdy nízkého tlaku vzduchu přes střední

Evropu. To je v souladu s očekáváním (Pacovská 2021). U ostatních synoptických typů není výskyt bleskové aktivity tak výrazný a pohybuje se do 10 %. Za zmínku stojí cyklonální situace nad střední Evropou C, která dosahuje 10 % v případě sítě EUCLID a 8 % u WWLLN, Blitzortung ji však vůbec neuvádí. Podobně zajímavý rozkol je patrný pro synoptické typy Wal nebo Wc, u kterých data ze sítě WWLLN dosahují k 5 %, kdežto zbývající sítě ukazují hodnoty kolem 1 %. U typu Ap dosahují hodnoty sítě EUCLID rovněž k 5 %, kdežto síť WWLLN i Blitzortung jen k 1 %.

Na rozdíl od shodného vztahu bleskových výbojů s krajinným pokryvem pro všechny tři sítě, vztah se synoptickými typy tak jednoznačně shodný není. To může souviset se střídáním povětrnostních typů během roku a tím, že pro sítě EUCLID a Blitzortung byla k dispozici data pouze pro některé dny nebo měsíce zkoumaných let.

6 Diskuze

Zjištěný denní i roční chod bleskové aktivity je v souladu s výsledky jak na území Česka (Novák, Kyznarová 2020), tak na území Evropy (Taszarek a kol. 2018 a Enno, Sugier 2020). Tyto studie ukazují, že maximum bleskové aktivity je dosahováno v odpoledních hodinách mezi 14:00 a 16:00 UTC. Nejnižší aktivita nastává v ranních hodinách. Toto se potvrdilo i v této práci, kdy vyšla maxima také mezi 14:00 a 16:00 UTC, jen u sítě EUCLID byla maxima posunuta do pozdějších hodin, což může souviset s tím, že data EUCLID zahrnovala pouze bleskově nejsilnější události. U ročního chodu bleskové aktivity uvádějí zmíněné studie maxima v letních měsících, naopak výrazný útlum bleskové aktivity v zimním období. I toto tvrzení se v této práci potvrzuje. Maxima měsíčních počtů výbojů byla shledána během letních měsíců na základě souvislé datové řady WWLLN pokrývající období 2015 - 2021.

Porovnání prostorových charakteristik bleskových výbojů potvrdilo, že blesková činnost je prostorově velmi proměnlivá hlavně vzhledem k tomu, že intenzita bleskové aktivity v bouřích může být velmi rozdílná, a i jeden bouřkový komplex s intenzivní bleskovou aktivitou může značně ovlivnit plošné rozložení bleskové aktivity. Ke stejným výsledkům došli i Novák a Kyznarová (2020), kteří uvádějí, že v bleskově intenzivních bouřích se vyskytuje značné množství blesků, které mohou ovlivnit průměrné plošné rozložení bleskové aktivity i na několik let.

Z výsledků vyplývá, že detekční síť EUCLID zaznamenává nejvíce bleskových výbojů. Pro podrobnější studium bleskové aktivity či samotných bleskových výbojů se tak zdá být nejvhodnější. Navzdory skutečnosti, že síť Blitzortung je amatérskou sítí, její účinnost detekce se zdá být velmi dobrou a v řadě případů může konkurovat profesionální síti EUCLID. Detekční síť WWLLN zaznamenává systematicky méně bleskových výbojů než zbývající sítě, což souvisí pravděpodobně s jejím rozdílným fungováním a daleko menším počtem čidel v Evropě (pouze 9). Nicméně v této práci nebyly objeveny větší lokalizační chyby této sítě a prostorové rozložení bleskové aktivity se zdá být velmi dobré a v souladu se sítěmi Blitzortung a EUCLID. Když se k tomuto zjištění přidá fakt, že se jedná

o celosvětovou detekční síť, WWLLN může sloužit jako velmi dobrý pomocník při obecném studiu rozložení bleskové aktivity na Zemi.

Vztah mezi bleskovými daty a krajinným pokryvem zkoumali např. Misztal a Siłuch (2021). Jejich výzkum se věnoval území Polska a počítal s hustotou atmosférických výbojů na km² plochy. Na rozdíl od výsledků této práce, které ukázaly, že nejvíce bleskových výbojů se v Česku vyskytuje nad lesy a ornou půdou, Misztal a Siłuch (2021) objevili největší hustotu bleskových výbojů nad mokřady. Jak však tito autoři sami uvádějí, jejich výsledky mohou být způsobeny hojným zastoupením tohoto krajinného prvku na území Polska (Misztal, Siłuch 2021).

Vztahem mezi bleskovou aktivitou a povětrnostními typy se věnovala bakalářská práce, jež předchází této diplomové práci (Pacovská 2021). Ta vycházela pouze z dat sítě WWLLN pro kratší období (2017-2019). Výsledky práce ukázaly, že pravděpodobnost výskytu bleskových výbojů je u některých povětrnostních typů (B, Bp, C, Cv a Wal) větší než u jiných. U typů B a Bp je toto zjištění v souladu s výsledky této práce, kdy všechny sledované detekční sítě uvádějí B a Bp s největším procentuálním zastoupením detekovaných bleskových výbojů. U typů C, Cv a Wal, jsou výsledky nejednoznačné a každá ze sítí uvádí jiné procentuální zastoupení těchto typů, ovšem pořád se jedná o typy, které jsou s bleskovou aktivitou spjaté.

Celkově se potvrzuje, že pozemní systémy detekce bleskové aktivity jsou velkým pomocníkem při studiu bleskových výbojů a jejich vlastností. Kromě pozemních detekčních sítí, je v dnešní době, ke studiu bleskové aktivity možno využívat i optické detektory umístěné na družicích. Senzory na družicích detekují blesky jako světelné záření uvnitř v a jejich výhodou oproti pozemním detekčním sítím je vysoká účinnost detekce (70 - 90 % - podle denní doby), a také fakt, že poskytují data o bleskových výbojích prakticky v reálném čase (ČMeS online). Ve srovnání s pozemními detekčními systémy je jejich velkou nevýhodou přesnost lokalizace, která se udává přibližně 10 km, kdežto velká část provozovatelů pozemní detekce uvádí přesnost lokalizace v jednotkách km. Další nevýhodou je, že optické systémy zpravidla nedokáží rozlišit, zda se jedná o blesk typu CC

nebo CG (Rakov 2013), což většina pozemních detekčních systémů dokáže (např. EUCLID).

Dosud však družice vybavené optickým senzorem bleskové aktivity nesnímaly území Evropy. Např. nejznámější satelity GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites), jež tento senzor mají od r. 2017, se zaměřují na území Severní Ameriky. Nyní s vypuštěním družice Meteosat Third Generation (MTG) na konci r. 2022, která je vybavena optickým senzorem bleskové aktivity LIS (Lightning Imager Sensor) a snímá území Evropy, je zde i velký potenciál pro posun v oblasti blesků v Evropě a lepší pochopení procesů, které ke vzniku blesků vedou.

7 Shrnutí a závěr

Blesková aktivita představuje jeden z nejnebezpečnějších atmosférických jevů a studium tohoto jevu si zaslouží náležitou pozornost. Tato práce se zaměřuje na pozemní detekci bleskové aktivity a srovnává tři pozemní detekční systémy (WWLLN, Blitzortung a EUCLID) z hlediska jejich časoprostorových charakteristik a jejich vztahu ke krajinnému pokryvu a povětrnostním situacím nad územím Česka.

Výsledky ukázaly, že:

- V časových a prostorových charakteristikách bleskových výbojů se sledované detekční sítě od sebe příliš neliší a denní chod bleskové aktivity odpovídá dosavadním poznatkům.
- Vztah mezi bleskovou aktivitou a krajinným pokryvem se ukázal u sledovaných sítí stejný. Všechny tři sítě udávají nejvyšší počet bleskových výbojů nad lesy, které jsou následovány ornou půdou a pak zemědělskými plochami a křovinami.
- U vztahu bleskové aktivity s povětrnostní situací se sledované detekční sítě shodnou pouze na největším zastoupení typů B a Bp, i když i u těchto typů se procenta podílu na celkovém počtu bleskových výbojů značně liší. U ostatních typů jsou výsledky různé.

Hlavním přínosem této práce je zjištění, že všechny tři porovnávané pozemní sítě, ať už profesionální EUCLID a WWLLN či amatérský Blitzortung, mají dobrý potenciál podávat kvalitní informace o charakteristikách bleskové aktivity nad územím Česka. Nehledě na odlišné fungování, metodu detekce a přesnost těchto sítí, zkoumané charakteristiky bleskové aktivity často vycházejí podobně. V dalším studiu by bylo dobré získané datové soubory rozšířit o chybějící údaje u některých sítí a získat tak robustnější a lépe kvantifikovatelné výsledky. S vypuštěním MTG se také nabízí možnost zjišťování stejných charakteristik bleskové aktivity, jako pro pozemní sítě, z družicových dat LIS.

Seznam použitých zdrojů

Literatura

- ABARCA, S. F.; CORBOSIERO, K. L.; GALARNEAU JR, T. J. (2010): An evaluation of the worldwide lightning location network (WWLLN) using the national lightning detection network (NLDN) as ground truth. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115.D18.
- BEDNÁŘ, J. a kol. (1993): Meteorologický slovník výkladový a terminologický. Ministerstvo životního prostředí ČR, Academia. 594 s
- BEDNÁŘ, J., POPEK, M. (2012): Přechodné světelné úkazy související s bouřkovou činností. *Meteorologické Zprávy*, 65, 168-173
- BETZ, H. D. a kol. (2004): Lightning detection with 3-D discrimination of intracloud and cloud-to-ground discharges. *Geophysical research letters*, 31.11.
- BETZ, H. D. a kol. (2009): LINET—An international lightning detection network in Europe. *Atmospheric research*, 91.2-4: 564-573
- CCOPA, J. A. a kol. (2021): Estimation of thunderstorms occurrence from lightning cluster recorded by WWLLN and its comparison with the ‘universal’Carnegie curve. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 221: 105682.
- CUMMINS, K. L.; MURPHY, M. J. (2009): An overview of lightning locating systems: History, techniques, and data uses, with an in-depth look at the US NLDN. *IEEE transactions on electromagnetic compatibility*, 51.3: 499-518.
- CHMIELEWSKI, V., BRUNING, E. (2016): Výkon detekce blesku pole Lightning Mapping Array s proměnnými prahovými hodnotami přijímače. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121, 8600-8614
- ENNO, S.E., SUGIER J. (2020): Lightning flash density in Europe based on 10 years of ATDnet data. *Atmospheric Research*, 235: 104769.

- FEDONIUK, V. V a kol. (2021): Study of thunderstorm activity in Volyn Region and in Ukraine using the data of Blitzortung online resource. Ukrainian hydrometeorological journal, 28: 16-28.
- HARE B. M. a kol. (2018): LOFAR lightning imaging: Mapping lightning with nanosecond precision. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 123(5), 2861-2876.
- HARE B. M. a kol. (2019): Needle-like structures discovered on positively charged lightning branches. Nature, 2019, 568.7752: 360-363.
- HOLZWORD, H. a kol. (2021): Lightning in the Arctic. Geophysical Research Letters, e2020GL091366.
- HUTCHINS, M. L. a kol. (2012): Far-field power of lightning strokes as measured by the World Wide Lightning Location Network. Journal of Atmospheric and Oceanic technology, 29.8: 1102-1110.
- KEIGHTON, S. J. a kol. (1991): The evolution of a severe mesoscale convective system: Cloud-to-ground lightning location and storm structure. Monthly weather review, 119(7), 1533-1556.
- KOPÁČEK, J.; BEDNÁŘ, J.; ŽÁK, M. (2020): Jak vzniká počasí. Charles University in Prague, Karolinum Press.
- LYU, F. a kol. (2014): A low-frequency near-field interferometric-TOA 3-D Lightning Mapping Array. Geophysical Research Letters, 41.22: 7777-7784.
- MACGORMAN, D. R.; RUST, W. D. (1998): The electrical nature of storms. Oxford University Press, USA.
- MALLICK, S. a kol. (2015): Performance characteristics of the ENTLN evaluated using rocket-triggered lightning data. Electric power systems research, 118: 15-28.
- MISZTAL, K., SIŁUCH, M. (2021): Spatial analysis of atmospheric discharges in Lubelszczyzna in 2018. Applied Geomatics, 13.4: 969-979.

- MEZUMAN, K.; PRICE, C.; GALANTI, E. (2014): On the spatial and temporal distribution of global thunderstorm cells. *Environmental Research Letters*, 9.12: 124023.
- NOVÁK, P.; KYZNAROVÁ, H. (2020): Dlouhodobé charakteristiky konvektivních bouří z pohledu radarových dat a dat detekce blesků. *Meteorologické zprávy*, 65-77.
- PACOVSKÁ, L. (2021): Vztah mezi povětrnostními typy a daty bleskových výbojů ve střední Evropě. *Bakalářská práce (Bc.)--Univerzita Karlova. Přírodovědecká fakulta.*
- PEEL, C.; FINLAYSON, L.; MCMAHON, A. (2007): Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and earth system sciences*, 11.5: 1633-1644.
- RAKOV, V. A., UMAN, M. A. (2003): *Lightning: Physics and Effects*. Cambridge University Press, ISBN 0-521-58327-6.
- RAKOV, V. A. (2013): Electromagnetic methods of lightning detection. *Surveys in Geophysics*, 34: 731-753.
- RAKOV, V. A. a kol (2022): New insights into the lightning discharge processes. *Plasma Sources Science and Technology*, 31.10: 104005.
- RODGER, C. a kol. (2006): Detection efficiency of the VLF World-Wide Lightning Location Network (WWLLN): initial case study, *Ann. Geophys.*, 24, 3197–3214
- RUDLOSKY, S. D.; SHEA, D. T. (2013): Evaluating WWLLN performance relative to TRMM/LIS. *Geophysical Research Letters*, 40.10: 2344-2348.
- ŘEZÁČOVÁ, D. a kol. (2007): *Fyzika oblaků a srážek*. Praha: Academia. 576 s.
- SCHOLTEN, O. a kol. (2021): A distinct negative leader propagation mode. *Scientific Reports*, 11.1: 16256.
- SCHOLTEN O. a kol. (2022): Interferometric imaging of intensely radiating negative leaders. *Physical Review D*, 105(6), p.062007.

- SCHULZ, W.; LOJOU, J. Y. (2006): Total lightning detection network in central Europe: The FLASH project. In: *9th International Lightning Detection Conference*. p. 24-25.
- SCHULZ, W. a kol. (2016): The European lightning location system EUCLID–Part 1: Performance analysis and validation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16.2: 595-605.
- SIN'KEVICH, A. A. a kol. (2020): Characteristics of cumulonimbus with waterspout over Ladoga Lake from remote measurements. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 33: 387-392.
- SPIRIDONOV, V. a kol. (2021): Novel thunderstorm alert system (NOTHAS). *Asia-Pacific journal of atmospheric sciences*, 57: 479-498.
- TASZAREK, M. a kol. (2019): A climatology of thunderstorms across Europe from a synthesis of multiple data sources. *Journal of Climate*, 32.6: 1813-1837.
- THOMAS, R J. a kol. (2004): Accuracy of the lightning mapping array. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109.D14.
- TRAN, M. D.; RAKOV, V. A. (2016): Initiation and propagation of cloud-to-ground lightning observed with a high-speed video camera. *Scientific reports*, 6.1: 39521.
- VOŽENÍLEK, V. (2008): Atlas podnebí Česka. *Kartografické listy*, 16: 79-86.
- WANKE, E.; ANDERSEN, R.; VOLGNANDT, T. (2016): World-Wide Low-Cost Community-Based Time-of-Arrival Lightning Detection and Lightning Location Network. URL: <http://www.blitzortung.org> (Accessed: April 10, 2021).
- ZHU, Y. a kol. (2017): Evaluation of ENTLN performance characteristics based on the ground truth natural and rocket-triggered lightning data acquired in Florida. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122.18: 9858-9866.

Internetové zdroje

- BLIDS (online). der Blitz Informationsdienst von Siemens (cit. 22.4.2023)
Dostupné z: <https://new.siemens.com/de/de/produkte/services/blids.html>
- Blitzortung (online). Blitzortung.org (cit. 27.5.2023). Dostupné z: <https://www.blitzortung.org/>
- Copernicus (online): Copernicus Land Monitoring Service (cit. 28.6.2023).
Dostupné z: <https://land.copernicus.eu/>
- ČHMÚ (online). Český hydrometeorologický ústav: Typizace povětrnostních situací pro území České republiky. (cit. 14.4.2021). Dostupné z: <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/typizace-povetrnostnich-situaci>
- ČMeS (online). Česká meteorologická společnost: Elektronický meteorologický slovník výkladový a terminologický (eMS). (cit. 26.04.2021). Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz>
- Světové mapy klasifikace klimatu Köppen-Geiger (online). (cit 15.6.2023).
Dostupné z: <https://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/>
- WWLLN (online): World Wide Lightning Location Network. (cit. 7.7.2023)
dostupné z: <https://wwlln.net/>

Seznam obrázků

- 1 - Rozdíl radiofrekvenčního záření při CG blesku a CC blesku.
- 2 - Schematické znázornění určení polohy blesku metodou DF.
- 3 - Schematické znázornění určení polohy blesku metodou TAO.
- 4 - Blesková aktivita na Zemi od 11:40 do 12:40 UTC dne 6.6.2023.

- 5 - Kumulovaná blesková aktivita na Zemi za den 6.7.2023.
- 6 - Blesková aktivita na Zemi 6.6.2023 mezi 16:37 a 18:37 UTC.
- 7 - Blesková aktivita nad střední Evropou 20.5.2022 mezi 17:00 a 19:00 UTC.
- 8 - Blesková aktivita nad Francií 9.7.2023 mezi 8:00 – 10:00 UTC.
- 9 - Poloha zájmové oblasti ve střední Evropě.
- 10 - Poloha stanic detekčních sítí WWLLN, Blitzortung a EUCLID ve střední Evropě.
- 11 - Prostorové rozložení bleskové aktivity ve sledovaném území 3.8.2019.
- 12 - Prostorové rozložení bleskové aktivity ve sledovaném území 11.8.2019.
- 13 - Prostorové rozložení bleskové aktivity ve sledovaném území 29.6.2021.
- 14 - Počet bleskových výbojů ze sítě WWLLN na ploše 10 km² pro sledované roky.
- 15 - Počet bleskových výbojů ze sítě Blitzortung na ploše 1 km² pro dostupná data v uvedených letech.
- 16 - Počet bleskových výbojů ze sítě EUCLID na ploše 1 km² pro dostupná data v uvedených letech.
- 17 - Počet bleskových výbojů na ploše 1 km² pro sítě Blitzortung a EUCLID, resp. na ploše 10 km² pro síť WWLLN, pro dostupná data z let 2019 – 2021.

Seznam grafů

- 1 - Denní chod bleskové aktivity (v %) v zájmovém území.
- 2 - Měsíční sumy počtu bleskových výbojů za období 2015 – 2021.
- 3 - Procentuální zastoupení bleskových výbojů nad jednotlivými typy krajinného pokryvu.
- 4 - Procentuální zastoupení synoptických typů na celkovém počtu bleskových výbojů.

Seznam tabulek

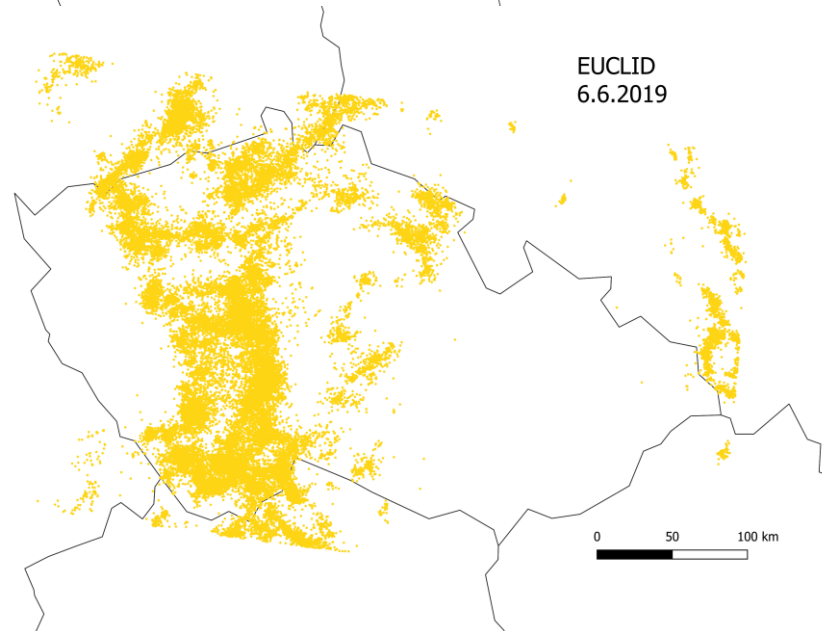
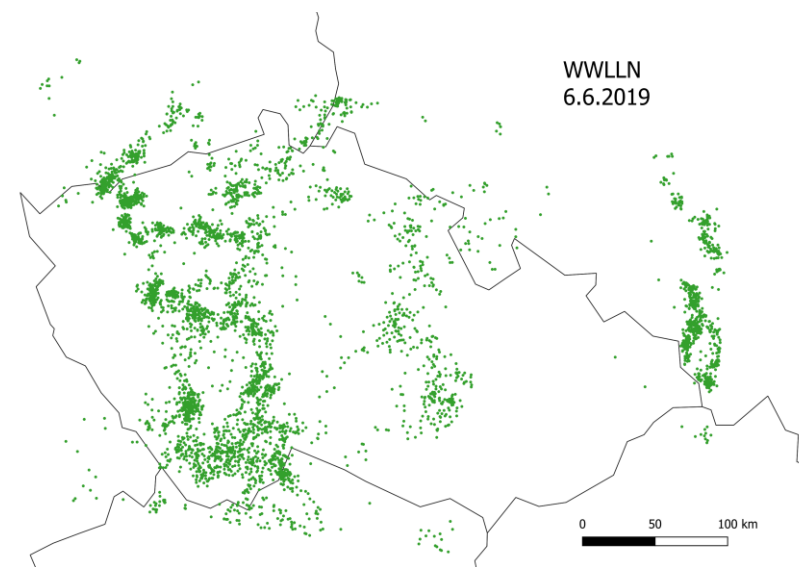
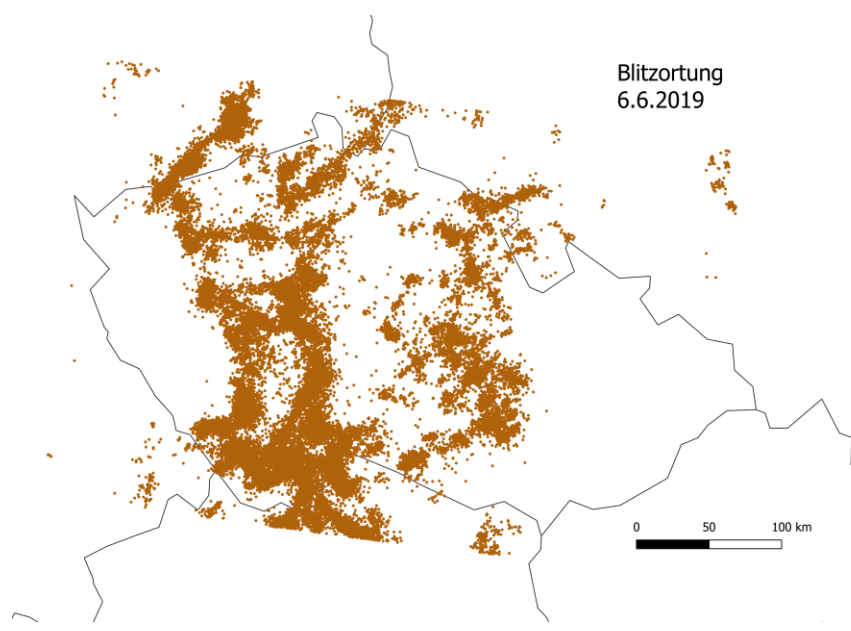
- 1 - Seznam dní a počtu bleskových výbojů pro data bleskové aktivity ze sítě EUCLID (BLIDS) použitých v této práci.
- 2 - Seznam zkratek povětrnostních situací.
- 3 - Seznam dnů pro porovnání prostorového rozložení bleskové aktivity.
- 4 - Procentuální zastoupení typů krajinného pokryvu v zájmovém území.
- 5 - Procentuální zastoupení typů povětrnostních situací v letních měsících let 2019 - 2021.

Seznam příloh

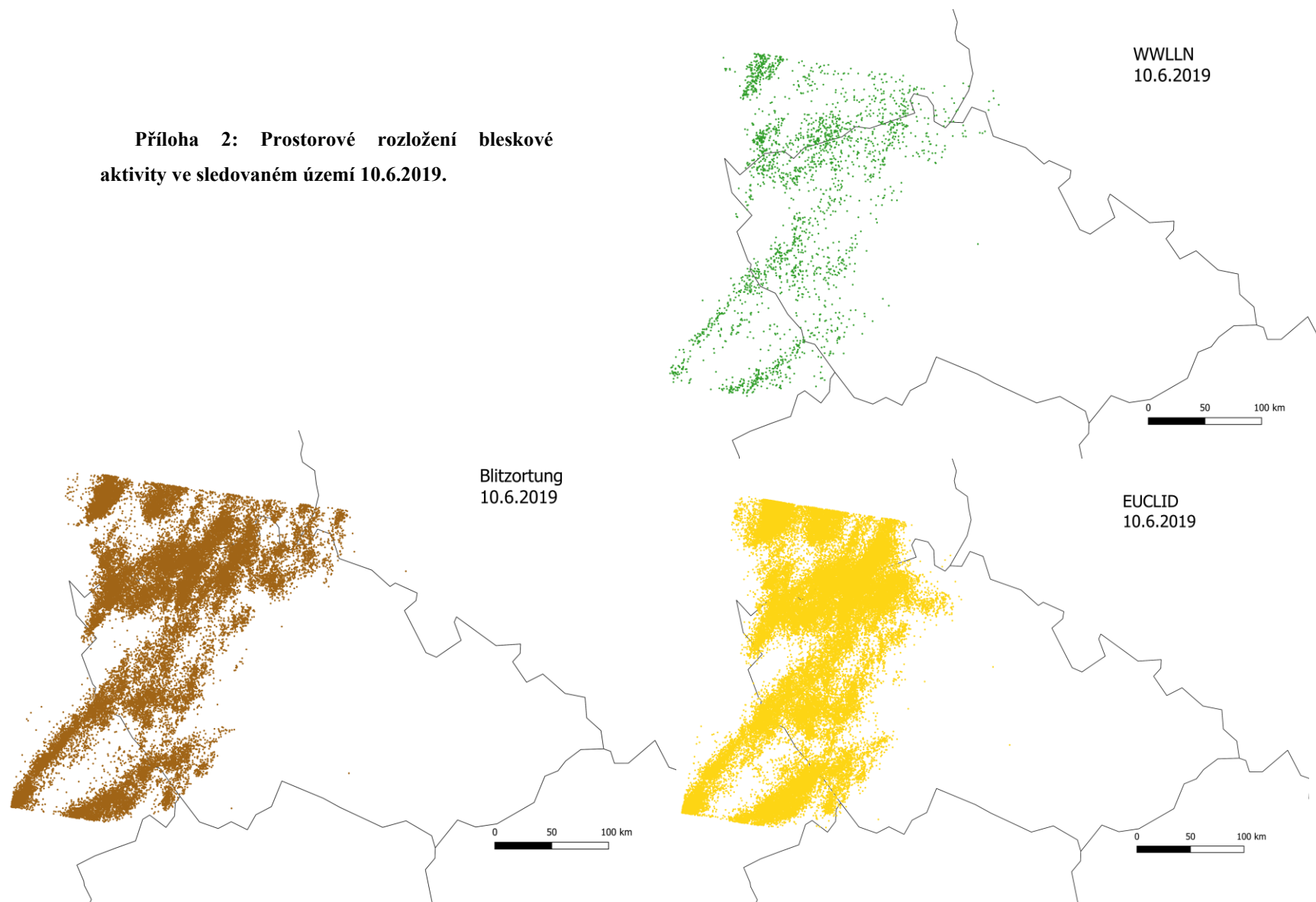
- 1 - Prostorové rozložení bleskové aktivity ve sledovaném území 6.6.2019.
- 2 - Prostorové rozložení bleskové aktivity ve sledovaném území 10.6.2019.
- 3 - Prostorové rozložení bleskové aktivity ve sledovaném území 12.6.2019.
- 4 - Prostorové rozložení bleskové aktivity ve sledovaném území 20.6.2019.
- 5 - Prostorové rozložení bleskové aktivity ve sledovaném území 29.7.2019.
- 6 - Prostorové rozložení bleskové aktivity ve sledovaném území 31.7.2019.
- 7 - Prostorové rozložení bleskové aktivity ve sledovaném území 2.8.2019.
- 8 - Prostorové rozložení bleskové aktivity ve sledovaném území 4.8.2019.
- 9 - Prostorové rozložení bleskové aktivity ve sledovaném území 7.8.2019.
- 10 - Prostorové rozložení bleskové aktivity ve sledovaném území 12.8.2019.

- 11 - Prostorové rozložení bleskové aktivity ve sledovaném území 27.8.2019.
- 12 - Prostorové rozložení bleskové aktivity ve sledovaném území 29.8.2019.
- 13 - Prostorové rozložení bleskové aktivity ve sledovaném území 4.6.2020.
- 14 - Prostorové rozložení bleskové aktivity ve sledovaném území 15.8.2020.
- 15 - Prostorové rozložení bleskové aktivity ve sledovaném území 28.8.2020.
- 16 - Prostorové rozložení bleskové aktivity ve sledovaném území 23.6.2021.
- 17 - Prostorové rozložení bleskové aktivity ve sledovaném území 24.6.2021.

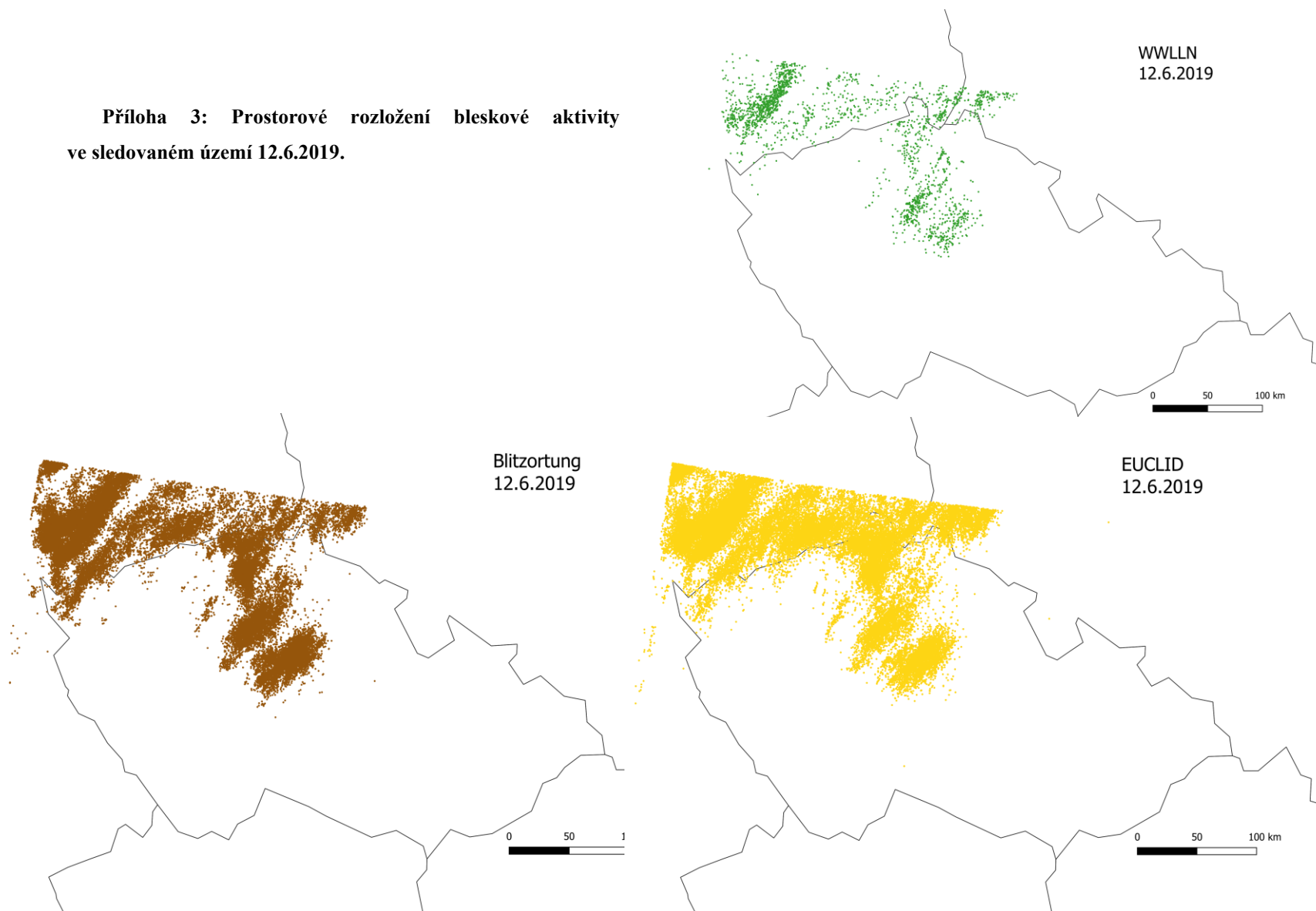
**Příloha 1: Prostorové rozložení bleskové
aktivity ve sledovaném území 6.6.2019.**



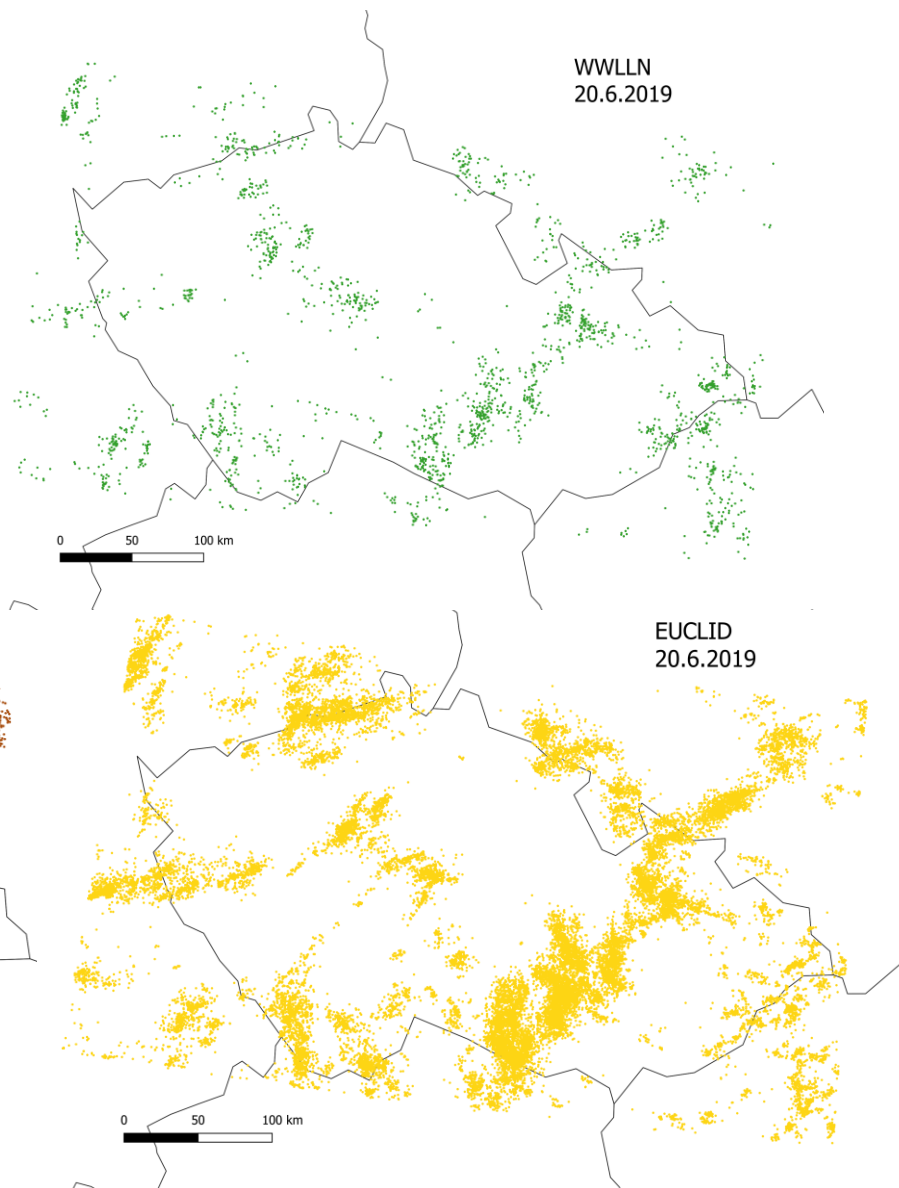
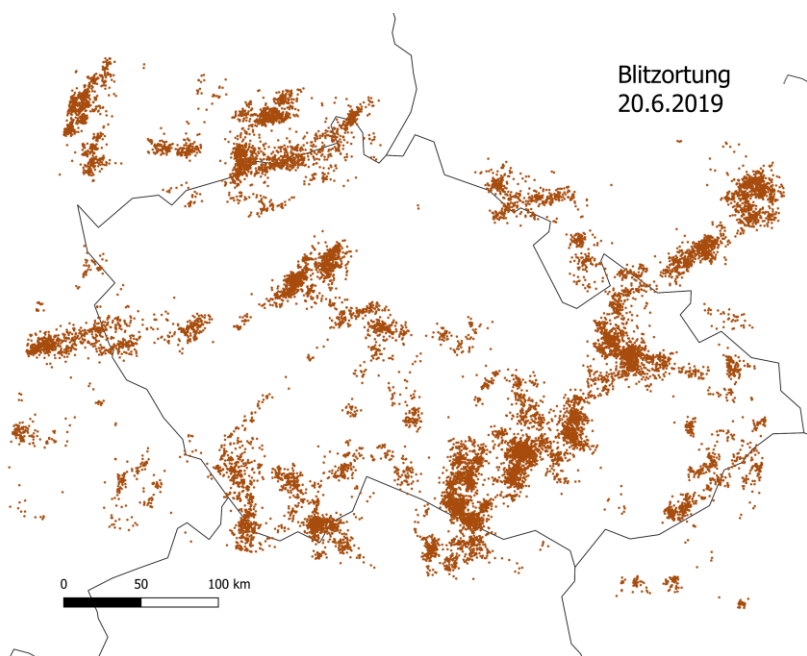
**Příloha 2: Prostorové rozložení bleskové
aktivity ve sledovaném území 10.6.2019.**



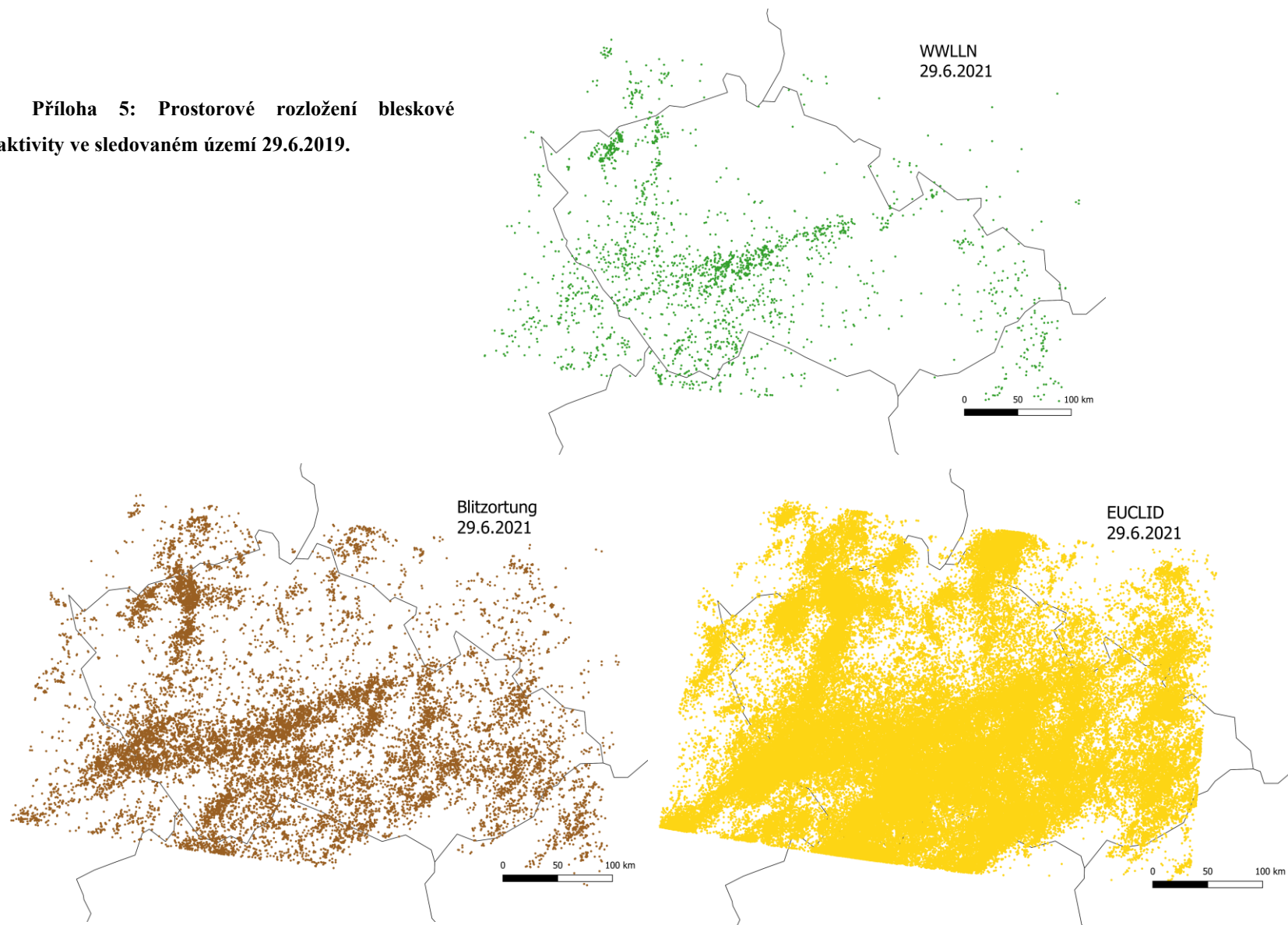
**Příloha 3: Prostorové rozložení bleskové aktivity
ve sledovaném území 12.6.2019.**



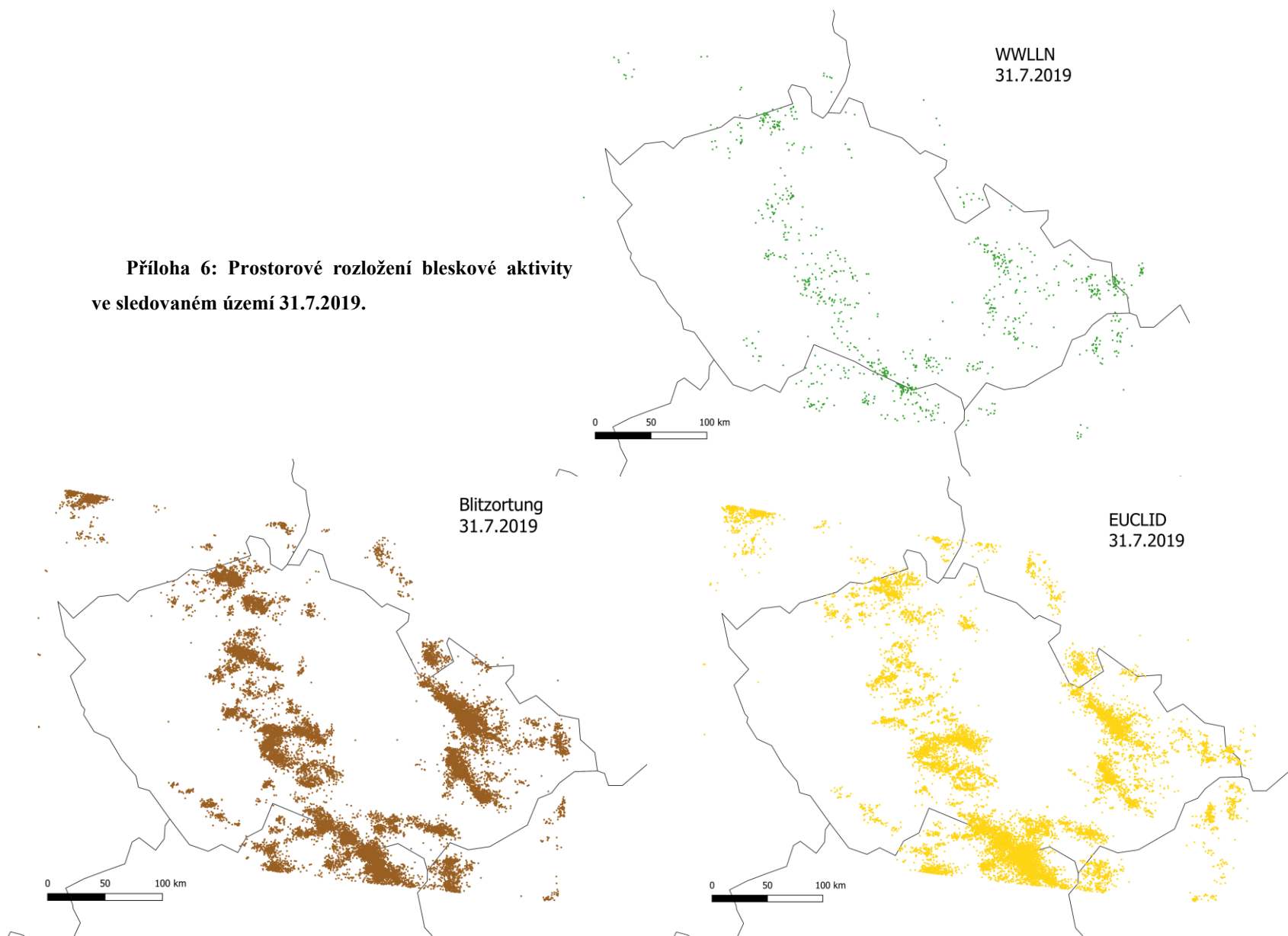
**Příloha 4: Prostorové rozložení bleskové aktivity
ve sledovaném území 20.6.2019.**



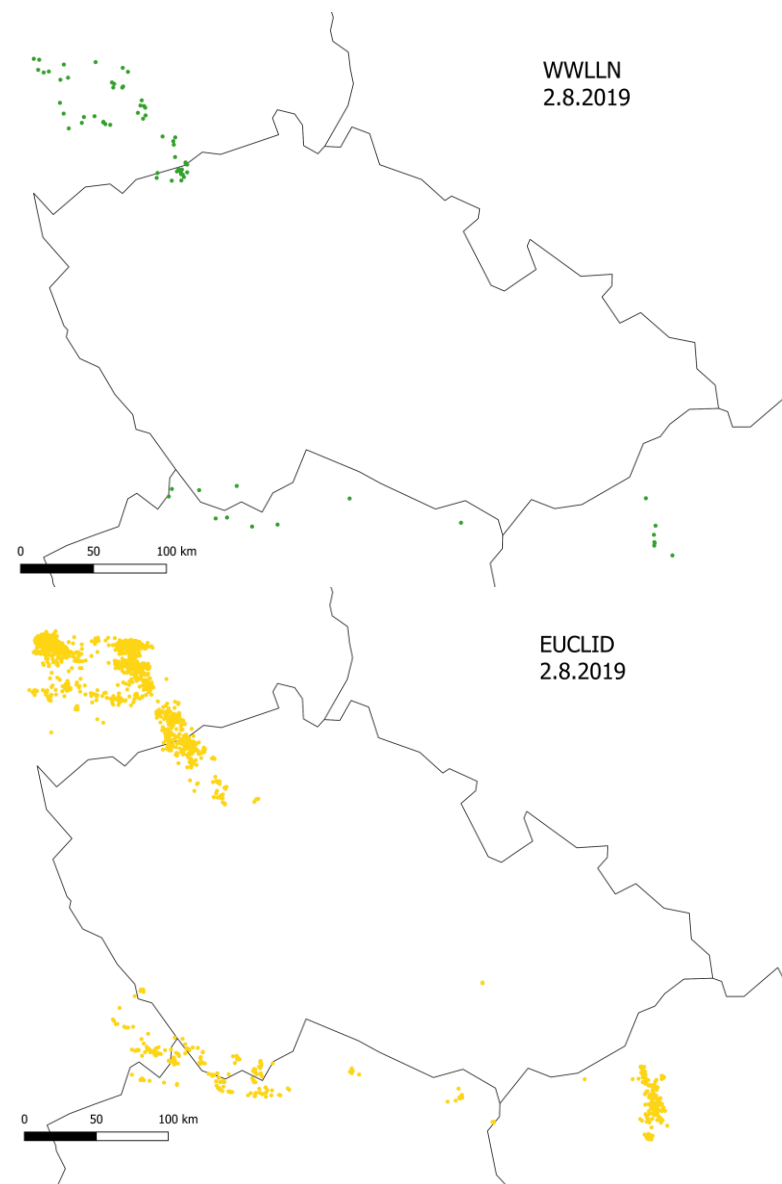
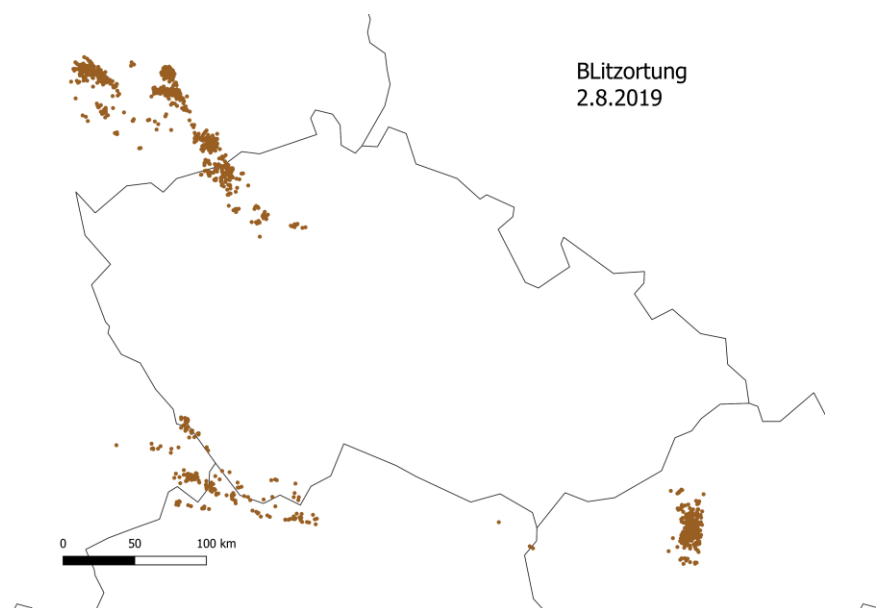
**Příloha 5: Prostorové rozložení bleskové
aktivity ve sledovaném území 29.6.2019.**



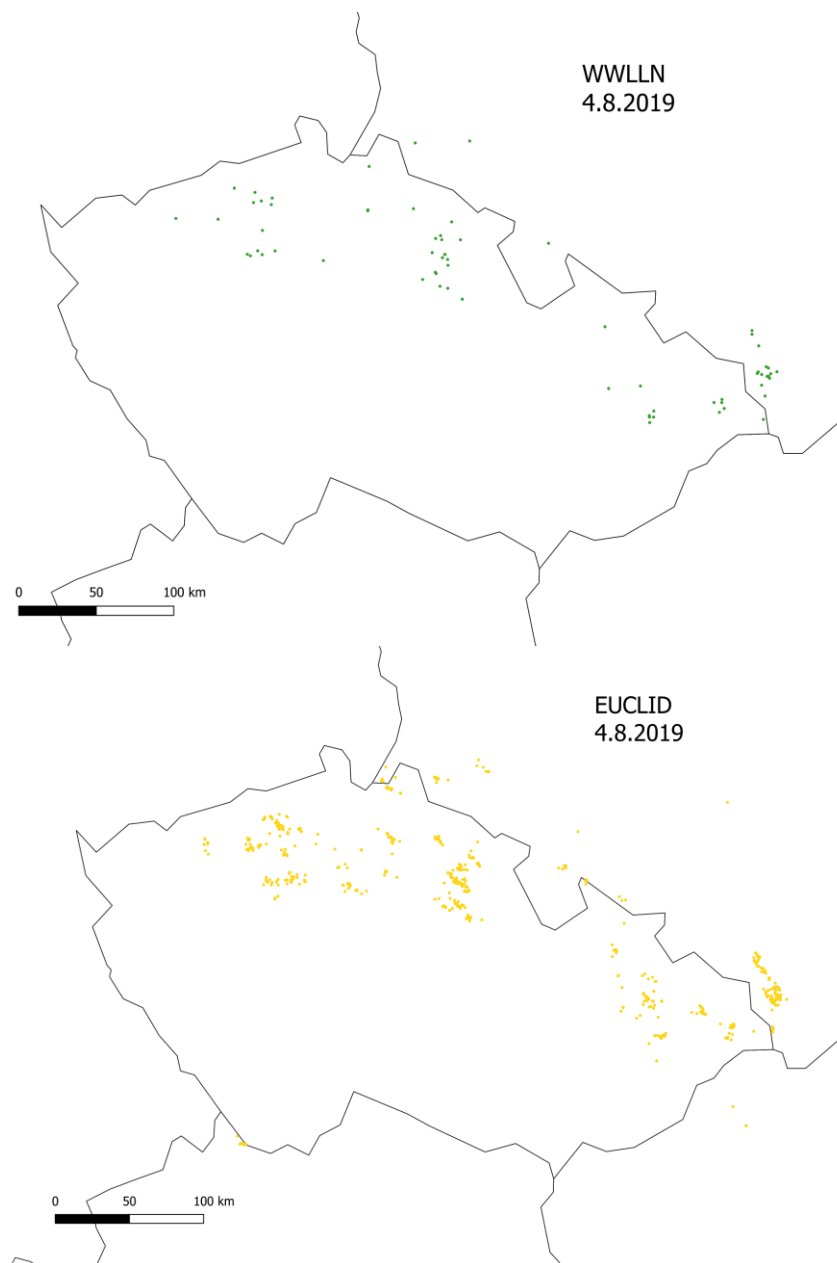
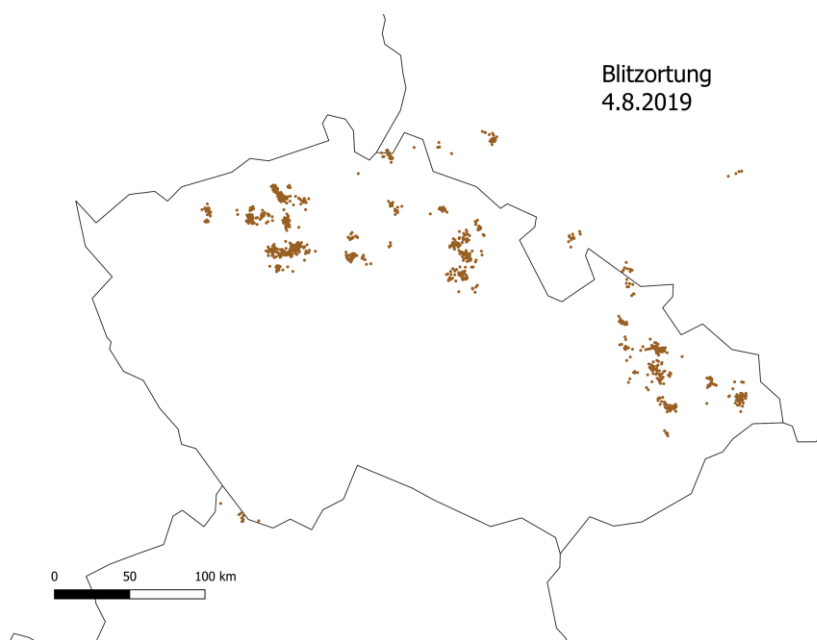
**Příloha 6: Prostorové rozložení bleskové aktivity
ve sledovaném území 31.7.2019.**



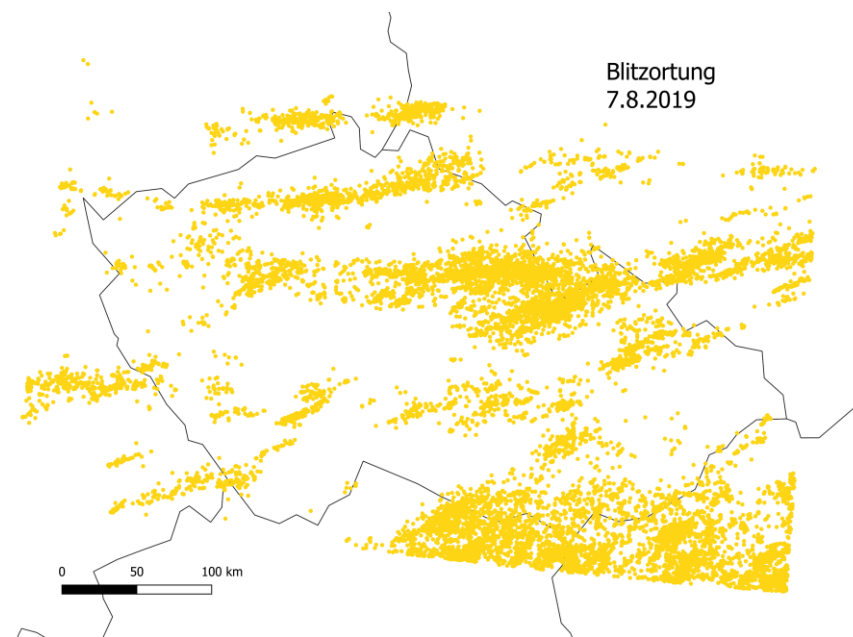
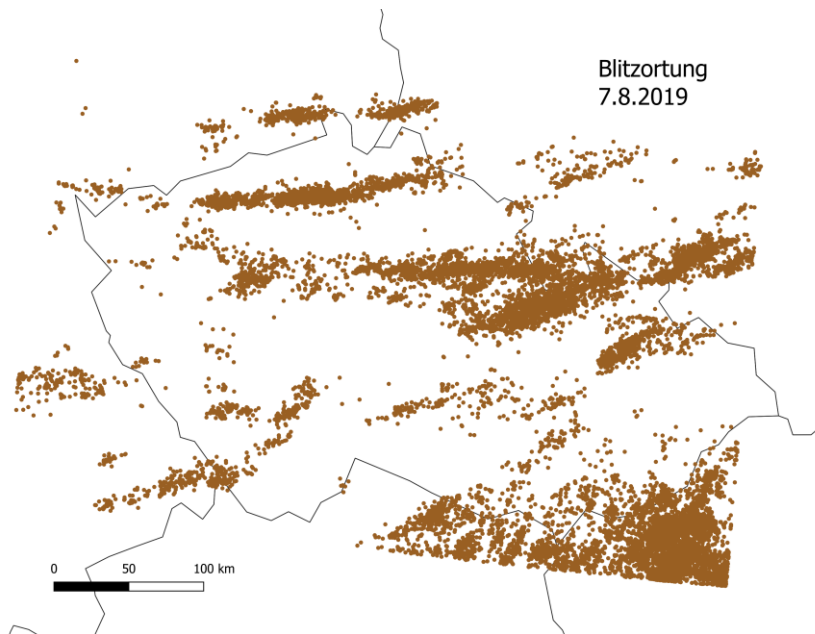
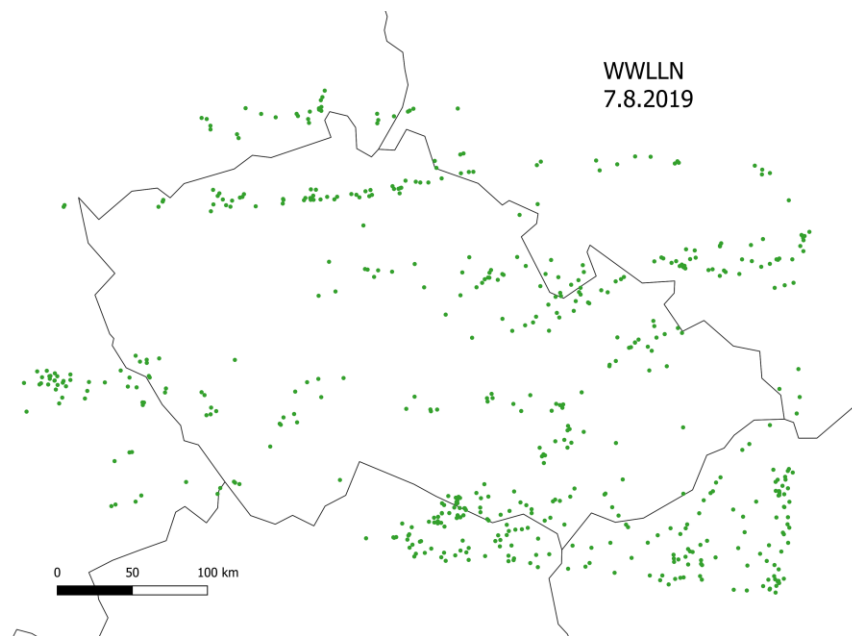
**Příloha 7: Prostorové rozložení bleskové aktivity
ve sledovaném území 2.8.2019.**



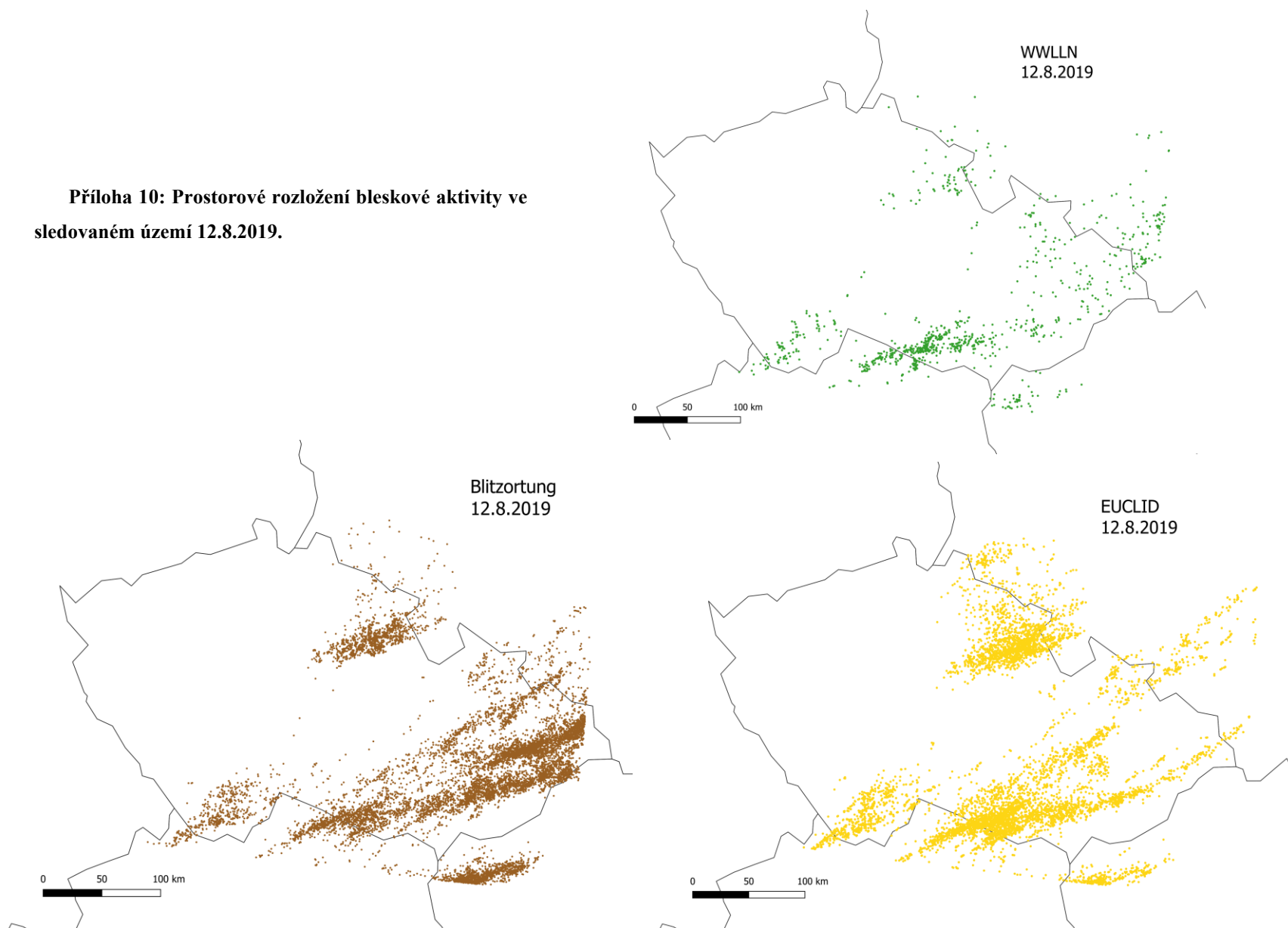
**Příloha 8: Prostorové rozložení bleskové aktivity
ve sledovaném území 4.8.2019.**



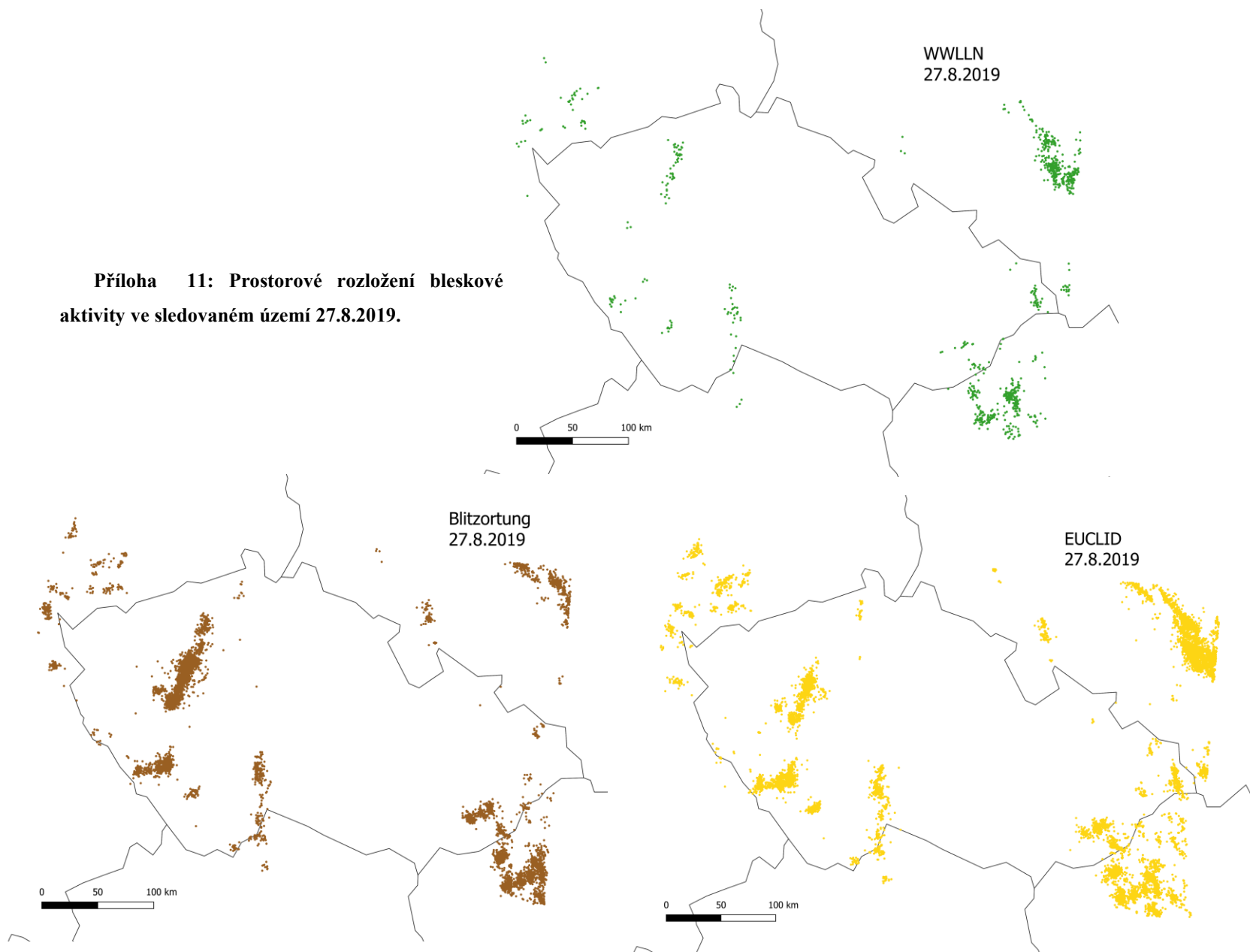
Příloha 9: Prostorové rozložení bleskové aktivity ve sledovaném území 7.8.2019.



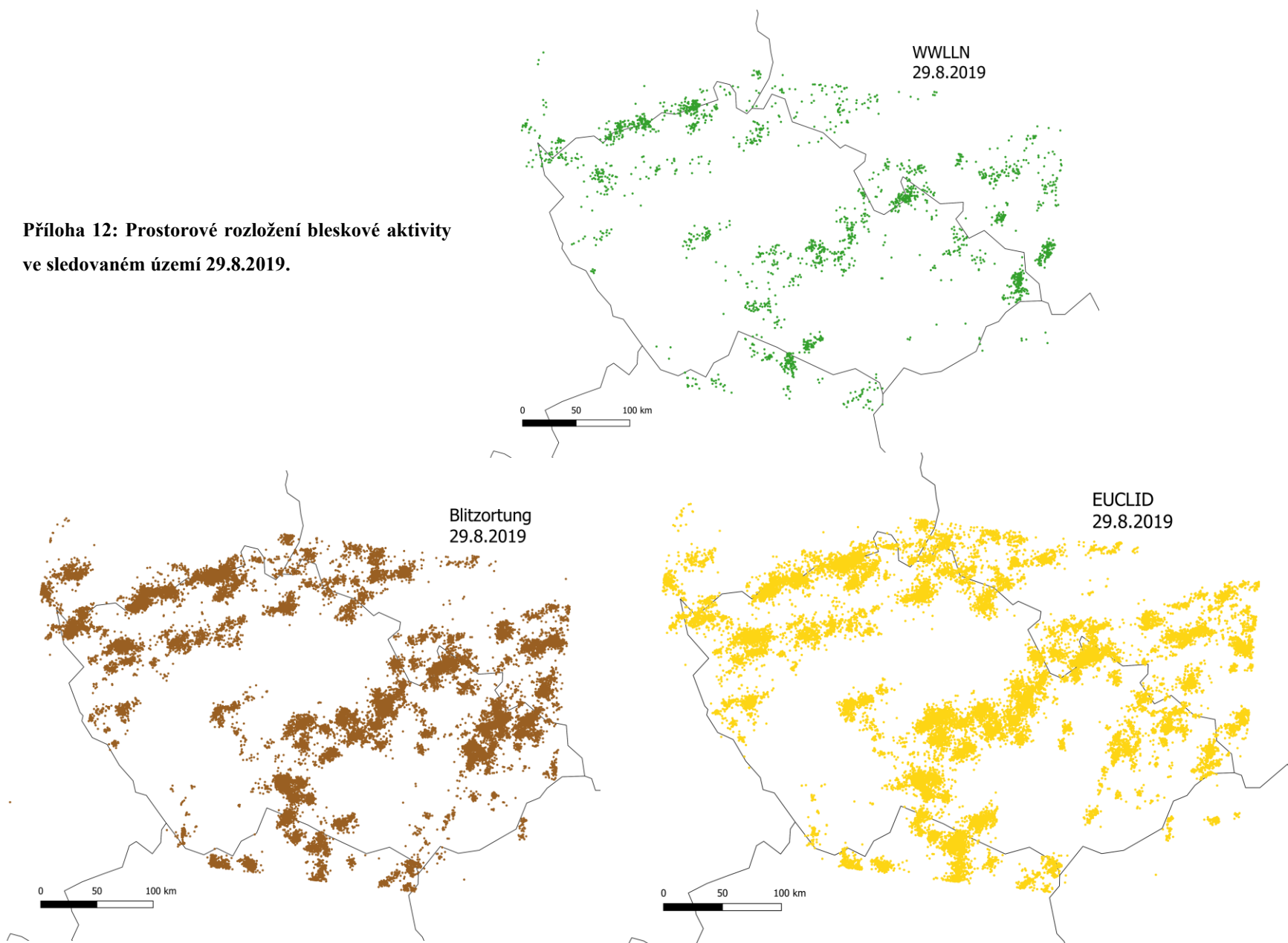
Příloha 10: Prostorové rozložení bleskové aktivity ve sledovaném území 12.8.2019.



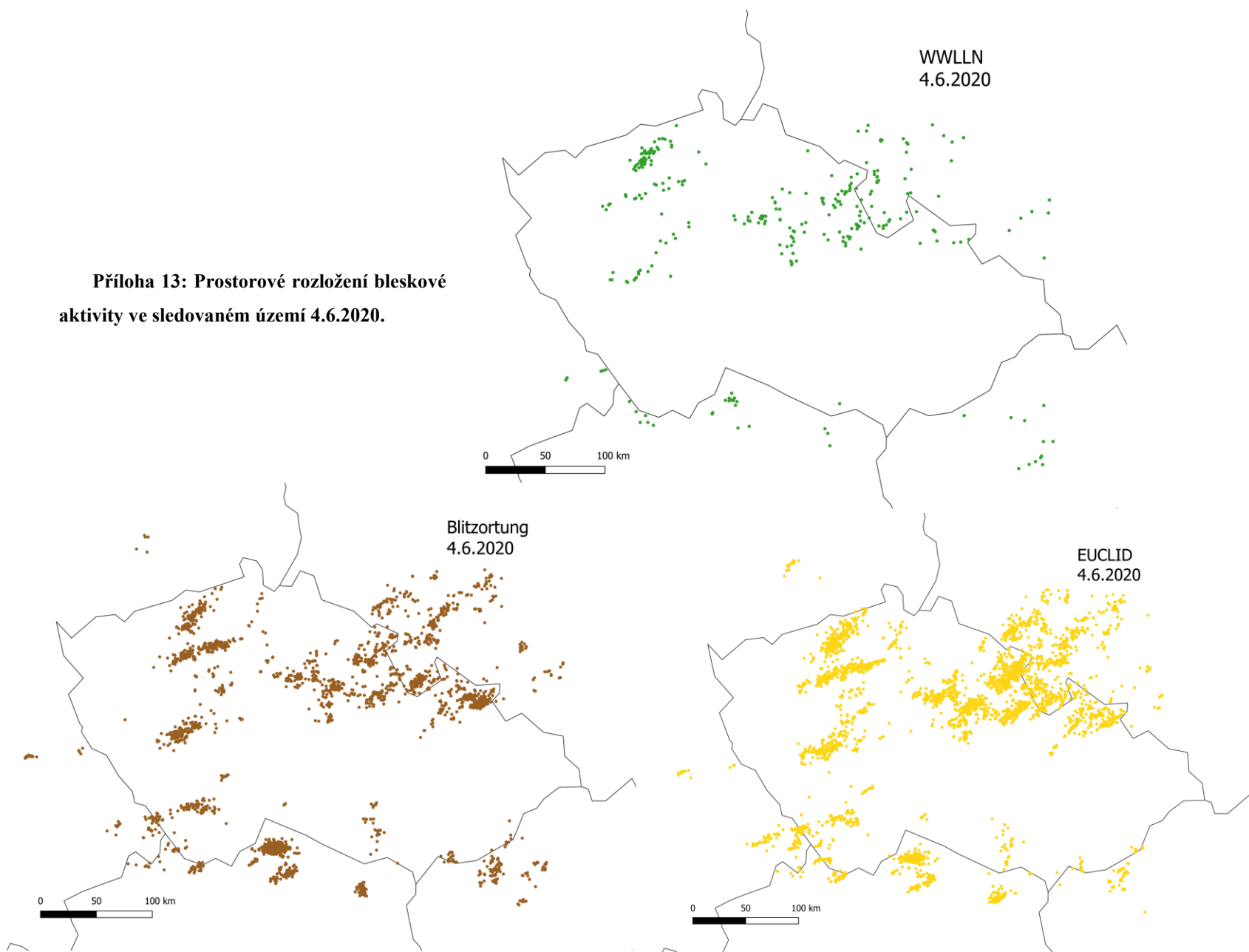
**Příloha 11: Prostorové rozložení bleskové
aktivity ve sledovaném území 27.8.2019.**



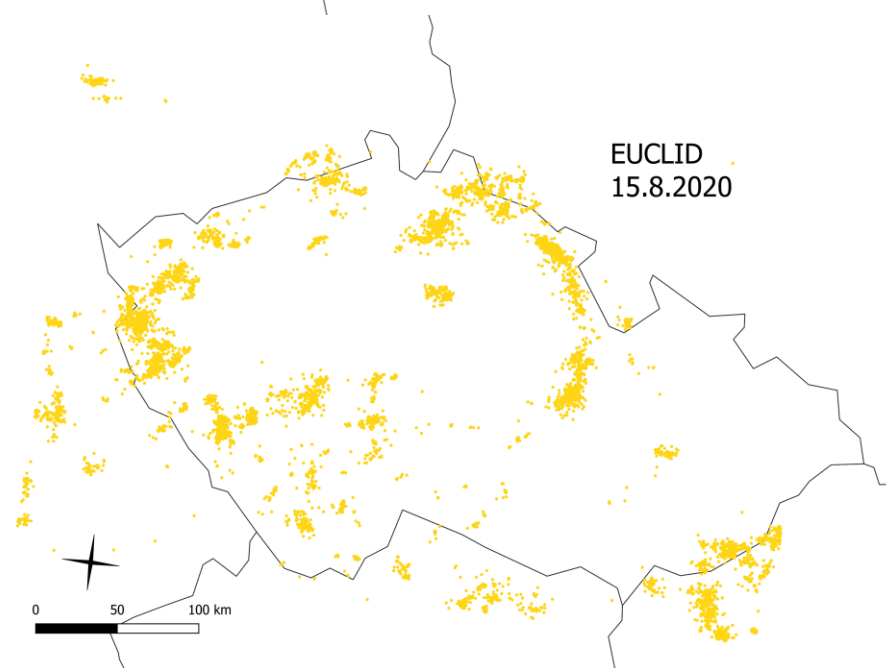
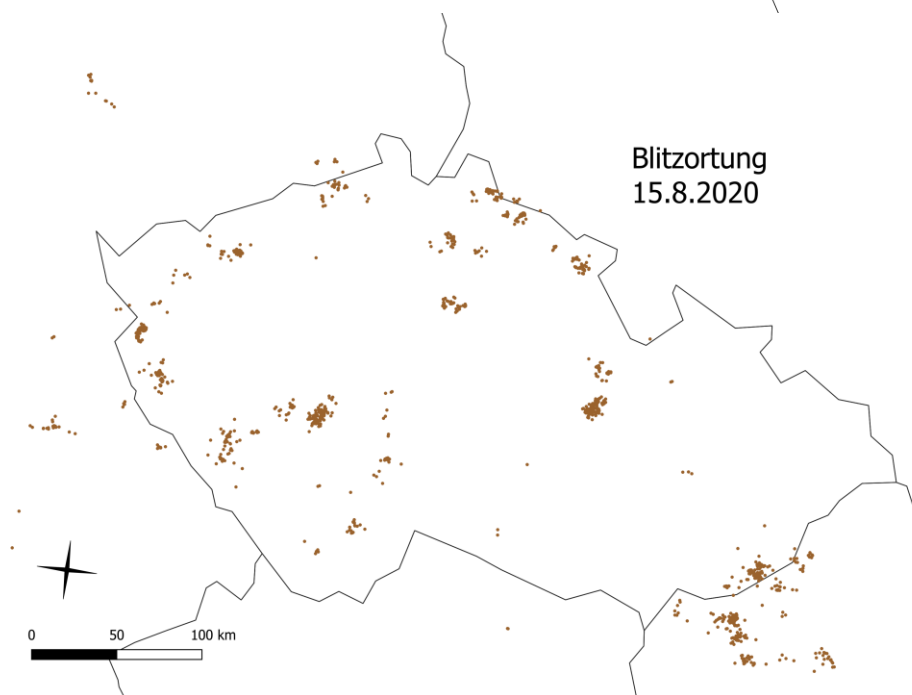
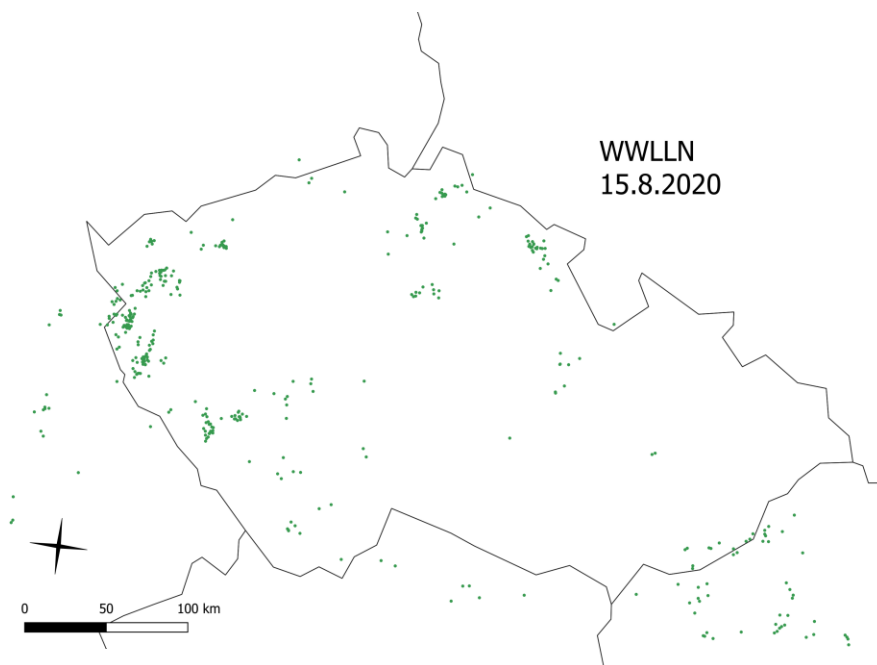
**Příloha 12: Prostorové rozložení bleskové aktivity
ve sledovaném území 29.8.2019.**



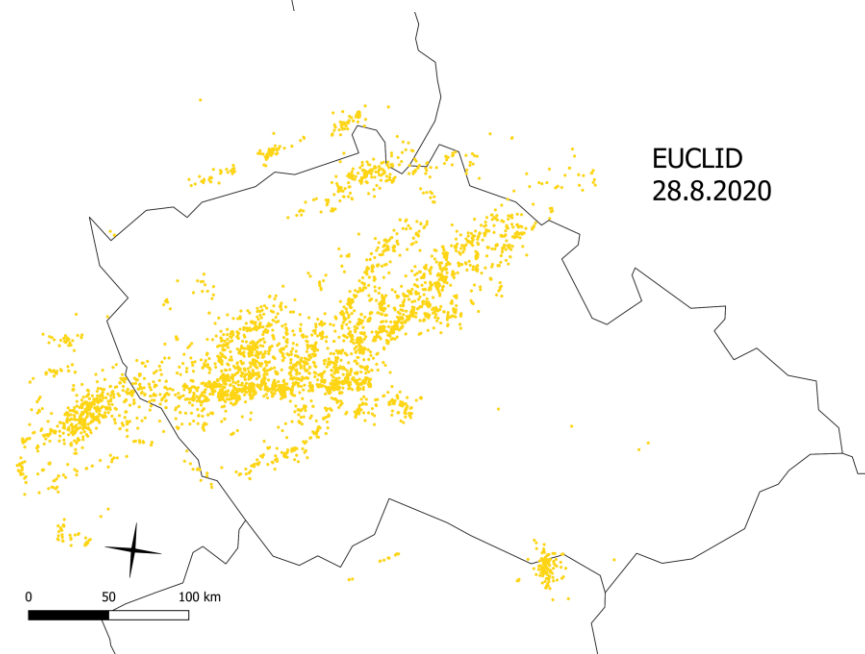
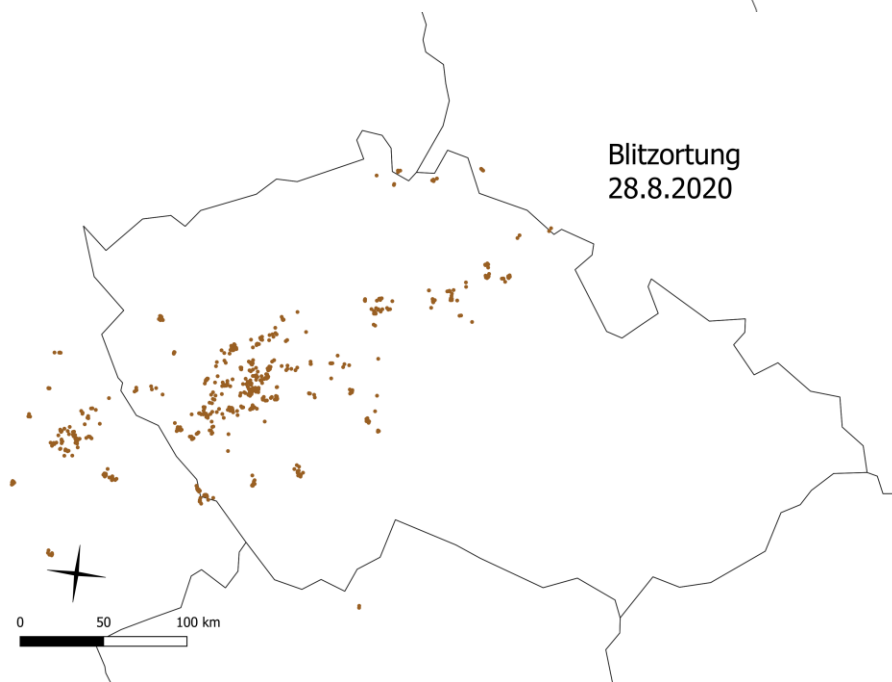
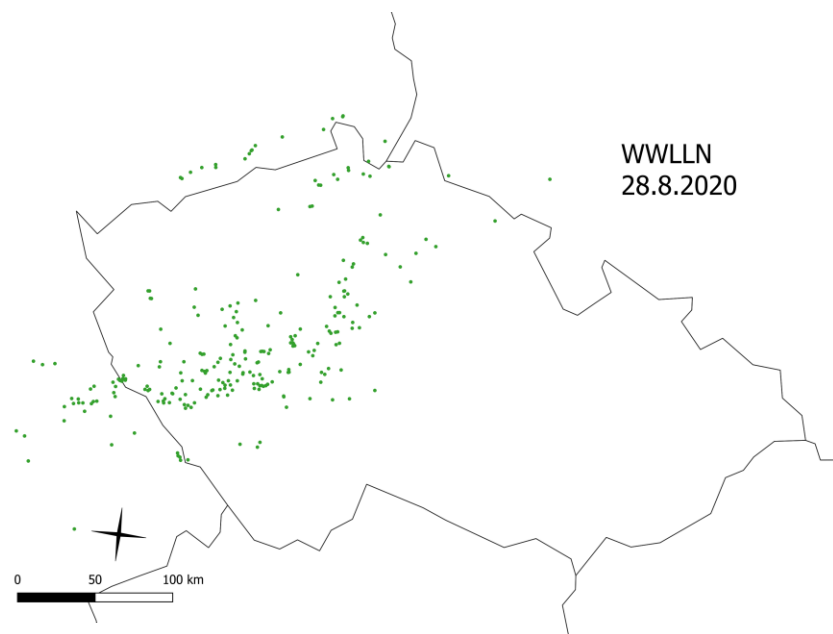
**Příloha 13: Prostorové rozložení bleskové
aktivity ve sledovaném území 4.6.2020.**



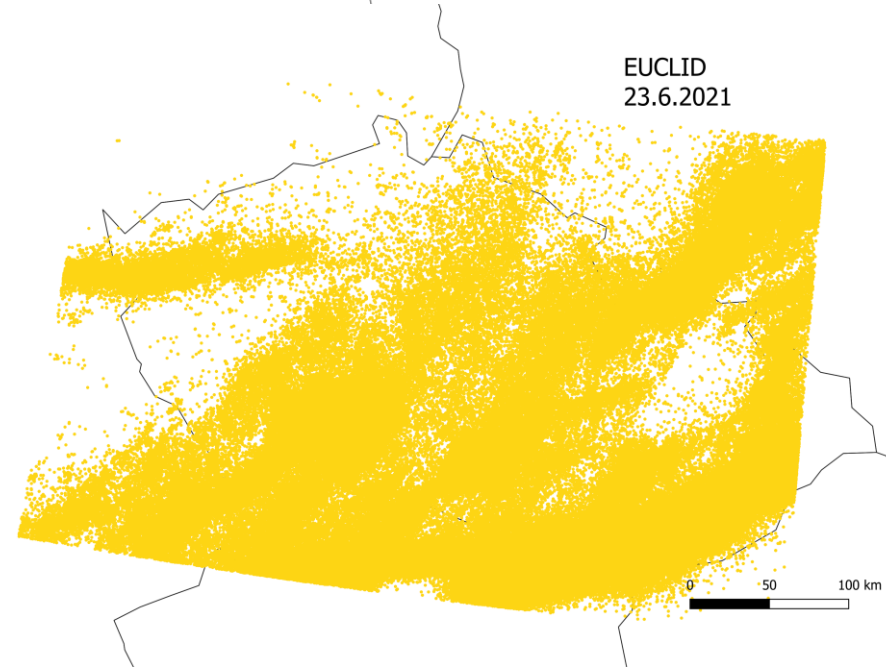
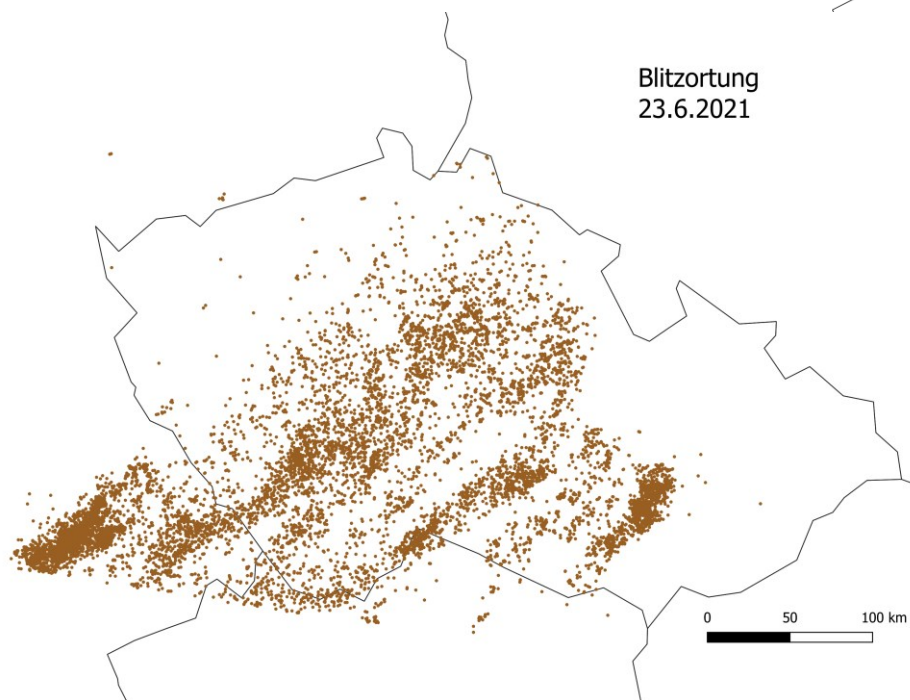
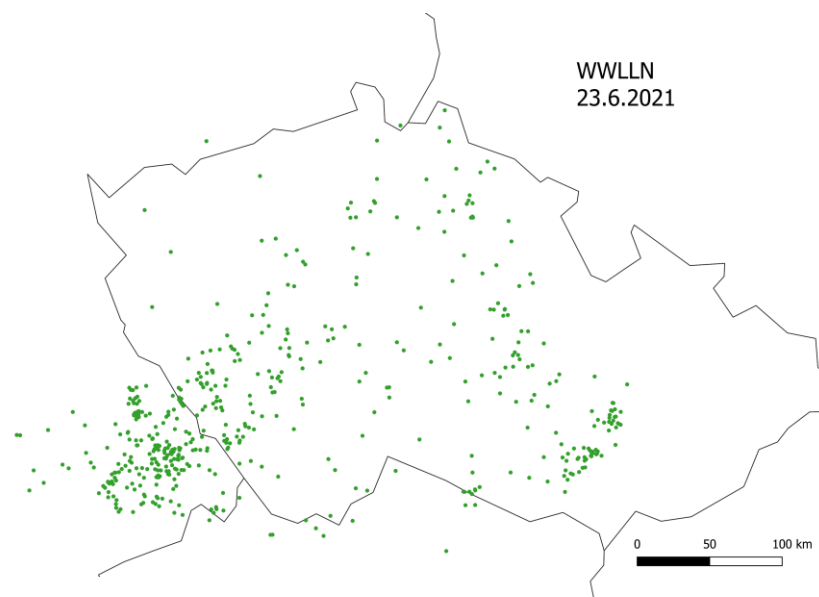
**Příloha 14: Prostorové rozložení
bleskové aktivity ve sledovaném území
15.8.2020.**



**Příloha 15: Prostorové rozložení bleskové
aktivity ve sledovaném území 28.8.2020.**



**Příloha 16: Prostorové rozložení bleskové aktivity
ve sledovaném území 23.6.2021.**



Příloha 17: Prostorové rozložení bleskové aktivity ve sledovaném území 23.6.2021.

