

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroekologie a rostlinné produkce



**Fakulta agrobiologie,
potravinových a přírodních zdrojů**

**Analýza doby trvání slunečního svitu na území ČR a
vyhodnocení výsledků z hlediska výroby solární energie**

Diplomová práce

Bc. Lukáš Horák

Zemědělství a rozvoj venkova

doc. RNDr. Petr Pišoft, Ph.D.

© 2023 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci „Analýza doby trvání slunečního svitu na území ČR a vyhodnocení výsledků z hlediska výroby solární energie“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou v práci řádně citovány a jsou uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 20. března 2023

Poděkování

Vyjadřuji poděkování předně svému synovi, který mi za nemalého přispění rodiny umožnil vypracovat tuto diplomovou práci. Rád bych touto cestou také poděkoval vedoucímu práce doc. RNDr. Petru Pišoftovi, Ph.D. a Mgr. Marii Musiolkové, Ph.D., kteří mi poskytovali cenné odborné rady a konzultace.

Analýza doby trvání slunečního svitu na území ČR a vyhodnocení výsledků z hlediska výroby solární energie

Souhrn

Diplomová práce se zabývá analýzou doby trvání slunečního svitu na území ČR a vyhodnocení získaných výsledků z hlediska výroby solární energie. V teoretické části práce jsou shrnuty základní údaje o Slunci, dopadu elektromagnetického záření na povrch Země, principu výroby solární energie až k aktuálním trendům, možnostem, výhodám a nevýhodám solární energie. Praktická část se věnuje informacím o době trvání slunečního svitu, které byly získány pro všechny dostupné stanice z databáze Českého hydrometeorologického ústavu. Vyhodnocení dat probíhalo pro každý kraj jednotlivě, a to za období 30 let od roku 1991.

Klíčová slova: sluneční záření, délka slunečního svitu, solární energie, fotovoltaický panel, obnovitelná energie

Analysis of the duration of sunshine in the Czech Republic and evaluation of results in terms of solar energy production

Summary

This diploma thesis deals with analysing of the sunshine duration in the Czech Republic and evaluating the results from the point of view of solar energy production. The theoretical part of the thesis summarizes basic information about the Sun, the impact of electromagnetic radiation on the Earth's surface, the principle of solar energy production, to current trends, possibilities, advantages, and disadvantages of solar energy. The practical part of the thesis is focused on actual data on the sunshine duration obtained from all available stations in the database of the Czech Hydrometeorological Institute. Data evaluation was made for each region individually and over 30 years since 1991.

Keywords: solar radiation, sunshine duration, solar energy, photovoltaic panel, renewable energy

Obsah

1	Úvod.....	8
2	Vědecká hypotéza a cíle práce	9
3	Literární rešerše.....	10
3.1	Slunce a sluneční záření	10
3.1.1	Slunce	10
3.1.2	Elektromagnetické pole a záření	11
3.1.3	Sluneční energie.....	13
3.1.4	Sluneční svit.....	20
3.2	Fotovoltaika	24
3.2.1	Princip fotovoltaiky	24
3.2.2	Fotovoltaický článek.....	26
3.2.3	Fotovoltaický panel	32
3.2.4	Fotovoltaické systémy	34
3.2.5	Trendy	36
4	Metodika	42
4.1	Výběr stanic	42
4.2	Zpracování dat.....	43
4.2.1	Korekce dat.....	43
4.2.2	Zobrazení dat	43
4.2.3	Analýza závislostí	44
5	Výsledky	46
5.1	Průběh slunečního svitu za 30 let.....	46
5.1.1	Průběh SSV za 30 let na jednotlivých stanicích	46
5.1.2	Průběh SSV za 30 let v jednotlivých krajích	53
5.1.3	Analýza závislostí úhrnu SSV za 30 let na jednotlivých stanicích.....	56
5.1.4	Analýza závislostí SSV za 30 let v jednotlivých krajích a ČR.....	57
5.2	Závislost slunečního svitu na zeměpisné šířce a nadmořské výšce	57
5.2.1	Závislost SSV na LAT.....	58
5.2.2	Závislost SSV na ALT.....	58
5.2.3	Závislost SSV na LAT + ALT.....	59
6	Diskuse.....	61
6.1	Kvalita získaných dat SSV.....	61
6.2	Použití SSV pro solární energii.....	61
6.3	Srovnání s podobnými pracemi.....	62
7	Závěr	63

8 Literatura.....	64
9 Seznam použitých obrázků, tabulek a grafů	71
10 Seznam použitých zkratk a symbolů	74
11 Seznam příloh.....	76

1 Úvod

Neustálý celosvětový nárůst spotřeby energie můžeme považovat za výzvu 21. století i proto, že v něm dojde k vyčerpání většiny neobnovitelných zdrojů energie v podobě uhlí, ropy a zemního plynu. V podmínkách ČR můžeme obnovitelnou energii považovat za různé formy energie slunečního záření. Vysoká počáteční investice do solárních, vodních a větrných elektráren je vykoupena pozdější nízkou produkční cenou energie (IRENA 2019).

Výroba elektrické energie ze solárních panelů má své výhody i nevýhody. Výkon solárních elektráren je přímo ovlivněn oblačností, znečištěním atmosféry, měnící se polohou Slunce na obloze, ale také zastíněním od staveb, rostlin a terénu. Pro zvolení vhodného místa k výstavbě solární elektrárny je mezi důležité parametry řazena intenzita globálního záření (Wald 2021).

Energii dopadajícího slunečního záření na panel solární elektrárny lze nepřímo charakterizovat dobou trvání slunečního svitu. Toto využití doby trvání slunečního svitu v hodinách se nabízí především proto, že je hlavní součástí měření na většině meteorologických stanic v ČR (Pokorný & Vaníček 2007). Globální záření je sledováno na „pouhých“ 19 stanicích (Vaníček, et al. 2015).

V teoretické části literární rešerše práce shrnuje ve dvou hlavních podkapitolách základní informace o slunečním záření a fotovoltaice. V první podkapitole Slunce a sluneční záření jsou předložena základní fakta o Slunci a důležitých vlastnostech slunečního záření. Také je zde shrnuta problematika měření slunečního svitu na území ČR. Druhá podkapitola Fotovoltaika se od popsání funkčnosti fotovoltaických článků dostává přes typy těchto článků a jejich řazení do panelů až k funkčnosti celých fotovoltaických systémů. Důraz je kladen na popsání výhod a nevýhod popsaných řešení. Následně popisuje aktuální trendy a nastiňuje možný budoucí vývoj ve fotovoltaice.

Metodika práce se zabývá výběrem stanic z databáze Českého hydrometeorologického ústavu pro všechny stanic s uceleným datasetem studovaného meteorologického parametru za období 1991–2020 včetně korekce těchto získaných dat. Také definuje využití základní teoretické předpoklady pro analýzu závislostí studovaného parametru.

Výsledné průběhy slunečního svitu jsou zpracovány a popsány pro jednotlivé stanice rozdělené po krajích. Předložena je analýza závislosti studovaného parametru pro stanice, kraje i celou ČR. Došlo k porovnání výsledků jednotlivých krajů, ze kterých jasně vyplývá vhodnost umístění solárních elektráren. Zkoumání byla také podrobena závislost slunečního svitu na zeměpisné šířce a nadmořské výšce včetně kombinované závislosti na obou zmíněných parametrech.

2 Vědecká hypotéza a cíle práce

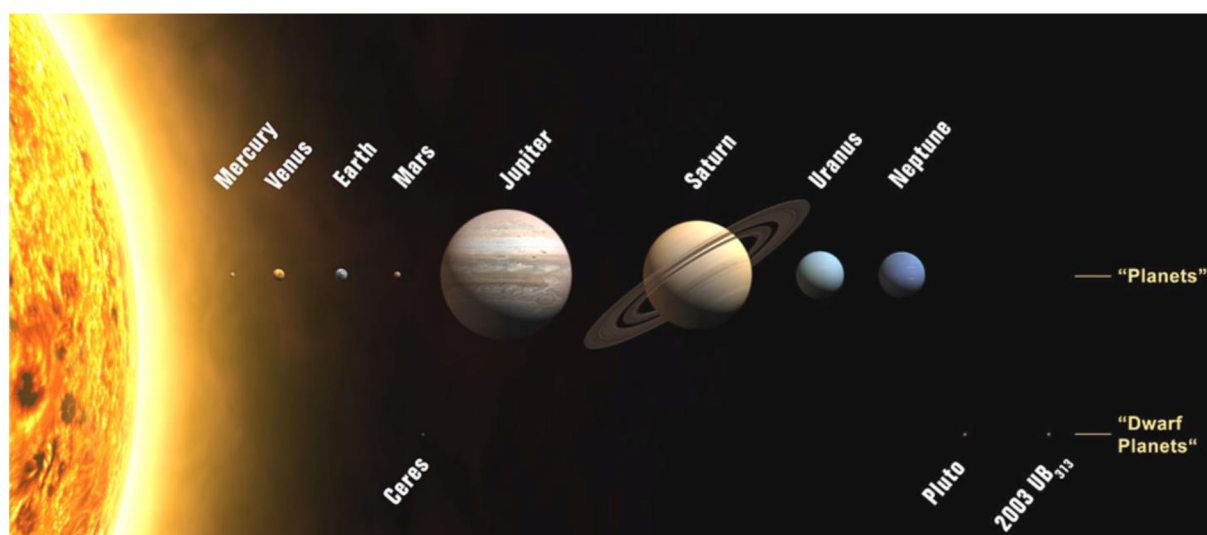
Cílem této diplomové práce je analyzovat dobu trvání slunečního svitu v jednotlivých krajích České republiky a na základě toho diskutovat, v jakých částech ČR je výroba solární energie výhodná a v jakých částech ne. Vyhodnocení probíhá pro každý kraj ČR zvlášť i s ohledem na nadmořskou výšku studovaných lokalit. Cíl práce je podpořen ověřením hypotézy: Výroba solární energie je nejvýhodnější v Jihomoravském kraji.

3 Literární rešerše

3.1 Slunce a sluneční záření

3.1.1 Slunce

Celá naše sluneční soustava vznikla asi před 4,6 mld. let ze shluku rotujícího prachoplyného mraku. Rotace zrychlovala odstředivou silou, a tak došlo ke zploštění do protoplanetárního disku. Slunce se utvořilo uprostřed a jeho hmotnost tvoří 99,87 % hmotnosti celé sluneční soustavy. Zbytek sluneční soustavy je tvořen planetami (Obrázek 1). Průměr Slunce je 1,4 mil. km a v rámci celého vesmíru se jedná spíše o menší hvězdu. Slunce se skládá ze 71 % z vodíku a 27 % z helia, zbylá dvě procenta podle spektrální analýzy tvoří většina chemických prvků známých na Zemi. Teplota v jádru Slunce dosahuje 15 mil. K a na povrchu 5,7 tis. K (Kerrod 2000).



Obrázek 1: Sluneční soustava (Štokr 2023). U planet je zachováno měřítko, vzdálenosti jsou ale upravené.

Dostatečná teplota i tlak v jádru Slunce umožňuje vznik termonukleárních jaderných reakcí, při kterých se vodíková jádra spojují a vznikají heliová jádra. Při této víceetapové přeměně dochází k uvolňování energie v podobě gama záření, jehož fotony mají velkou energii. Při průchodu fotonu vrstvami Slunce, který trvá v řádu desítek tisíc až jednotek miliónů let, se jeden foton s velkou energií přemění na cca 500 tisíc fotonů s nízkou energií. Tyto nízkoenergetické fotony s dominantním zastoupením světelného záření se již šíří do volného vesmíru. Cesta k planetě Zemi jim rychlostí světla ve vakuu trvá zhruba 8 minut (Wald 2021; Lewis 1983).

Einsteinovým vztahem $E = m \cdot c^2$ můžeme dopočítat, že Slunce opouští každou sekundu záření o energii $3,85 \cdot 10^{26}$ J a můžeme tedy hovořit o výkonu $3,85 \cdot 10^{26}$ W. Odhaduje se, že při přeměně 1 gramu vodíku na helium se uvolní energie o velikosti 10^{12} J (Čeman 2002).

Životnost hvězd typu Slunce se pohybuje okolo 10 miliard let a vzhledem ke stáří Slunce se očekává dalších 5 až 7 miliard let existence Slunce v současné podobě. Slunce do té doby přemění všechny vodík na helium a následně se očekávají další nové termojaderné reakce přeměny helia na další prvky jako uhlík a kyslík. Slunce se však začne rozpínat, chladnout a řídnout a dostane se do fáze rudého obra. Předpokládá se i pohlcení nejbližších planet, mezi které může patřit i Země. Následně po vyčerpání helia ustanou termojaderné reakce podruhé a jádro Slunce se začne smršťovat do bílého trpaslíka a dojde k vymrštění vnějších vrstev Slunce do okolního prostředí a vytvoření planetární mlhoviny bohaté na nejrůznější prvky (Klezcek 2002).

3.1.2 Elektromagnetické pole a záření

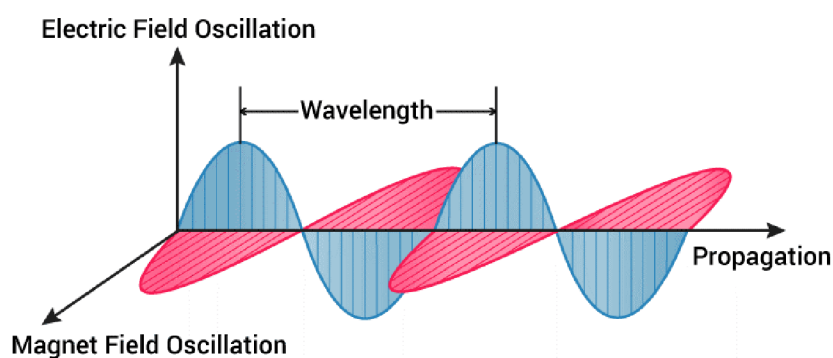
3.1.2.1 Elektromagnetické pole

Elektricky nabitě částice vytvářejí elektromagnetické pole, které ovlivňuje chování ostatních nabitých částic v jeho okolí. Elektromagnetické pole je složeno z elektrického a magnetického pole, která jsou navzájem fyzikálně propojena. Stacionární elektrický náboj vytváří zpravidla elektrické pole a elektrický náboj v pohybu vytváří většinou magnetické pole (Iqbal 1983; Myslík 1998).

J. C. Maxwell pomocí svých čtyř rovnic položil jednotnou teorii elektromagnetického pole a elektromagnetické vlny teoreticky předpověděl ještě před jejich objevením. Jeho souhrn zákonů popisuje vzájemné interakce proudu a elektrického náboje s elektromagnetickým polem (Sedlák & Štoll 1998). Z rovnic vyplývá, že časová změna magnetického pole vytváří elektrické pole a stejně tak i opačně, že časová změna elektrického pole vytváří pole magnetické. Také bylo definováno, že se obě pole šíří vlnami o rychlosti světla, jejíž převrácenou druhou mocninou nám dává součin permeability s permitivitou (Wald 2021).

3.1.2.2 Elektromagnetické záření

Jiným pojmenováním elektromagnetické vlny je postupné příčné vlnění elektromagnetického pole. Magnetické a elektrické pole kmitají ve vzájemně kolmých směrech (Obrázek 2). Směr šíření je také kolmý, a to na obě tyto vlny. Znázorněná vzdálenost periodicity dvou kmitů, v našem případě dvou maxim, je definována jako vlnová délka λ (Iqbal 1983).

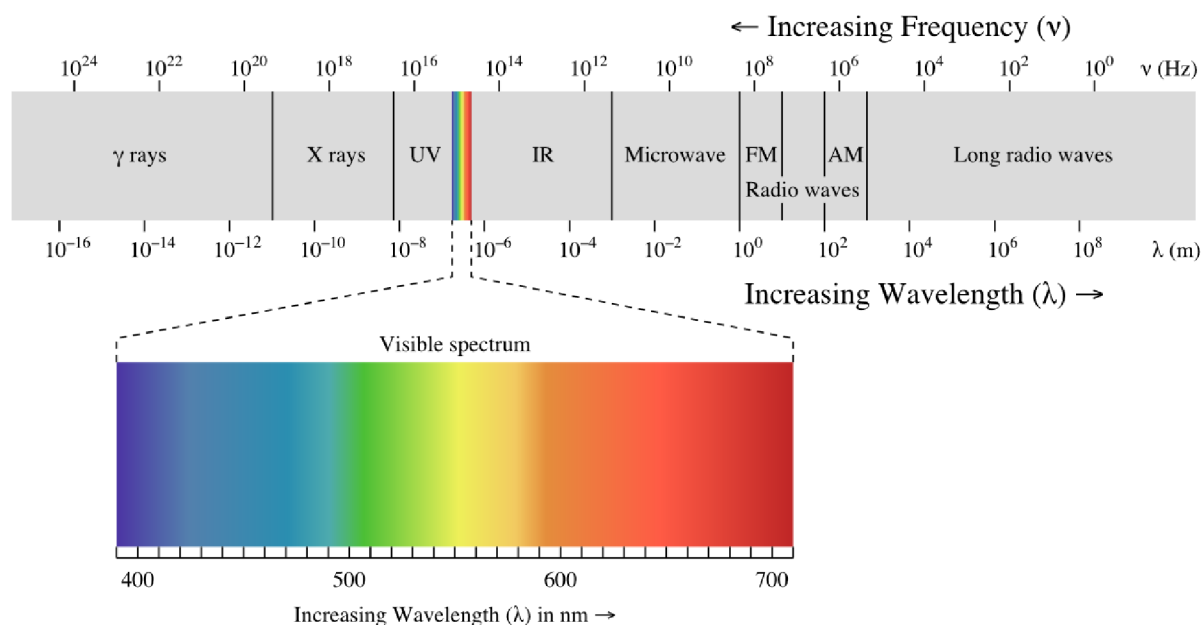


Obrázek 2: Elektromagnetické záření (Klein 2019)

Základní částicí elektromagnetického vlnění je foton, který je charakterizován energií, frekvencí, vlnovou délkou a hybností (Myslík 1998). Elektromagnetické vlny mají takzvaný dualistický charakter, který spočívá v tom, že se chovají jako vlny, ale také jako tok částic. Charakter vln se více projevuje u záření s velkou vlnovou délkou a částicový charakter u vln s krátkou vlnovou délkou (Wald 2021).

3.1.2.3 Dělení elektromagnetického záření

Vlnová délka elektromagnetického záření může nabývat hodnot od 10^{-16} i menších až po 10^8 nm i větší. Podle vlnové délky můžeme záření rozdělit na gama záření, rentgenové (dále jen „RTG“), ultrafialové (dále jen „UV“), viditelné, infračervené (dále jen „IR“), mikrovlnné a rádiové (Obrázek 3) Platí, že čím je λ záření větší, tím je menší frekvence záření (Libra & Poulek 2006).



Obrázek 3: Spektrum elektromagnetického záření (Ronan 2007)

3.1.2.4 Energie fotonů

Energie fotonů je dána vztahem $E = h \cdot \nu$, kde h je Planckova konstanta a ν je frekvence. Jelikož podíl rychlosti vlnění s frekvencí udává vlnovou délku, můžeme charakterizovat závislost energie fotonu na vlnové délce. Čím je vlnová délka elektromagnetického záření větší, tím je menší energie fotonů (Libra & Poulek 2006).

Energie fotonů viditelného záření se pohybuje v rozmezí 1,63 eV až 3,27 eV, zatímco energie mikrovlnného záření je menší než 0,01 eV a energie gama záření přesahuje 10 000 eV (Iqbal 1983).

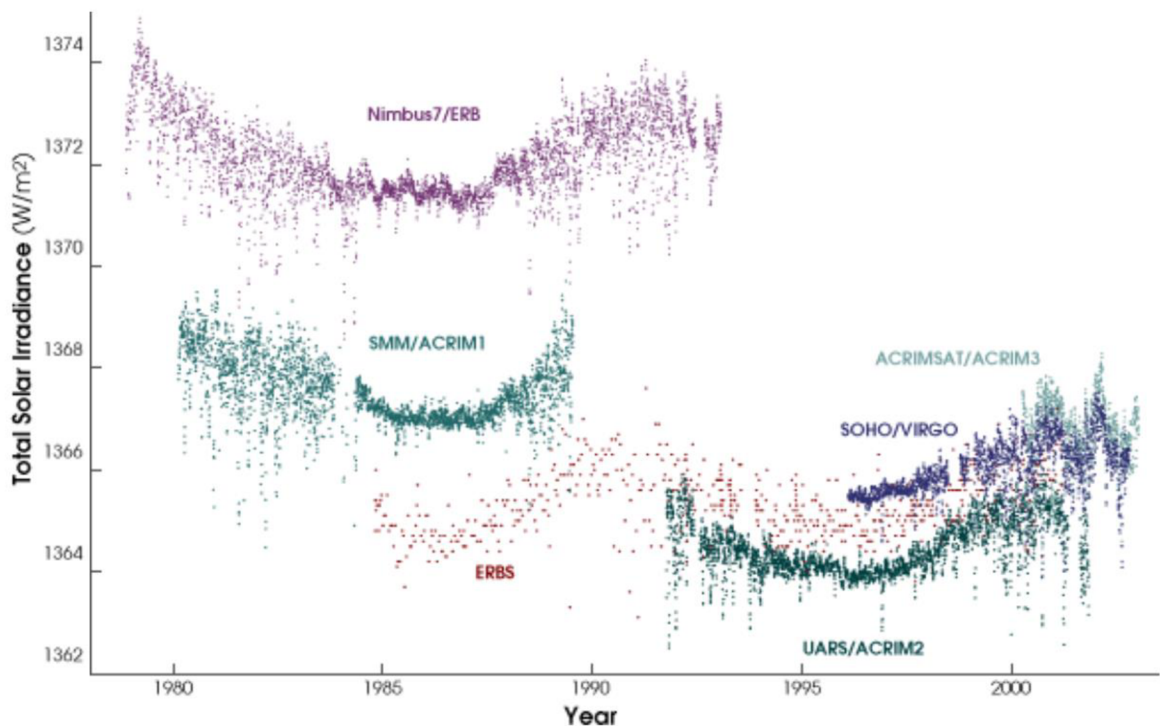
Podle vlnového charakteru jsou elektromagnetické vlny ovlivněny například zákonem lomu a odrazu na rozhraní dvou odlišných prostředí nebo difrakcí na optické mřížce. Projevy částicového charakteru se zabývá kvantová mechanika, která se zabývá například právě energií fotonů (Libra & Poulek 2006).

3.1.3 Sluneční energie

3.1.3.1 Sluneční energie dopadající na povrch planety Země

Energie Slunce dopadající na povrch planety Země je dána tzv. solární konstantou, jejíž hodnota se pohybuje kolem $1367 \text{ W}\cdot\text{m}^2$ (Strahler 2003). Tato hodnota ale není konstantní a v čase se mění. Samotné Slunce vyzařuje záření s různou hodnotou energie, která se v jedenáctiletých cyklech mění v řádu desetin procent. Až 2 % změny energie ovlivňuje měnící se vzdálenost Země od Slunce způsobená eliptickou oběžnou dráhou (Švanda 2003).

Solární konstanta je považována za intenzitu elektromagnetického záření Slunce, které dopadá na horní hranici atmosféry Země. Hodnota je uváděna při střední vzdálenosti Země a Slunce na jednotkovou plochu kolmou k záření Slunce. Nejvyšší hodnoty dosahuje solární konstanta kolem 3. ledna, protože vzdálenost Země a Slunce je nejmenší. Naopak nejnižších hodnot dosahuje kolem 4. července, kdy je vzdálenost největší (Wald 2021).

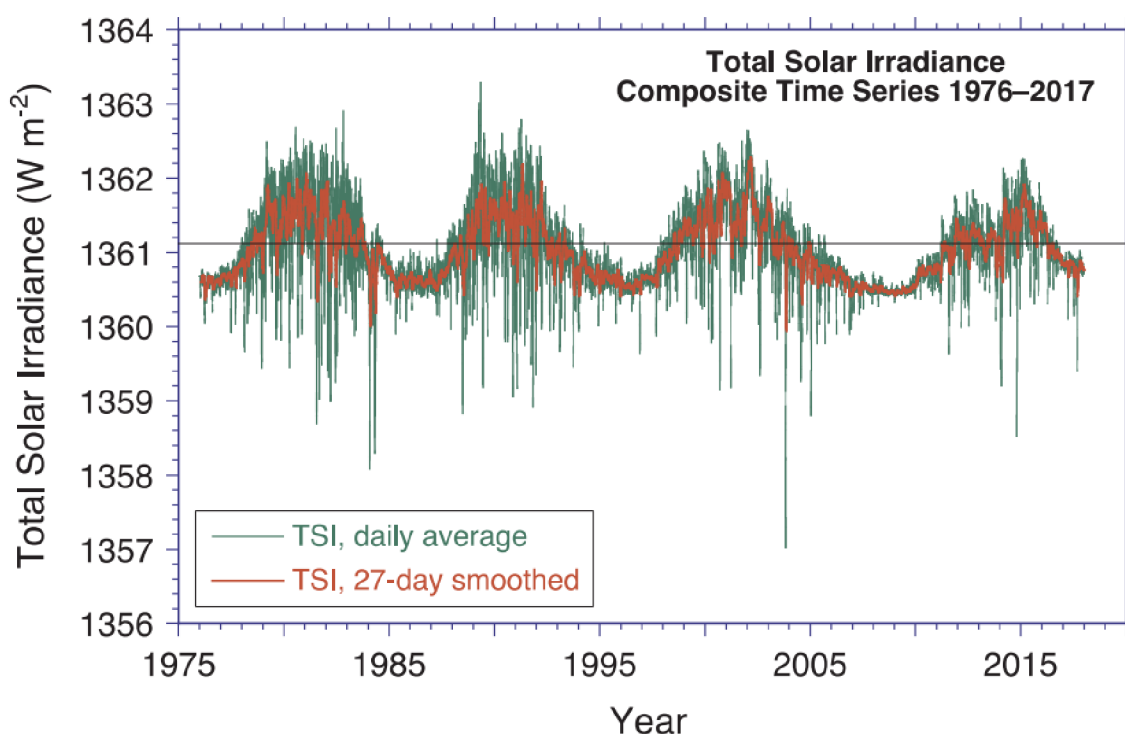


Obrázek 4: Měření solární konstanty v čase (NASA 2003)

Velikost této uváděné solární konstanty vychází z měření různých přístrojů používaných ve vesmírných programech National Aeronautics and Space Administration (dále jen: „NASA“). NASA v projektu NIMBUS, který odstartoval 24. října 1978, poprvé zahájila

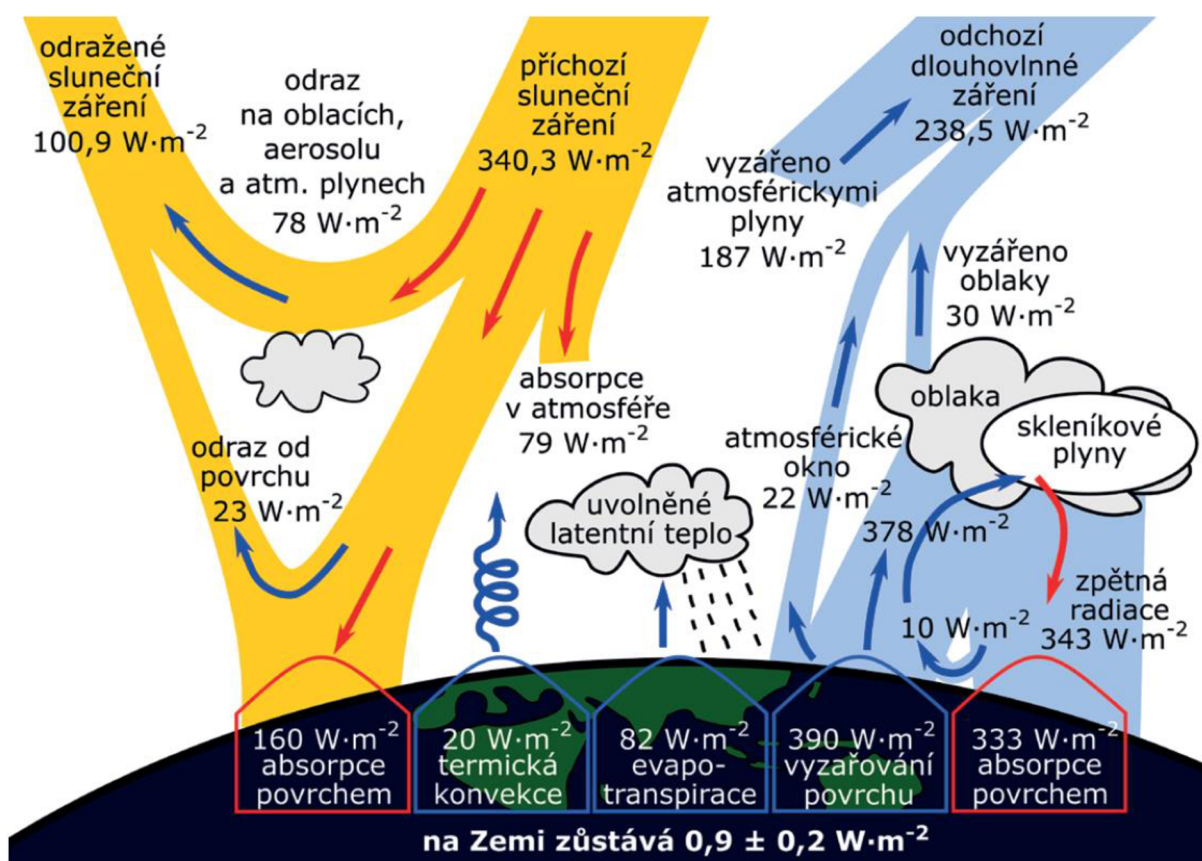
dlouhodobý sběr měření sluneční aktivity. Následně docházelo k duplikování a nahrazování tohoto programu dalšími programy, které obsahují také naměřené hodnoty sluneční konstanty před úpravou (Obrázek 4) (NASA 2003).

Hodnota solární konstanty byla Christianem A. Gueymardem na základě měření za posledních 42 let, během kterých byly postupně používány přesnější přístroje pro kosmické měření, od počátku roku 2000 upravena zhruba o $5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ směrem dolů na hodnotu $1361,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ s odchylkou $0,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (Obrázek 5) Ve své práci doporučuje přehodnocení využívání modelu ACRIM a dokládá vyšší spolehlivost modelu PMOD, který naměřená data koriguje (Gueymard 2018).



Obrázek 5: Vývoj solární konstanty v čase (Gueymard 2018). Červená křivka zobrazuje dvacetidenní klouzavý průměr zeleně zobrazeného denního měření.

Na Zemi dopadá energie ze Slunce o hodnotě přibližně $340,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ a tato energie je dále využita a transformována aktivním povrchem Země (Obrázek 6). Důležitým jevem je skleníkový efekt, bez kterého by se průměrná roční teplota pohybovala okolo $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ namísto současných $15 \text{ }^\circ\text{C}$. Podle posledních odhadů zůstává na Zemi energie o hodnotě $0,7$ až $1,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, díky čemuž dochází k postupnému zvyšování teploty vzduchu i mořské vody (Wald 2021).



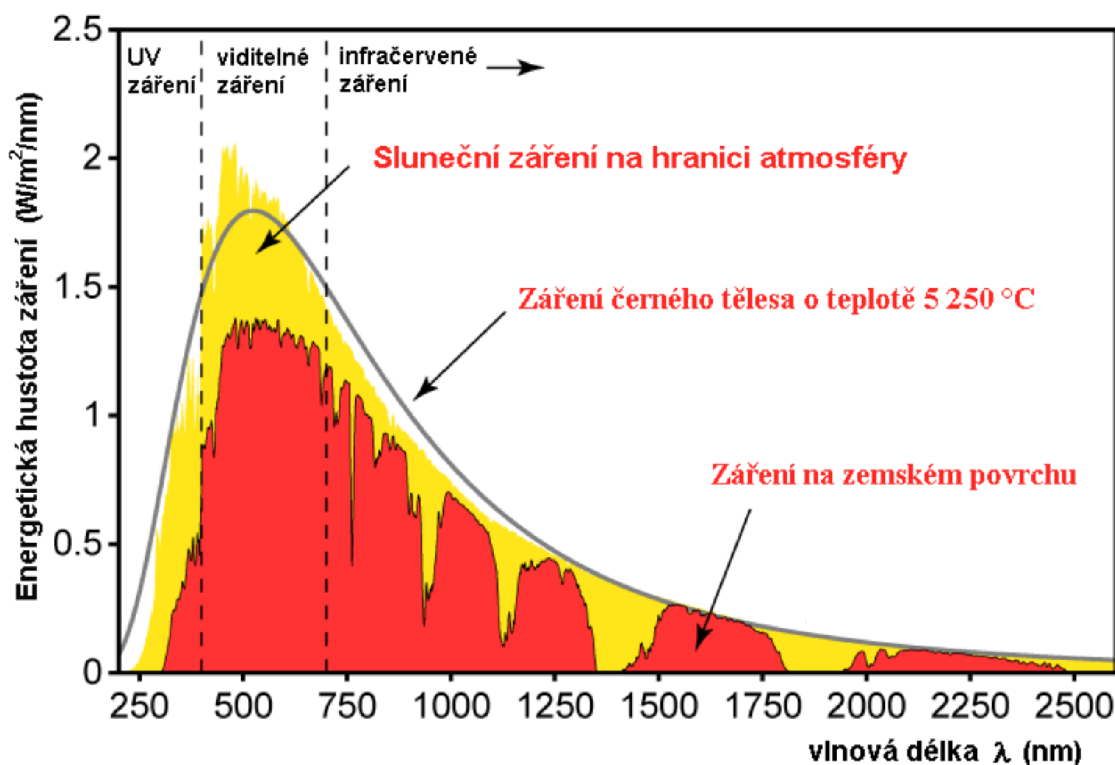
Obrázek 6: Energetická bilance Země (AV ČR 2020)

Z celkového záření dopadajícího na povrch Země se průměrně 7 % odrazí od horních vrstev atmosféry, 17 % se odrazí od mraků a 6 % se odrazí od povrchu Země. Kromě těchto 30 %, které se odrazí, se 23 % absorbuje v atmosféře a 47 % dopadá na povrch Země. 0,1 % sluneční energie je spotřebováno na fotosyntézu (Esen et al. 2020; Libra & Poulek 2006).

3.1.3.2 Sluneční záření

Sluneční záření (dále i: „SZ“) dopadající na horní hranici atmosféry má přibližně stejné spektrum záření jako spektrum záření teoretického černého tělesa o teplotě $5\,250 \text{ }^\circ\text{C}$. Většina (99 %) tohoto záření je z oblastí UV záření, viditelného záření a IR záření (Obrázek 7) (Braníš & Hůnová 2009).

Atmosféra absorbuje některé vlnové délky slunečního záření. UV záření je dominantně absorbováno ozónovou vrstvou, a to ze 100 % u nejkratších vlnových délek do 290 nm a pásmo od 290 nm do 320 nm je absorbováno přibližně ze 65 %. Ve vybraných vlnových pásmech infračerveného záření absorbuje část záření především oxid uhličitý a vodní pára. Částečná absorpce viditelného spektra je závislá na tloušťce atmosféry (Esen et al. 2020).



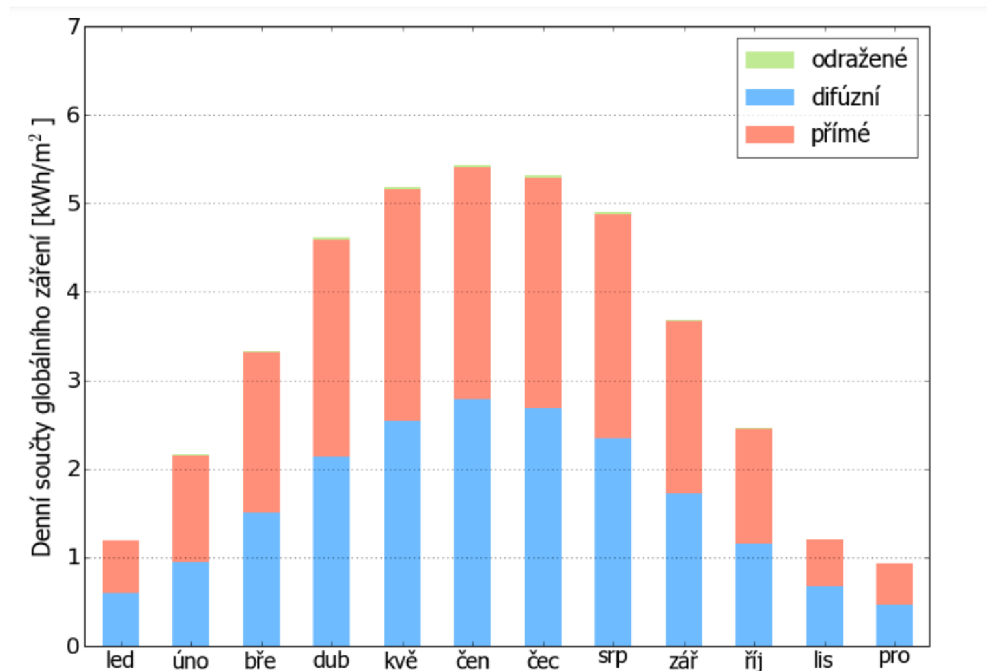
Obrázek 7: Spektrum slunečního záření dopadajícího na horní hranici atmosféry Země (žlutá plocha) na povrch Země (červená plocha) (Rohde 2008)

3.1.3.3 Globální sluneční záření

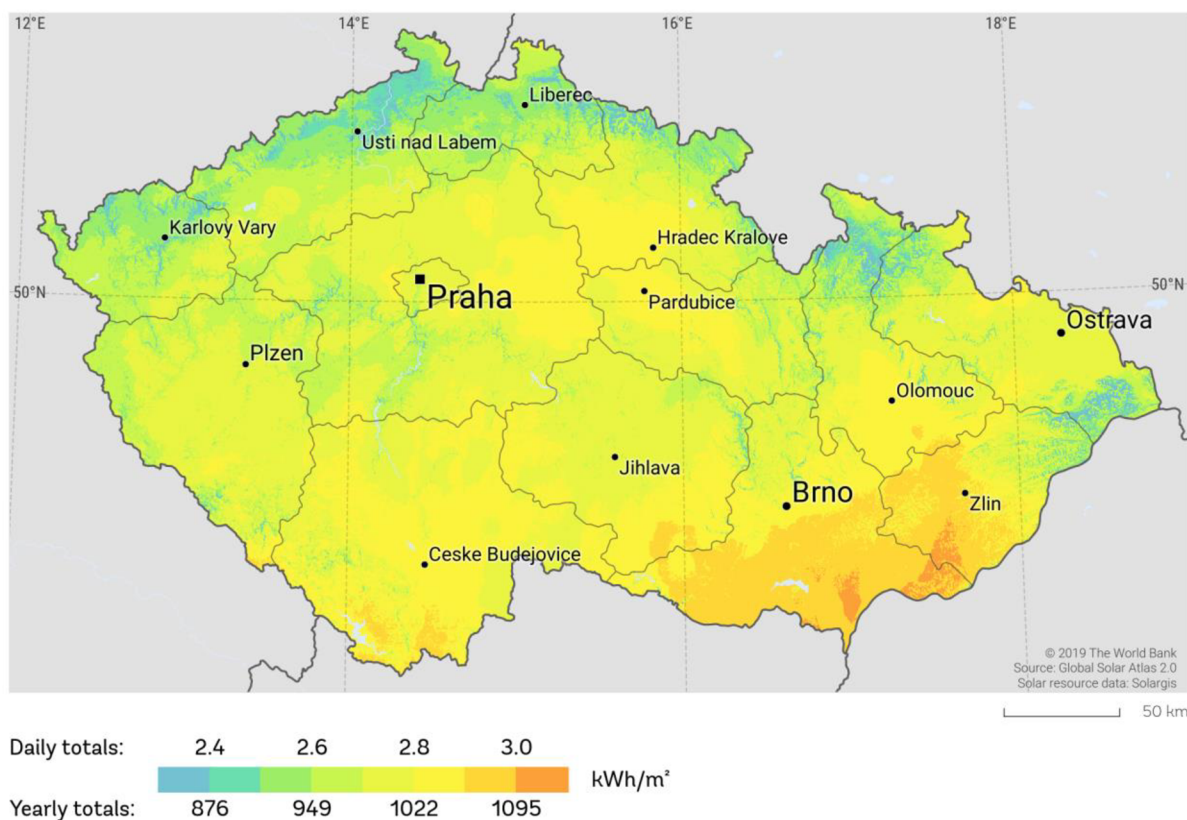
Sluneční záření bez odrazů, které převažuje při jasné obloze bez mraků, se označuje jako přímé záření. Rozptýlením přímého záření o mraky, částičky či molekuly v atmosféře vzniká záření difúzní. Difúzní záření vytváří dojem, že nepřichází od Slunce, ale od celé oblohy. Intenzita difúzního záření vzrůstá při východu a západu Slunce a také roste s rostoucím počtem částic v atmosféře a při zatažené obloze. Součet intenzity rozptýleného (I_D) a přímého záření (I_P) dopadajícího na Zemi označujeme jako intenzitu globálního záření I (Škorpík 2020).

Difúzní záření v letních měsících tvoří přibližně 50 % globálního záření. V celoročním průměru je zastoupeno ze 60 % v důsledku vyšší oblačnosti v zimních měsících (Obrázek 8) (Iqbal 1983).

Kromě intenzity slunečního záření se udává také úhrnná energie SZ na plochu za den Q_S , kde $Q_S = \tau Q_{S,teor} + (1-\tau) Q_D$. Poměrná doba slunečního svitu τ je dána podílem skutečné doby slunečního svitu a teoretickou dobou slunečního svitu a hodnoty 1 nabývá pro oblohu bez oblak. Teoretická úhrnná energie SZ dopadající na m^2 bez oblačnosti a se započítaným znečištěním ovzduší za celý den se značí $Q_{S,teor}$ a Q_D představuje úhrn energie dopadajícího rozptýleného záření na m^2 za den (Cihelka 1994).



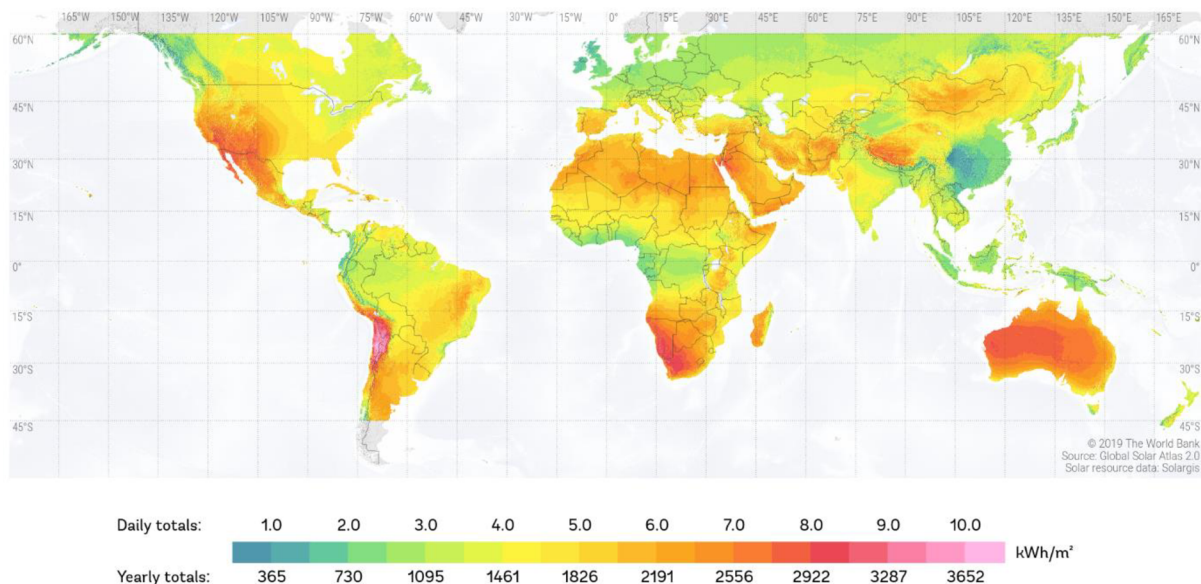
Obrázek 8: Poměr difúzního a přímého záření na solární elektrárně v lokalitě Cheb v roce 2019 (Solargis, s.r.o. 2020)



Obrázek 9: Přímé záření dopadající na území ČR (Global Solar Atlas, ČR 2019)

Průměrná roční intenzita přímého záření v ČR, která se nachází mezi 49. a 51. rovnoběžkou, je v rozmezí 800 až 1250 kWh/m² (Obrázek 9). Přibližně 75 % z tohoto záření

připadá na období od dubna do října a 25 % na zbývající část roku. V Jižní Americe v oblasti pohoří And dosahuje hodnot blížících se až k 4 MWh/m² (Obrázek 10). V rámci ČR je oblastí s nejvyšším ročním úhrnem slunečního záření jižní Morava a následně pak oblast Českých Budějovic a Hradce Králové (Obrázek 9) (Chmel & Hamerlík 2016).



Obrázek 10: Přímé záření dopadající na povrch Země (Global Solar Atlas, World 2019)

Sluneční záření je při průchodu atmosférou rozptylováno na molekulách plynů nebo větších částicích. **Molekulární (Rayleighův) rozptyl** záření je výraznější pro záření o kratších vlnových délkách, rozptýlené záření tedy obsahuje kratší vlnové délky světla (fialovou a modrou) a zapřičiňuje modré zbarvení oblohy. Druhý, tzv. **aerosolový (Mieův) rozptyl**, vzniká na kapkách či pevných částicích s velikostí přesahující 1,2 μm. Tento druh rozptylu není vázán na vlnovou délku a zapřičiňuje bílou (šedou) barvu mlhy či mraků. Intenzita obou druhů rozptylu klesá se zvyšující se výškou a tím klesající hustotou vzduchu (Ruda 2014).

3.1.3.4 Měření sluneční energie u povrchu Země

Pro měření globálního SZ se využívá pyranometr. Přístroj obsahuje čidla, která reagují na dopadající SZ bez ohledu na vlnovou délku (0,3 až 2,8 μm) a úhel dopadu paprsků. Pro zabránění vlivu dlouhovlnného záření nebo možnosti ochlazování větrem jsou čidla chráněna krytem. Kryt je tvořen dvěma skleněnými polokoulemi s rovnoměrnou tloušťkou, aby se předešlo možnému nerovnoměrnému rozdělování SZ na čidla. Pro správné měření je potřeba udržet u všech druhů pyranometrů vodorovný sklon, v opačném případě dochází ke změnám podmínek proudění vně obalové kopule. Pyranometry dělíme na:

- segmentový,
- Eppleyho a
- Moll-Gorczyňského (Matuška & Mareš 2009; Vignola et al. 2012).

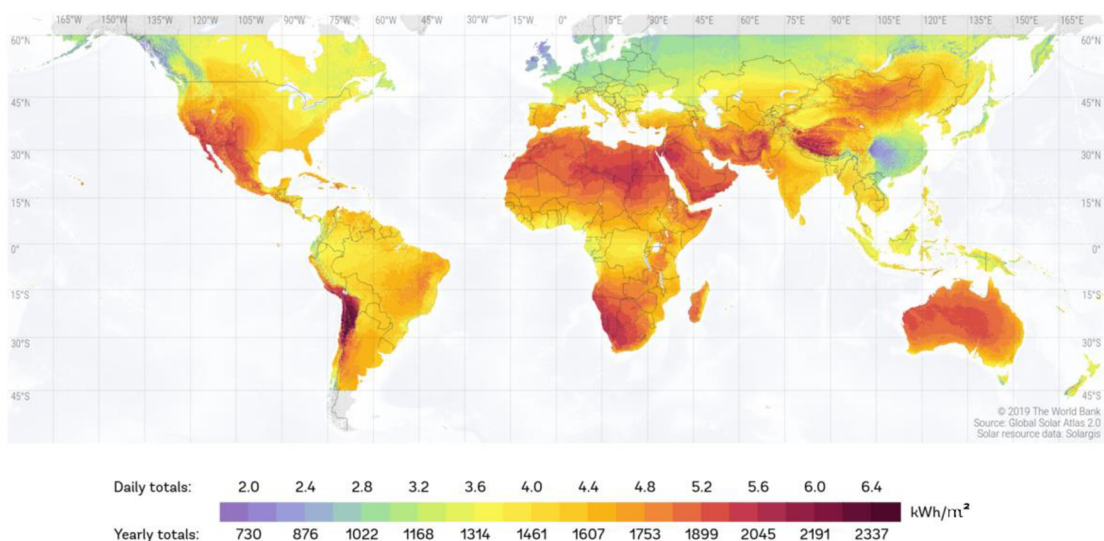
Segmentové pyranometry využívají teplotního rozdílu mezi bílými a černými kruhovými výsečemi (Obrázek 11). Bílé jsou opatřeny odrazivým nátěrem a černé naopak vysoce pohlcujícím nátěrem. Každá výseč obsahuje až 10 termočlánků. Těchto 12 segmentů je uspořádáno do kruhu a vzniklý teplotní rozdíl je přímo úměrný energetické hodnotě dopadajícího slunečního záření, protože díky krytu není ovlivněn teplotou okolí (Matuška & Mareš 2009; Vignola et al. 2012).



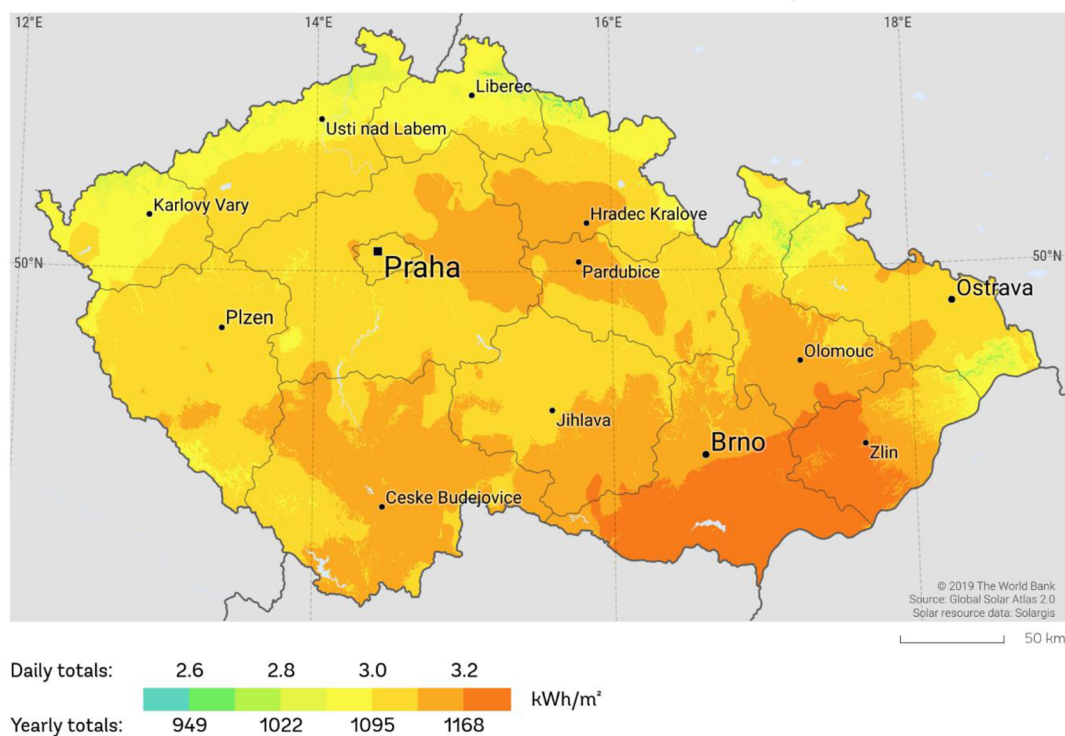
Obrázek 11: Segmentový pyranometr Fiedler SG002 (Fiedler AMS, s.r.o. 2022)

3.1.3.5 Potenciál sluneční energie

Odhad potenciálu sluneční energie pro solární panely zajišťuje World Bank Group ve spolupráci s International Finance Corporation (Obrázek 12, Obrázek 13). Odhad, dostupný pro kterékoliv místo na světě, zahrnuje model slunečního záření, simulační model fotovoltaického (dále jen: FV) výkonu a model teploty vzduchu (Esen et al. 2020).



Obrázek 12: Potenciál sluneční energie na Zemi (Global Solar Atlas, World 2019)



Obrázek 13: Potenciál sluneční energie na území ČR (Global Solar Atlas, ČR 2019)

3.1.3.6 Využití sluneční energie

Bez sluneční energie by na Zemi nedocházelo k vzdušnému ani oceánskému proudění, rostliny by nemohly provádět fotosyntézu, nefungoval by ani koloběh vody. Sluneční energie je pro život na Zemi nezbytná (Themessl & Werner 2005).

Lidé využívají energii ze Slunce různými způsoby, které dělíme podle využití na pasivní a aktivní. Aktivní využití dále dělíme podle způsobu využití na fototermické a fotovoltaické. K pasivnímu využití energie dochází například u budovy, jejíž plášť je navržen tak, aby budova zachytila velké množství sluneční energie v zimě. Fototermická přeměna probíhá při přeměně sluneční energie na tepelnou energii, například v kolektorech při ohřátí vody. U fotovoltaické přeměny dochází k přímé přeměně sluneční energie na energii elektrickou (Themessl & Werner 2005).

3.1.4 Sluneční svit

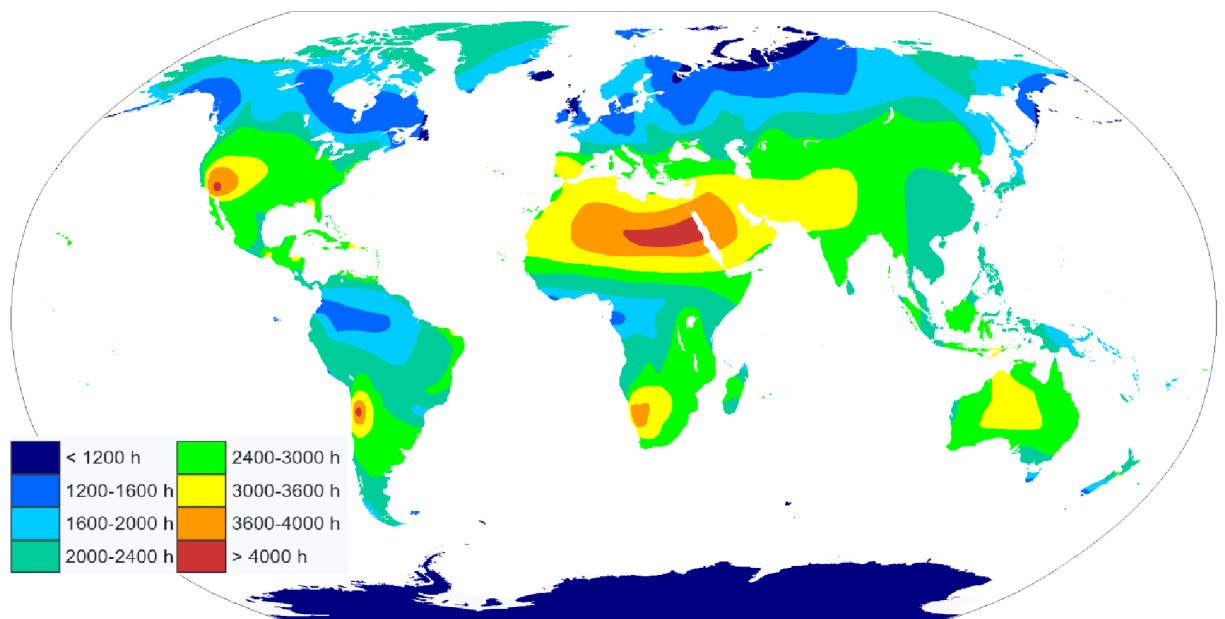
Sluneční svit (dále také: SSV) neboli trvání slunečního svitu je definován jako časový interval, při kterém je intenzita přímého slunečního záření, které dopadá kolmo na zemský povrch větší než 120 W/m² (Česká meteorologická společnost [online]). Udáváme jej v hodinách s přesností na desetiny. Sluneční svit nezávisí jen na délce světelného dne, kterou ovlivňuje zeměpisná šířka a roční období, ale také na překážkách mezi Sluncem a přístrojem měření, jako jsou například oblačnost a lokální překážky v místě měření. Sluneční svit patří

k tzv. základním klimatickým prvkům, a přestože nevyjadřuje intenzitu slunečního záření přímo, je pro svou délku a četnost záznamů hojně využívaným ukazatelem (Česká meteorologická společnost 2022; Vysoudil 2013).

Setkat se můžeme také s pojmem teoretické (astronomické) trvání slunečního svitu, které udává časový interval od východu do západu slunce a při kterém mezi Slunce a přístroj nevstoupí žádná překážka. Vzhledem k faktu, že je určen výhradně zeměpisnou šířkou a ročním obdobím, nabývá minima při zimním slunovratu a maxima při letním slunovratu. Sluneční svit se této hodnotě může přiblížit během celodenního jasného počasí a ideálního postavení měřicího přístroje (Česká meteorologická společnost 2022).

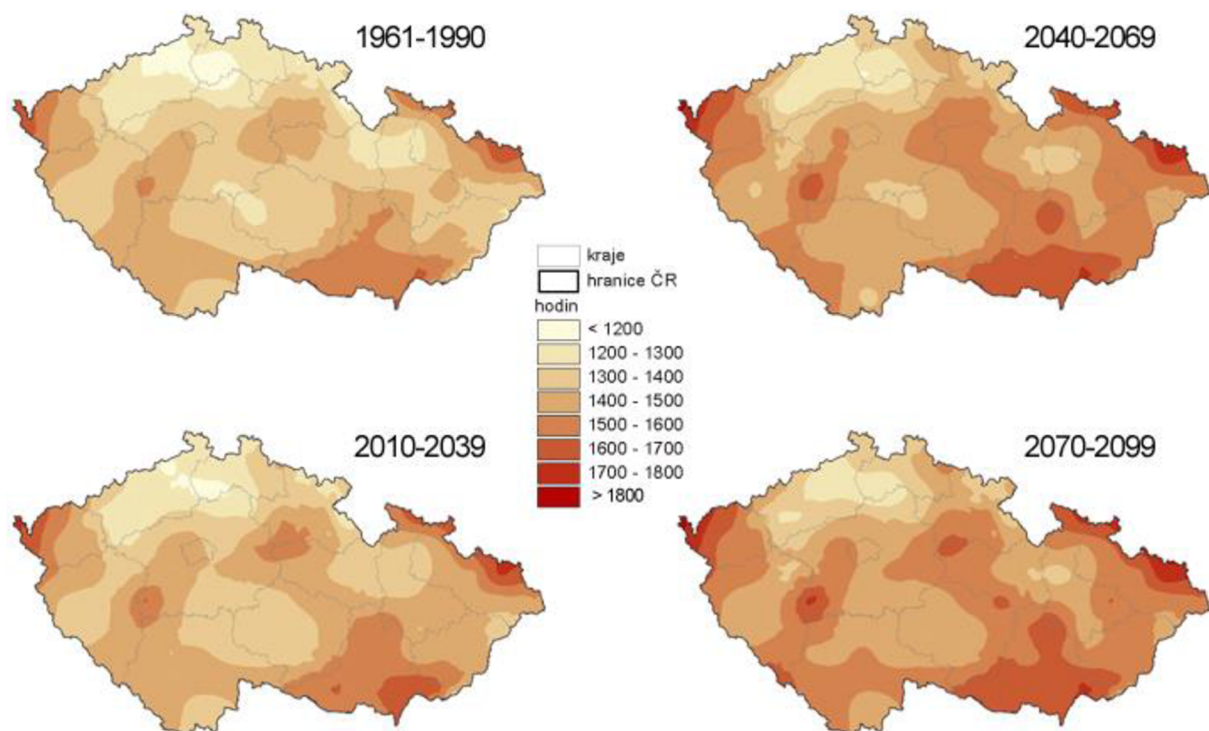
Pokud teoretické trvání SSV očistíme o lokální překážky v místě při postavení měřicího přístroje, dostaneme hodnotu efektivního trvání slunečního svitu, ale stále předpokládáme ideální volný obzor (Česká meteorologická společnost 2022).

Doba trvání SSV se ve světě liší nejen na základě předem daných zeměpisných faktorů, jako jsou zeměpisná šířka, zeměpisná délka a nadmořská výška, ale také na základě velmi proměnlivých faktorů, jakými jsou meteorologické podmínky, mezi které řadíme oblačnost (Obrázek 14) (Vysoudil 2013).



Obrázek 14: Roční úhrny SSV na Zemi (Landsberg, 2009)

V ČR se naměřená hodnota SSV pohybuje průměrně v rozmezí 1 200 až 1 800 h/rok. V horských oblastech se můžeme setkat s hodnotou 1 600 h/rok a v oblastech jižní Moravy se přibližuje k hranici 2 000 h/rok (Obrázek 15) (Chmel & Hamerlík 2016).



Obrázek 15: Roční úhrny slunečního svitu na území ČR (ČHMÚ 2022)

3.1.4.1 Měření slunečního svitu

Záznamy o slunečním svitu se datují ve světě již od konce 19. století. Na území ČR je nejstarším záznamem záznam z roku 1908 z Milešovky (Pokorný & Vaníček 2007). Pro starší měření SSV se využíval Campbell-Stokesův slunoměr neboli heliograf (Obrázek 16), který je i dodnes využíván pro kontrolní měření Českým hydrometeorologickým ústavem (dále jen: „ČHMÚ“) (Matuška & Mareš 2009).



Obrázek 16: Campbell-Stokesův slunoměr – heliograf (Pokorný & Vaníček 2007)

Pomocí pevné skleněné koule o průměru 10 cm se přenášel sluneční svit na připravený registrační pásek. Skleněná koule funguje jako čočka soustředící paprsky do jednoho místa. K záznamu docházelo při dostatečné hodnotě slunečního svitu pomocí vypálení stopy na pásek. Záznam byl prováděn s přesností na desetinu hodiny a odečítal se ručně (Vignola et al. 2012).

Pro různá roční období se používal různý registrační pásek odpovídající postavení Slunce na obloze: krátký pro zimní období od 12. 10. do 28. 2. (29. 2.) (Obrázek 17), střední rovný pro jarní a podzimní období od 1. 3. do 11. 4. a od 1. 9. do 11. 10. a dlouhý letní pro období od 12. 4. do 31. 8. (Matuška & Mareš 2009; Vignola et al. 2012).



Obrázek 17: Zimní registrační pásy do heliografu (Opting servis Luboš Ševčík 2022)

Podle Pokorného a Vaníčka se typická chybovost měření Campbell-Stokesovým slunoměrem pohybuje v rozmezí +1 % až +2,5 % pro celoroční hodnoty. Největšího podílu chybovosti dosahuje v létě, kdy se můžeme setkat s chybou 7 % a výjimečně, například v roce 2003, s chybou dosahující až 10 %. Chybovost ručního odečtu členitých papírových záznamů nebyla v průběhu pětileté řady nikterak velká, ale byla zjišťována pouze pro jeden typ registračních pásek (Pokorný & Vaníček 2007).

Modernější přístroje jsou již založeny na dvojici fotovoltaických článků, kde jeden zaznamenává dopadající slunečního záření v zastínění a druhý je slunečnímu záření vystaven přímo. Měření SSV tedy probíhá za pomoci přímého záření pomocí elektronických slunoměrů. Ty v případě, že je sluneční energie dopadající na oba FV články shodná, vyhodnotí absenci přímého záření, a tedy nevyhodnotí SSV pozitivně. V opačné variantě, tedy existenci významného rozdílu hodnot naměřených články, vyhodnotí SSV pozitivně a potvrdí sluneční svit (Matuška & Mareš 2009).

Zavádění elektronických měřících přístrojů sebou neslo zvýšení chybovosti měření, a to především u přístrojů DSU12, které nedostatečně filtrovaly difúzní záření a nebylo možné zajistit jejich správnou kalibraci. Odhad jejich chybovosti je obtížné stanovit a podle Matušky

a Mareše není vhodné je k měření SSV používat. Poměrně vysoké chybovosti -5 % až -10 % dosahovaly při měření SSV slunoměry SD4, u kterých navíc neproběhla kontrola a kalibrace před samotnou instalací. Hodnoty naměřené těmito přístroji nelze doporučit k analýze dat (Matuška & Mareš 2009).

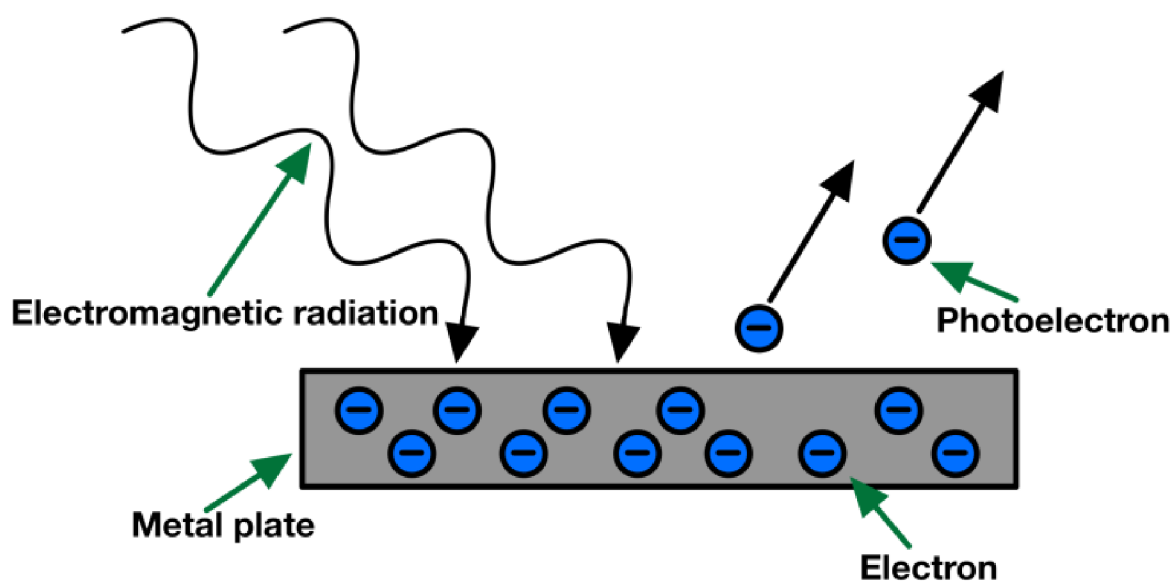
V současné době jsou nainstalovány slunoměry SD5 na více než 100 stanicích provozovaných ČHMÚ. Jejich chybovost nepřesáhla v žádném období 7 %. Zkoumána byla i změna citlivosti přístroje, která na tříletém horizontu nebyla prokázána (Matuška & Mareš 2009). Vzhledem k faktu, že Campbell-Stokesovy slunoměry naměřená data nadhodnocovaly, lze očekávat nevýrazný pokles zhruba o 2 % u ročních sum dat naměřených slunoměry SD5. Předpokládá se i celkový nárůst kvality měřených dat SSV ČHMÚ. Pro ověření tohoto předpokladu jsou v současné době na několika vybraných stanicích ČHMÚ v běhu jak přístroje SD5, tak i Campbell-Stokesovy slunoměry (Pokorný & Vaníček 2007).

3.2 Fotovoltaika

3.2.1 Princip fotovoltaiky

3.2.1.1 Fotoelektrický jev

Fotoelektrický jev (dále jen „FEJ“), jiným slovem fotoefekt, řadíme mezi fyzikální jevy. Při pohlcování elektromagnetického záření látkou dochází k uvolňování elektronů z obalu atomu, které mohou být z látky následně uvolněny. FEJ probíhá nejčastěji u kovů a podle toho, zda probíhá na povrchu nebo uvnitř látky, můžeme FEJ dělit na vnější (Obrázek 18) a vnitřní. Pro elektron uvolněný z látky pomocí elektromagnetického záření se používá označení fotoelektron (Klassen 2011).

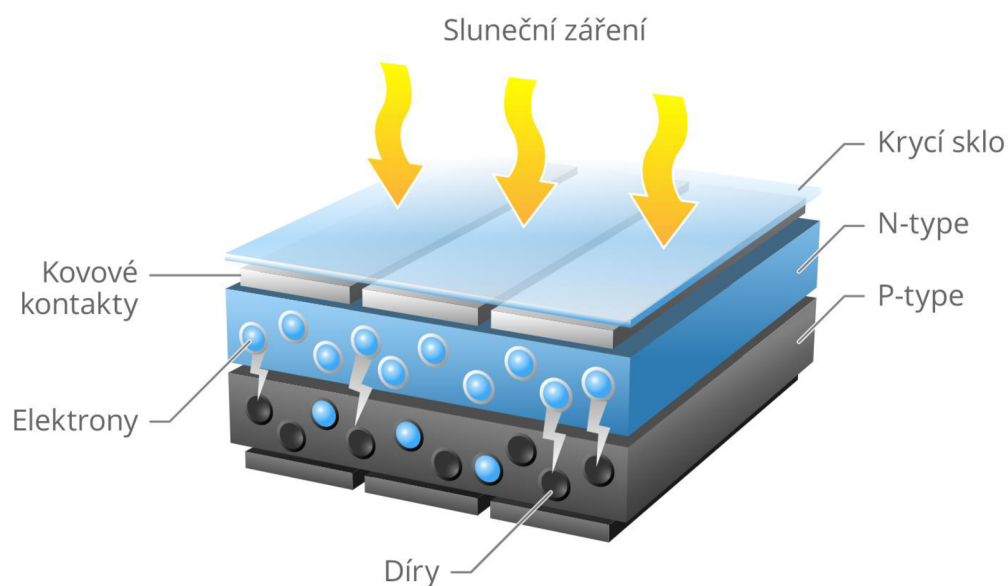


Obrázek 18: Průběh vnějšího fotoefektu (The Science and Maths Zone 2021)

Pro případ, kdy FEJ probíhá uvnitř látky, používáme označení vnitřní FEJ. V takovém případě uvolněné fotoelektrony látku neopouštějí, ale naopak v ní zůstávají a zvyšují vodivost. Působí jako tzv. vodivostní elektrony (Mertens 2019).

3.2.1.2 Fotovoltaický jev

Fotovoltaický jev („FV“) je vnitřní FEJ fungující na principu přechodu P-N, na nějž může dopadat světelné záření (Obrázek 19). Jako polovodič se využívá čtyřmocný prvek (např. křemík nebo germanium). **Polovodič typu P** se vyrobí přimícháním i malého množství trojmocného prvku (např. bóru nebo india) do čtyřmocného prvku a výsledný materiál tedy disponuje přebytkem kladných děr. **Polovodič typu N** se vyrobí přidáním i malého množství pětímocného prvku (např. arsenu nebo fosforu) do křemíku a disponuje přebytkem záporných elektronů (Quaschnig 2010).



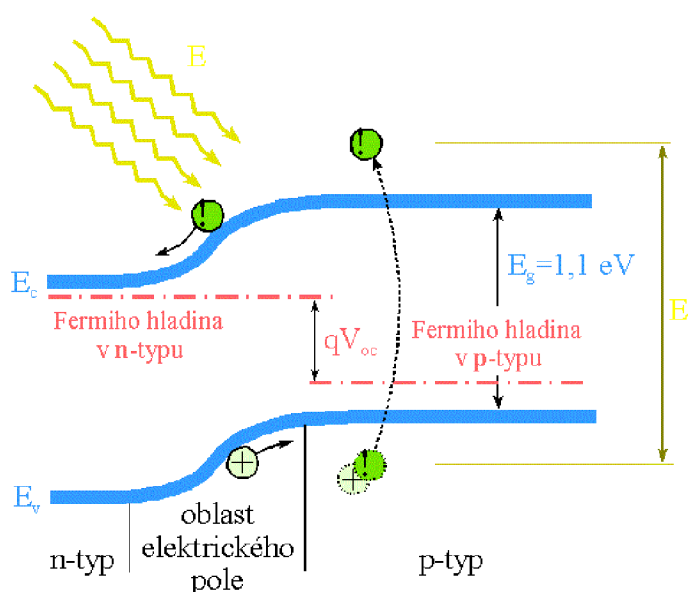
Obrázek 19: Fotovoltaický jev (ČEZ, a. s. 2023)

Foton, který disponuje dostatečnou energií, v polovodičovém materiálu uvolní valenční elektron a dojde ke vzniku elementárního kladného náboje. Tento kladný náboj nemůže díky přechodu P-N projít napřímo k elektrodě se stejnou polaritou, ale musí projít vnějším obvodem. Tento princip je využíván ve fotovoltaickém článku, ale také v polovodičové diodě či fototranzistoru (Mertens 2019).

Podstatnou roli ve funkci P-N přechodu mají energetické hladiny rozdělené na pásy dovolených a zakázaných energií (Obrázek 20). Pokud budeme uvažovat křemíkový materiál, tak v jeho krystalické struktuře má každý atom křemíku čtyři nejbližší sousedy. Valenční elektrony (poslední čtyři) jsou se sousedy sdíleny a vytvářejí kovalentní vazby. Za velmi nízkých teplot je posledním obsazeným pásem valenční pás (E_V) a prvními neobsazenými pásy zakázaný pás (E_g) a vodivostní pás (E_C). Šířku zakázaného pásu definujeme jako rozdíl nejnižší energetické hladiny vodivostního pásu a nejvyšší energetické hladiny valenčního pásu a pro krystalický křemík je $E_g = 1,12$ eV (pro amorfni křemík se jedná o hodnotu 1,75 eV).

Křemíkový materiál tedy může využít většinu viditelného a část infračerveného záření dopadajícího na Zemi. Fermiho energetická hladina leží pro křemíkový materiál uprostřed zakázaného pásu a v nejnižším energetickém stavu není žádný valenční elektron volný a materiál nemůže vést elektrický proud. Napětí, které vznikne díky osvětlení se označuje jako V_{oc} a je dáno rozdílem Fermiho hladin pro N a P polovodič (Reinders 2017).

Energií fotonu nebo fononu přejdou některé elektrony z valenčního do vodivostního pásu. Elektrony ve vodivostním pásu mohou vést elektrický proud a posouvají se proti směru elektrického pole. Neobsazené kladně nabitě díry ve valenčním pásu mohou přetahovat elektrony od sousedních atomů, postupují ve směru působení pole a chovají se jako kladně nabitě částice. Počet uvolněných elektronů odpovídá počtu vzniklých děr a krystal je navenek elektricky neutrální (Mertens 2019).



Obrázek 20: Schéma pásů P-N přechodu pro krystalický křemík (Vaněček 2000)

3.2.2 Fotovoltaický článek

Fotovoltaický článek je polovodičová součástka, která přeměňuje sluneční energii na elektrickou energii za využití výše popsaného FV jevu. Jedná se o poměrně velkoplošnou součástku, která se pro komerční využití vyrábí v mnoha velikostech. Vyrábí se z různých materiálů. Fotovoltaické články je možné dělit na krystalické a tenkovrstvé (Libra & Poulek 2009).

3.2.2.1 Krystalické články

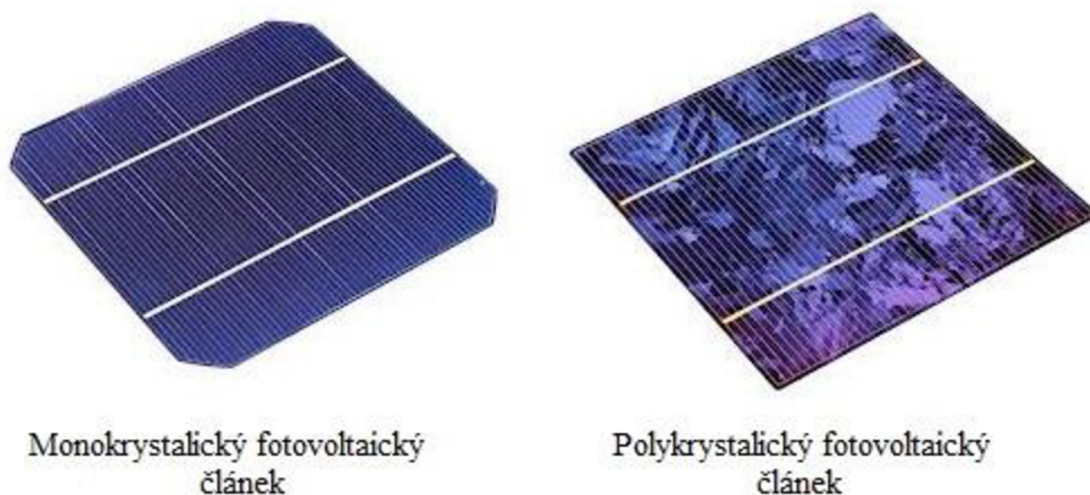
Nejvíce používaným materiálem pro výrobu FV článků je krystalický křemík. Oxid křemičitý je v zemské kůře zastoupen téměř z jedné třetiny a jedná se tedy o dostupný materiál. Navíc technologie zpracování křemičitého písku je ve FV průmyslu dobře zvládnutá. Oxid křemičitý se redukuje za pomoci uhlíku na křemík. Takto vzniklý křemík má čistotu dosahující 99 %. Pro potřeby FV je však nutné křemík dále čistit a zbavit jej většiny nečistot, které jsou tvořeny hliníkem, železem či uhlíkem. Nejvyužívanější je technologie s chlorovým cyklem, kde

se křemík přes trichlórsilan vyredukuje zpět na křemík. Tento postup je poměrně energeticky náročný a také zatěžuje životní prostředí (Libra & Poulek 2010).

3.2.2.1.1 Monokrystalický křemíkový článek

Monokrystalický křemíkový článek vzniká odřezáváním z monokrystalického ingotu. Ten vzniká Czochralského metodou při vysoké teplotě 1400 °C. Článek se řeže speciální drátovou pilou z ingotu, který má tvar tyče s kruhovým průřezem. Používají se buď přímo kulaté tvary (bez ořezů), anebo častěji pseudočtvercové tvary (Obrázek 21) (Haselhuhn 2010).

Destičky jsou tenké 150 až 250 μm a za pomoci dopování fosforem se vytvoří P-N přechod. Tento druh článku se ve standardních instalacích již nepoužívá. Mezi jeho výhody řadíme dobrou životnost (Mertens 2019).



Obrázek 21: Srovnání monokrystalického a polykrystalického FV článku (Solaren 2020)

3.2.2.1.2 Polykrystalický křemíkový článek

Polykrystalický křemíkový článek vzniká přímým odléváním ingotu do formy a následným řezáním na tenké plátky o rozměrech 200 μm (Murtinger 2008). Odléváním do formy lze dosáhnout čtvercových nebo obdélníkových tvarů od 10×10 cm až po 21×21 cm. Jednotlivé krystaly křemíku lze díky lomu světla na povrchu článku rozpoznat (Obrázek 21) (Haselhuhn & Maule 2017).

Výroba polykrystalických článků je preferována před monokrystalickými především kvůli levnějším nákladům na výrobu, protože nepotřebují tepelně náročný Czochralského proces. Přestože se účinnost polykrystalického článku pohybuje od 13 do 15 %, je mírně nižší než u monokrystalického článku s účinností 14 až 17 % (Haselhuhn 2010).

I tak je energetická náročnost výroby polykrystalického křemíku poměrně vysoká, a tak je často využíván na výrobu běžných solárních panelů odpadní křemík z výroby jiných polovodičových součástek s nižší účinností (Reinders 2017).

3.2.2.1.3 Pásový polykrystalický křemíkový článek

Můžeme se setkat i s pásovou variantou polykrystalického článku. Odlišnost spočívá ve výrobním procesu, kde je eliminována ztráta řezáním plátků z ingotu. Pásová metoda výroby umožňuje táhnout fólii o tloušťce výsledného článku přímo z taveniny, která se následně řeže laserem na výsledný tvar. Tento pásový polykrystalický křemíkový článek vzhledem odpovídá monokrystalickému křemíkovému článku. Vzhledem k úspoře se jedná o nejvýhodnější křemíkový článek na energetickou náročnost (Haselhuhn 2010).

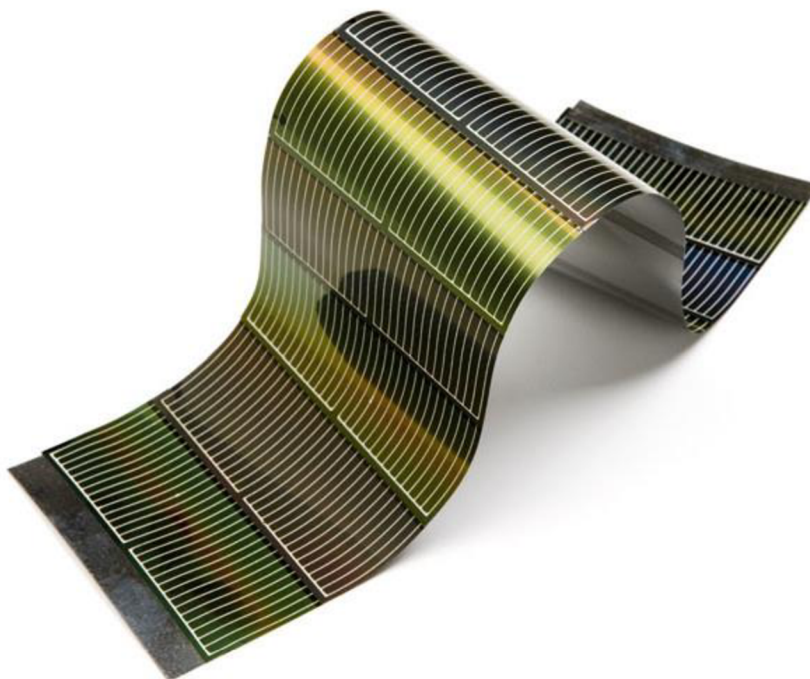
3.2.2.2 Tenkovrstvé články

Tyto články spojuje proces výroby, kdy se na polymer, kovovou fólii nebo sklo nanáší několikamilimetrová vrstva, která je solárním článkem. Již při výrobě se články elektricky propojují a vzniká tedy FV panel. K vytvoření elektrických kontaktů se využívá vrstva oxidu kovu, který se nanáší za pomoci ultrafialového záření laseru. Nejčastěji se můžeme setkat s oxidem zinku, cínu či india (Bartlome et al. 2010).

3.2.2.2.1 Amorfni křemíkový článek

Amorfni křemíkový článek je zástupce tenkovrstvých solárních článků a zároveň prvním zástupcem úspěšného komerčního využití tenkovrstvých solárních článků. Od konce 70. let minulého století se začaly objevovat v malé spotřební elektronice, jako jsou například hodinky a kalkulačky. Nejsou vyráběny jednotlivé články jako u krystalických materiálů, ale vyrábí se najednou celé moduly (Obrázek 22) (Reinders 2017).

Článek se vyrábí ve vodíkové atmosféře pomocí rozkladu vhodných sloučenin jako dichlorsilan nebo disilan. Vysokofrekvenční napětí se přivádí do plazmového reaktoru a při teplotě 250 °C se provede vhodná dotace. Je nutné vložit mezi vrstvu P a N ještě nedotovanou vrstvu, ve které bude docházet k vytváření náboje. Vznikají tenké vrstvy křemíku nanesené na plastových, skleněných nebo nerezových plátech. Spotřeba materiálu je až tisíckrát menší než u krystalického křemíku. Nanesený amorfni křemík nemá pravidelnou strukturu a obsahuje malé množství vodíku. Článek nemá příliš vysokou účinnost, která se pohybuje okolo 5 až 7 % (Murtinger et al. 2008).



Obrázek 22: Tenkovrstvý fotovoltaický panel (Newelectronics 2022)

Poruchovost amorfního křemíku je však větší než u monokrystalického. Je to zapříčiněno tím, že některé atomy nemohou pro nedostatek dalších atomů v okolí vytvořit vazby jako u krystalického křemíku. V těchto visících vazbách dochází následně k rekombinaci nábojů, a tedy ke snížení účinnosti. Vzhledem k faktu, že obsahují malé množství vodíku z výroby, může být vazba vytvořena právě s vodíkem a tím vzniká také tzv. vodíková pasivace. Mezi další nevýhodu můžeme také řadit nestabilitu při vystavení slunečnímu záření, která v druhé polovině prvního roku zapříčiní pokles výkonu o cca 25 %. Tato degradace světlem se označuje jako Staebler-Wronskiho efekt (Reinders 2017).

Výhodou článku je jednak nízká cena, ale také jeho malá tloušťka a ohebnost, která umožňuje instalace na nejrůznější nepravidelné budovy nebo dokonce oblečení. Je také možné pro zvýšení účinnosti skládat více vrstev přes sebe a vznikají tak tandemové FV články. Každá vrstva se optimalizuje na rozdílné vlnové délky slunečního záření (Haselhuhn 2010).

3.2.2.2.2 CdTe články

Technologie výroby CdTe tenkovrstvých článků je nejméně náročná na výrobní náklady. Články teluritanu kademnatého mají zelené až černé zbarvení a homogenní strukturu. Nanášejí se na sklo o síle 3 mm. Článek díky materiálu dosahuje ideální vzdálenosti E_V a E_C o velikosti 1,44 eV a absorbuje velké množství slunečního záření. Účinnost se pohybuje okolo 15 až 17 % a může překonat i klasický monokrystalický křemíkový článek. Při laboratorních podmínkách dosahuje k efektivitě 22 % (Haselhuhn & Maule 2017).

Negativem těchto článků je samotná přítomnost kadmia. Tento těžký kov je vysoce toxický a nebezpečí hrozí nejen při vdechnutí částic ze vzduchu, ale i při kontaktu s kůží. Teluru je na zemském povrchu velmi málo a vzniká jako odpadní látka při těžbě zinku. Sloučenina teluricitanu kademnatého však není jedovatá a k uvolnění kadmia dochází až při vysoké teplotě okolo 1000 °C (Murtinger et al. 2008).

3.2.2.2.3 CIS/CIGS články

Tyto tenkovrstvé články jsou tvořeny diselenidem mědi a india. Podobně jako CdTe články mají vysokou absorpci slunečního záření i při velmi tenké vrstvě. V prvním mikrometru materiálu je pohlceno 99 % slunečního záření. Mezi tenkovrstvými články dosahují nejlepší účinnosti v rozmezí 7 až 14,5 % (Haselhuhn & Maule 2017).

CIS vrstva se nanáší v tloušťce 1,5 až 2 μm na podklad ze skla, kovu nebo plastu o tloušťce 2 až 4 mm. Nejprve se podklad potáhne kontaktní vrstvou, následuje vrstva dvojselenidu mědi a india s vodivostí P. Následuje vrstva sulfidu kadmia, která má vodivost N. CIS se musí kvalitně zapouzdřit, jelikož vlhko a teplo snižuje jejich výkon. Výhodou je, že nikterak nedegradují účinkem světla (Dargel et al. 2009).

V praxi se CIS články vyrábějí ve velkých rozměrech na sklo nebo v malých částech na kovovou folii, která je následně spojována do větších celků (Haselhuhn 2010).

3.2.2.2.4 GaAs články

Vysoké účinnosti solárního článku se dosahuje při výrobě ze slitiny galia a arsenidu. GaAs článek je tenkovrstvý a ohebný a jeho účinnost dosahuje pro jeden přechod efektivitu až 28,8 %. Články navíc vykazují dobrou tepelnou stabilitu. Jsou tvarově flexibilní a můžou být různobarevné. Nevýhodou je poněkud vyšší cena (Green et al. 2016).

3.2.2.2.5 Organické články

Organické články jsou vyráběny z vrstev organických polovodičových materiálů o tloušťce menší než 100 nm. Využívá se materiálů s dobrými elektrickými, tepelnými, optickými i mechanickými vlastnostmi fungujícími na bázi uhlíku, jako například fulleren nebo grafen. Funkce těchto článků je založena na stejném principu jako fotosyntéza u rostlin. Světlo je absorbováno organickým barvivem, z jehož molekul dochází k uvolňování elektronů. Barvivo tak nahrazuje funkci křemíku. Uvolněný elektron je dále veden oxidem titaničitým (Benghanem & Almohammed 2020; Amador-Bedolla et al. 2013).

Předností článků je funkčnost i při nízké intenzitě slunečního záření. Dokonce se jejich výkon s rostoucí teplotou zvyšuje. Problémem však zůstává, že po pár letech články ztrácí účinnost (Haselhuhn 2010).

3.2.2.3 Zvyšování účinnosti článků

Zvyšování efektivity článků je důležitou cestou, jak reagovat na klimatickou změnu a další poptávku po navyšování elektrické energie ze solárních článků (Zhao et al. 2020). Vývoj FV článků se ubírá různými směry. Běžné FV články dosahují účinnosti zpravidla do 20 %. Tato účinnost je navíc ponížena o další ztráty, které vznikají při provozu a mezi které řadíme odrazivost, teplotní ztráty a ztráty dalších komponent a vodičů (Haselhuhn 2010).

3.2.2.3.1 Vícevrstvé struktury

Efektivním se ukazuje vyrábět vícevrstvé články kombinací článků z různých materiálů. Takto vyrobený článek může každou svou vrstvou (díky rozdílné energetické úrovni) pohlcovat fotony s různou energií, tedy s rozdílnou vlnovou délkou. Funkce takového vícevrstvého článku spočívá v tom, že první vrstva zachytí fotony s největší energií a ty s menší propustí do spodní vrstvy a ta opět může odfiltrvat fotony s vyšší energií a zbylé propustit do spodnější vrstvy. Vrstvy jsou společně propojeny tunelovými přechody, které jsou tvořeny P-N přechody. Příkladem může být FV článek tvořený třemi vrstvami, který dosahuje až 38% účinnosti. Článek v první vrstvě tvořené indiem, galiem a fosfidem pohlcuje fotony s absorpční hranou 1,86 eV. V druhé vrstvě tvořené indiem, galiem a arsenidem pohlcuje fotony s energií nad 1,4 eV. V poslední třetí vrstvě skládající se z germania se absorbují fotony s energií větší 0,65 eV (Quaschnig 2010).

3.2.2.3.2 Koncentrátory

Další zefektivnění vedlo cestou koncentrace sluneční energie z velké plochy do menší plochy za pomoci plastové čočky nebo zakřivené reflexní plochy (zrcadlové koncentrátory). Tento koncentrátorový systém směřuje energii slunečních paprsků dopadajících na relativně velkou plochu do plochy relativně malé a tam je energie zpracovávána pomocí FV článku (Haselhuhn 2010).

Čočkové koncentrátory se více používají ve formě Fresnelovy čočky, která je od klasické spojné čočky snáze vyrobitelná. Může být i velmi malá a dosáhnout až pětisetnásobné koncentrace. Zrcadlové koncentrátory mohou využívat rovinné či parabolické zrcadlo. Rovinné zrcadlo se snáze vyrábí, ale jeho koncentrace je nízká pod hodnotou 1,5. U parabolického zrcadla se dosahuje mnohem větší koncentrace než u rovinného, tím dochází k úspoře FV článků. Zrcadlo se však přehřívá, je nutné jej chladit a také je potřeba zajistit jeho otáčení za sluncem. Existuje ještě systém CPC, který se za sluncem otáčet nemusí a dokáže zachytit i malé intenzity slunečního záření, nevýhodou je velká spotřeba zrcadel, které se řadí za sebou a pro každý rozsah úhlu dopadajícího záření je určeno samostatné zrcadlo (Murtinger et al. 2008).

Koncentrátor však svojí konstrukcí zmenšuje úhel slunečního záření, které na něj dopadá, a také přichází o velkou část difúzního záření. Vzhledem k poměru difúzního záření v ČR je použití koncentrátoru spíše nevýhodné (Murtinger et al. 2008).

Efektivita tohoto systému závisí i na konkrétním FV článku, protože u klasických FV článků dojde k navýšení efektivity k hranici 30 %, ale v případě spojení s vícevrstevným článkem přesahuje hodnotu 45 % (Reinders 2017).

3.2.2.4 Faktory ovlivňující výkon

Existují různé faktory ovlivňující výkonnost FV článků. Ty hlavní rozdíly nám však definuje již samotný zkušební standard využívaný pro porovnávání jednotlivých článků (tzv. Standart Test Conditions), který stanovuje měření pro ozáření článku 1000 W/m^2 , AM 1,5 a teplotě $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Hodnota AM 1,5 označuje sluneční záření s hustotou energie 1 kW/m^2 . To odpovídá výšce Slunce 45° nad obzorem a průchodem záření atmosférou bez oblak (Reinders 2017).

U většiny FV článků s nárůstem provozní teploty dochází ke snižování výkonu a napětí. U krystalického křemíku je tento pokles nejvyšší a dosahuje $0,4 \%$ na každý $1 \text{ }^\circ\text{C}$. Jde tedy stanovit, že při nárůstu teploty o $25 \text{ }^\circ\text{C}$ klesne výkon o celých 10% . Teplota článku je závislá na intenzitě vystavení solární energii a na ochlazování okolím. Účinnost článku se tedy nemění jen v závislosti na ročním období, ale také v průběhu celého dne (Reinders 2017; Mertens 2019).

Faktor intenzity osvětlení článku je převážně závislý na zeměpisném umístění, které určuje nejen výkon Slunce v daném místě, ale také na oblačnosti a případných dalších faktorech ovlivňující prostupnost slunečního záření ke článkům (např. znečištění ovzduší). Znečištění ovzduší ovlivňuje výkon článku od 1 do 5% (Haselhuhn 2010; Iqbal 1983).

3.2.3 Fotovoltaický panel

Fotovoltaický panel vzniká sloučením několika do série zapojených fotovoltaických článků. Napětí, které vzniká na přechodu P-N u běžného křemíkového článku, dosahuje $0,5$ až $0,6 \text{ V}$ a pro lepší využití článků je tedy potřeba provést řetězení do FV panelů. Spojování probíhá připájením výstupních kontaktů jednoho článku se zadními kontakty článku druhého, tomuto spojení se říká sériové. Vhodnou volbou sériovo-paralelního spojení lze dosáhnout standardních hodnot napětí 12 V , 24 V , 36 V nebo 48 V , které jsou již dostatečné pro FV systémy. Panel obsahuje od 36 do 72 článků v různém geometrickém uspořádání. Při velkovýrobě panelů dochází k automatickému řetězení a je tak odbourána chyba ručního pájení kontaktů (Haselhuhn & Maule 2017).

Propojené krystalické články do panelu je potřeba vhodně zapouzdřit do spojového materiálu, který musí nejen spojovat, ale také chránit před vlhkostí, elektricky izolovat a v neposlední řadě také chránit před mechanickým poškozením. Spojový materiál musí propouštět samozřejmě maximum možného světelného záření. Všechny tyto schopnosti by neobstaral jeden materiál, a proto je vršek křemíkových FV panelů tvořen pevným sklem odolným proti nárazům. Následně se aplikuje fólie z ethylvinylacetátu (dále jen „EVA“), za kterou jsou již samotné FV články a následuje opět EVA fólie, pod kterou je krycí fólie

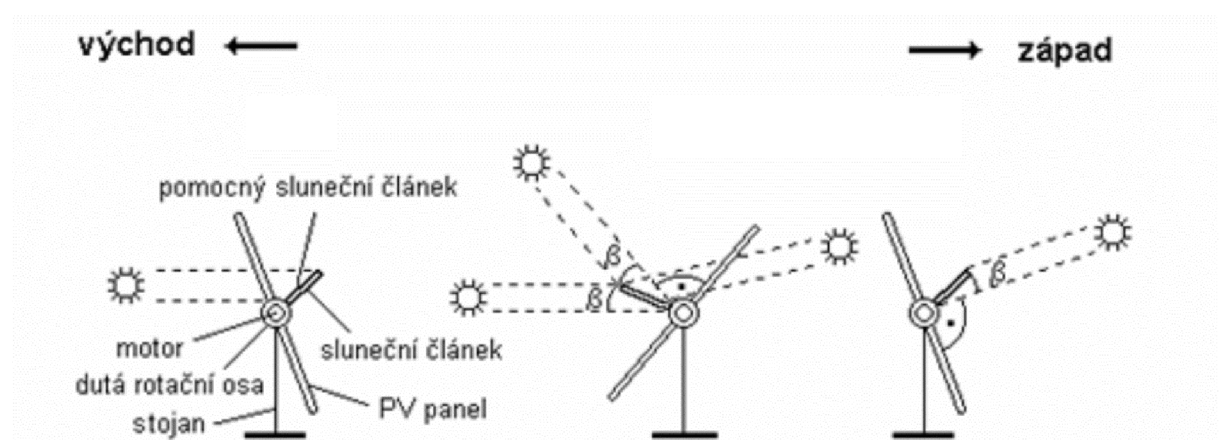
tvořená zpravidla z PVF-PET-PVF (polyvinylidenfluorid-polyetyléntereftalát-polyvinylidenfluorid). Z celého panelu se odčerpá vzduch a zahřeje se na teplotu potřebou k roztavení EVA fólie. EVA se rozteče a vyplní veškerý prostor mezi FV články a sklem. Celý komplet je opatřen hliníkovým rámem, který brání mechanickému poškození či teplotní roztažnosti jednotlivých částí. Na zadní straně nechybí ani box určený pro výstupní kontakty (Libra & Poulek 2010).

I v oblasti zapouzdření FV panelů lze hledat různé alternativy. V současné době nejvíce využívaný kompozit EVA disponuje řadou nevýhod, mezi které řadíme degradaci materiálu, nestabilitu optických vlastností či vznik těkavých látek při vakuové laminaci. Tento materiál by se dal vyměnit za vhodnější polysiloxanový gel, který by prodloužil životnost FV panelů až na 50 let a došlo by tedy téměř k zdvojnásobení životnosti FV panelů (Libra et al. 2018).

Důležité pro maximální výnosnost FV panelů je jejich správné umístění v dané lokalitě. Je potřeba panel správně orientovat vůči Slunci a také předejít nebo omezit jeho zastínění. Maximální účinnosti FV panelů můžeme dosáhnout v našich zeměpisných podmínkách natočením panelu nejlépe na jih či jihovýchod nebo jihozápad pod úhlem 35° (Haselhuhn 2010).

V některých regionech Číny se podle studie Impacts of climate change on photovoltaic energy potential: A case study of China očekává do roku 2080 zhoršení výtěžnosti slunečního záření o více než 6 %. Tyto budoucí klimatické změny nebudou probíhat pouze v zdokumentované Číně, ale dají se očekávat na celé planetě. Je tedy více než vhodné při umísťování panelů racionálně vybírat místa instalací (Zhao et al. 2020).

Zvýšit účinnost FV panelů můžeme i pomocí systémů, které panel vhodným způsobem natačí za slunečními paprsky (Obrázek 23). Tomuto otočnému zařízení, které sleduje slunce na obloze, se říká tracker. Otáčení může probíhat podél jedné osy, ale existují i dvouosé trackery, u kterých se výsledná produkce elektrické energie zvýší až o 35 % (Poulek & Libra 2006).



Obrázek 23: Schéma otáčení dvouosého trackeru Traxler (Poulek & Libra 2006).

Při použití dvouosého trackeru jsou panely při svítání natočeny k západu a jejich přetočení k východu nastane ve chvíli, kdy energie dopadající na pomocný panel dosáhne potřebné hraniční hodnoty. Kolektory následně Slunce nesledují, protože motory nemají dostatečnou sílu k orientaci. S dalším postupem Slunce po obloze směrem k západu dojde k postupnému přetáčení panelu až do jejich výchozí polohy (Poulek & Libra 2006).

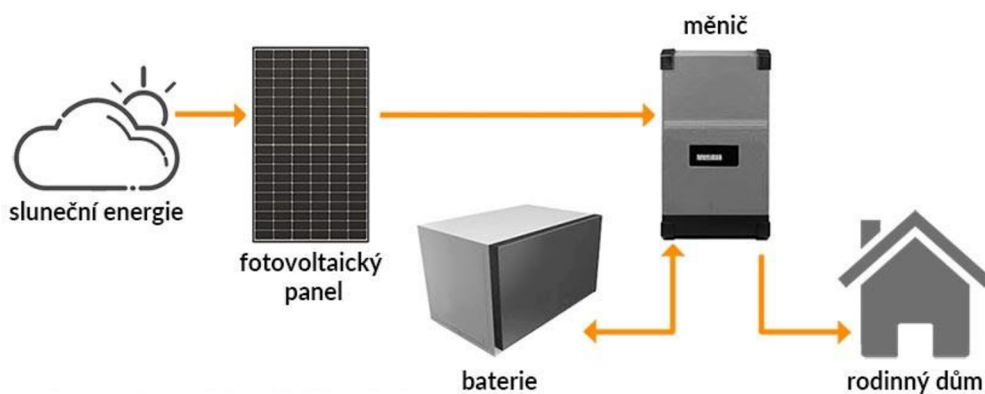
3.2.4 Fotovoltaické systémy

Fotovoltaické systémy je možné rozdělit na tři základní skupiny podle toho, zda jsou připojené do rozvodné sítě či nikoliv a poslední možností je kombinace těchto dvou variant, tzv. hybridní systém, který je ostrovním systémem a může využít i další zdroj energie, kterým může být např. rozvodná síť (Haselhuhn & Maule 2017).

3.2.4.1 Off-grid systém

Ostrovní systémy jsou samostatné systémy, které nejsou připojeny do elektrické sítě. Hlavní součástí takového systému je baterie, do které se ukládá přebytek elektrické energie v době, kdy na systém dopadá sluneční záření, aby v době, kdy na systém nedopadá sluneční záření (např. v noci nebo při oblačnosti) mohlo dojít k jejímu čerpání. Mezi hlavní výhody řadíme nezávislost na distribuční síti. Tento systém se hojně využívá v rozvojových zemích bez pokrytí elektrické sítě, kde může sloužit k čerpání vody, osvětlení domů nebo chlazení (Haselhuhn & Maule 2017).

Pokud hovoříme o průměrném domu v ČR, pokrytí střechy panely nepostačuje spotřebě elektrické energie při vytápění v zimním období nebo ohřevu teplé vody. Ostrovní systém krom FV panelů obsahuje měnič a baterii (Obrázek 24). Setkat se s ostrovním systémem můžeme dále například u drobné elektroniky jako kalkulaček, hodinek a podobně (Murtinger et al. 2008).

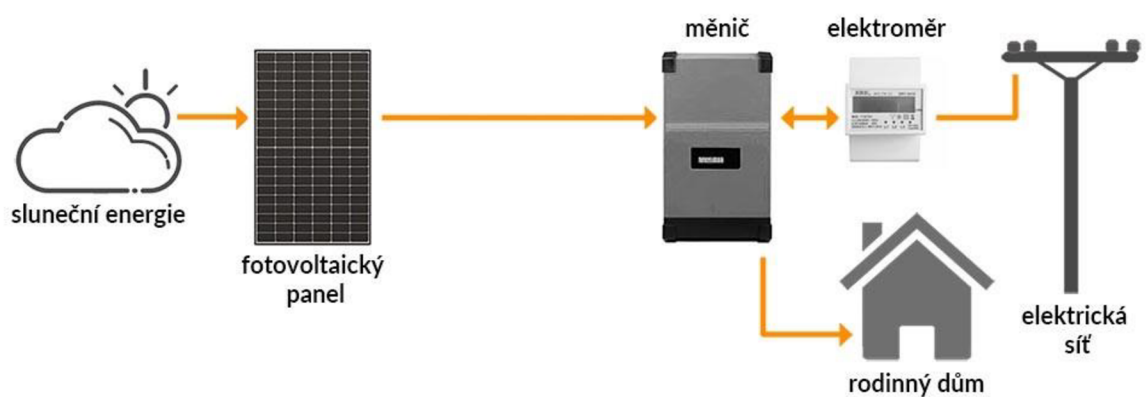


Obrázek 24: Off-grid systém (DJSarchitecture 2022)

3.2.4.2 On-grid systém

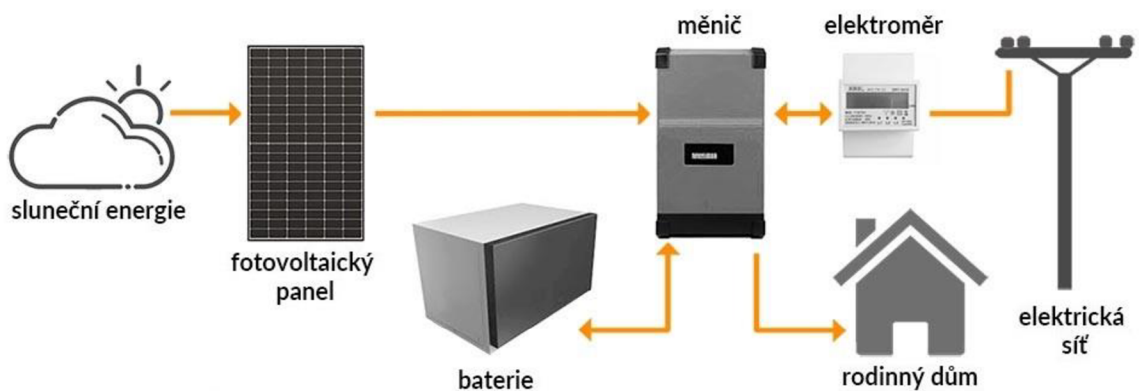
Systém připojení k rozvodné síti řeší problém, co s přebytkem nespotřebované elektrické energie, kterou je možno dodat právě do rozvodné sítě, nebo co dělat při nedostatku elektrické energie (Obrázek 25). Tímto způsobem je připojena většina komerčních elektráren (Haselhuhn & Maule 2017).

Pro tento způsob připojení FV systému rodinného domu je nevýhodné to, že nespotřebovaná elektřina přes den musí být odevzdána do sítě a není možné ji uložit do baterie a využít později. Toto připojení je výhodné v případě, že běžné spotřebiče spotřebují veškerou vyrobenou energii a je vhodný pro malé FV systémy (Murtinger et al. 2008).



Obrázek 25: On-grid systém (DJArchitecture 2022)

3.2.4.3 Hybridní systém



Obrázek 26: Hybridní systém (DJArchitecture 2022)

Tento systém kombinuje výhody off-grid systému a on-grid systému. Do systému připojeného k rozvodné síti se přidává bateriové uložení a hybridní střídač akumuluje přebytek elektrické energie do baterií, ze kterých elektrickou energii primárně čerpá (Obrázek 26). V případě nedostatku nebo přebytku nad rámec baterií využije rozvodnou síť. Mezi hlavní nevýhody řadíme pořizovací náklady na bateriové uložení, které ale umožňuje maximální využití vyrobené elektrické energie (Murtinger et al. 2008).

3.2.4.4 Měnič

Měnič, někdy nazývaný také invertor nebo střídač, přeměňuje stejnosměrné napětí od fotovoltaických panelů o velikosti 12 nebo 24 V na střídavé napětí používané v elektrické rozvodné síti o velikosti 230 V (může se jednat také o 400 V). Hlavním parametrem měniče je jeho účinnost, která říká, kolik střídavého proudu na výstupu obdržíme ze stejnosměrného proudu na vstupu. Výrobci udávají účinnost v hodnotách 90 až 98 % (Murtinger et al. 2008).

Dalším důležitým parametrem u střídače je sledování bodu maximálního výkonu, který vypovídá o schopnosti sledování optimálního pracovního bodu FV panelů. Pokud je bod sledován špatně, negativně to ovlivňuje výnos elektrické energie ze systému (Haselhuhn & Maule 2017).

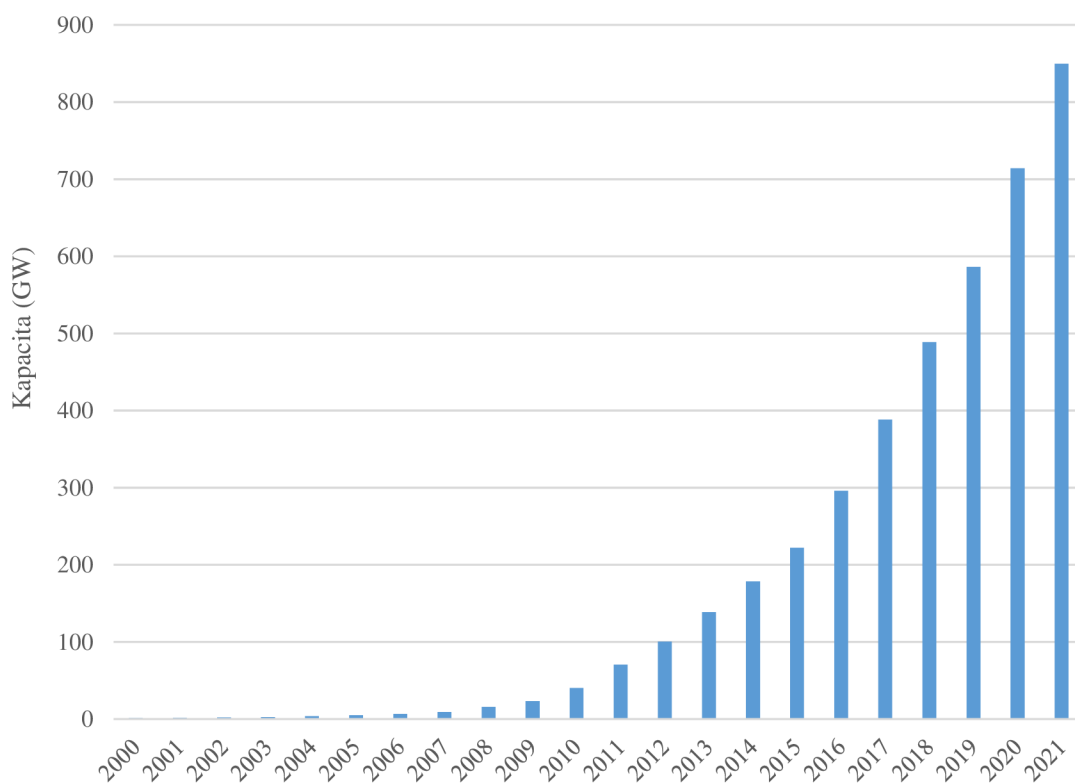
3.2.4.5 Akumulátor

Mezi základní nároky kladené na akumulátory u FV systémů patří především vysoká schopnost akumulace, stálost v cyklickém provozu a opakované nabíjení. V dnešní době existuje celá řada akumulátorů, jako jsou alkalické nebo lithium-iontové, a přesto se stále u FV systémů využívá nejčastěji klasický olověný akumulátor. Technologie olověných akumulátorů je dlouho známá a nedá se tedy očekávat výrazné zlepšení. Olověný akumulátor má životnost cca 10 let a ztráta nabíjení se pohybuje okolo 10 %. Přesto je využívání této baterie nejvýhodnější především pro nízké samovybíjení, možnost optimalizace pro úplné vybití a samotný fakt, že nemají tzv. paměťový efekt (Murtinger et al. 2008).

3.2.5 Trendy

3.2.5.1 Instalovaný výkon a cena

Celosvětový růst instalované solární kapacity je již řadu let exponenciální. Zcela pravidelně dochází k meziročním rekordním nárůstům nově instalovaného výkonu, a to nepřetržitě již od roku 1990 (s jedinou výjimkou roku 2012) (Obrázek 27). International Renewable Energy Agency (dále jen: „IRENA“) uvádí, že z hodnoty 105 MW, které dosahoval v roce 1992, se instalovaný výkon zvýšil na hranici 850 GW ke konci roku 2021. Neustále pokračující dramatický nárůst nově instalovaného výkonu nejlépe demonstruje fakt, že více než 55 % výkonu z aktuálně provozovaných FV elektráren bylo zprovozněno po 1. lednu 2018, tj. v posledních čtyřech letech (IRENA 2022).



Obrázek 27: Celosvětový nominálního kumulativní instalovaný výkon solárních panelů (zpracováno podle IRENA 2022)

Celosvětově je dnes největším producentem energie ze solárních panelů Čína, která se do čela tohoto pomyslného žebříčku dostala v roce 2015, kdy předběhla do té doby vedoucí Německo. Historicky však, až do roku 1996, vládly s největším instalovaným výkonem Spojené státy americké, které v letech 1997 až 2004 vystřídalo na čele žebříčku v instalovaném výkonu Japonsko (IRENA 2022).

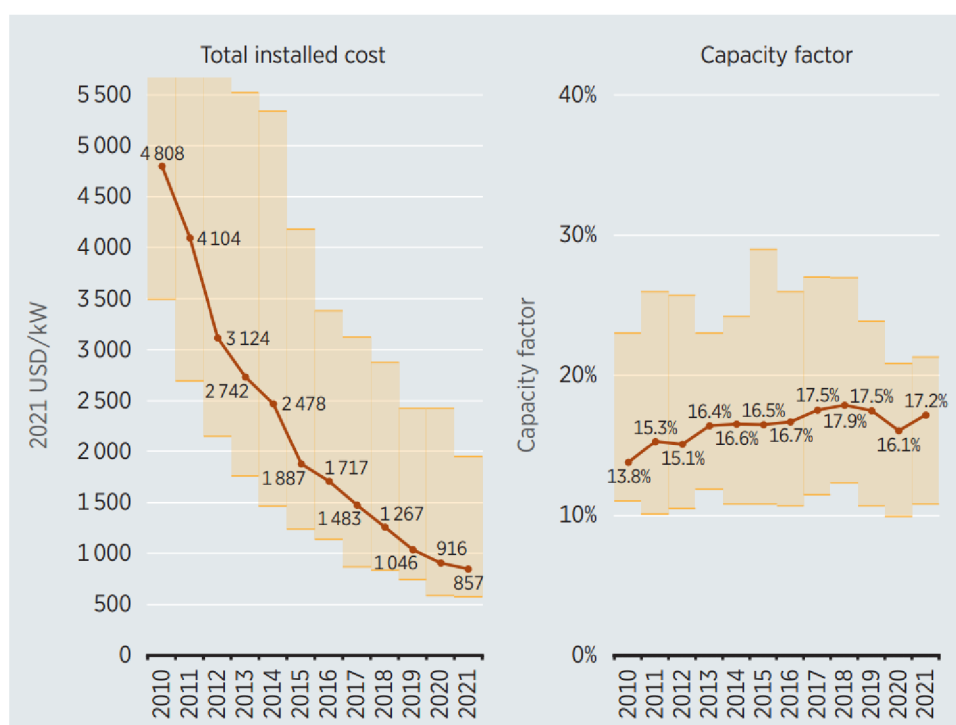
Čína zároveň investovala v rámci poslední „pětiletky“ od roku 2016 do výstavby nových solárních elektráren částku 145 miliard USD. Touto rozsáhlou investicí se výrazně osamostatnila na čele a dosáhla instalovaného výkonu 254 GW na konci roku 2021. Druhá příčka pak aktuálně patří USA, které mají instalovaný výkon „pouhých“ 74 GW. Pro srovnání je ve všech 27 zemích EU instalovaný výkon 150 GW (IRENA 2022).

Celosvětový exponenciální nárůst celkového výkonu FV panelů je také dobře patrný z časového snímku největších solárních elektráren na světě (Tabulka 1). Aktuálně největší solární elektrárna Bhadla Solar Park leží v Indii a její instalovaný výkon dosahuje 2 245 MW (Lackner et al. 2022), což je výkon srovnatelný s jadernou elektrárnou Temelín o výkonu 2 250 MW (Drábová & Pačes 2014).

Tabulka 1: Časový snímek největších solárních elektráren ve světě (zpracováno podle Lackner et al. 2022)

Rok	Název solární elektrárny	Země	Kapacita (MW)
2005	Bavaria Solarpark (Mühlhausen)	Německo	6
2006	Erlasee Solar Park	Německo	11
2008	Olmedilla Photovoltaic Park	Španělsko	60
2010	Sarnia Photovoltaic Power Plant	Kanada	97
2011	Huanghe Hydropower Golmud Solar Park	Čína	200
2012	Agua Caliente Solar Project	USA	290
2014	Topaz Solar Farm(b)	USA	550
2015	Longyangxia Dam Solar Park	Čína	850
2016	Tengger Desert Solar Park	Čína	1547
2019	Pavagada Solar Park	Indie	2050
2020	Bhadla Solar Park	Indie	2245

Rozvoj a celkový instalovaný výkon podporuje stále klesající výrobní cena solárních článků. V sedmdesátých letech minulého století se cena pohybovala okolo 80 USD za jeden instalovaný Watt a dnes se pohybuje v částce 0,86 USD/W (Obrázek 28). Zvyšující se účinnost z 13,8 % v roce 2010 na 17,2 % v roce 2021 (Obrázek 28) umožňuje instalaci FV panelů i na místa, o kterých se v minulosti nemohlo, v souvislosti s instalací solárních elektráren, vůbec uvažovat (IRENA 2021).



Obrázek 28: Průměrná cena a efektivita instalovaných FV panelů ve světě (IRENA 2021)

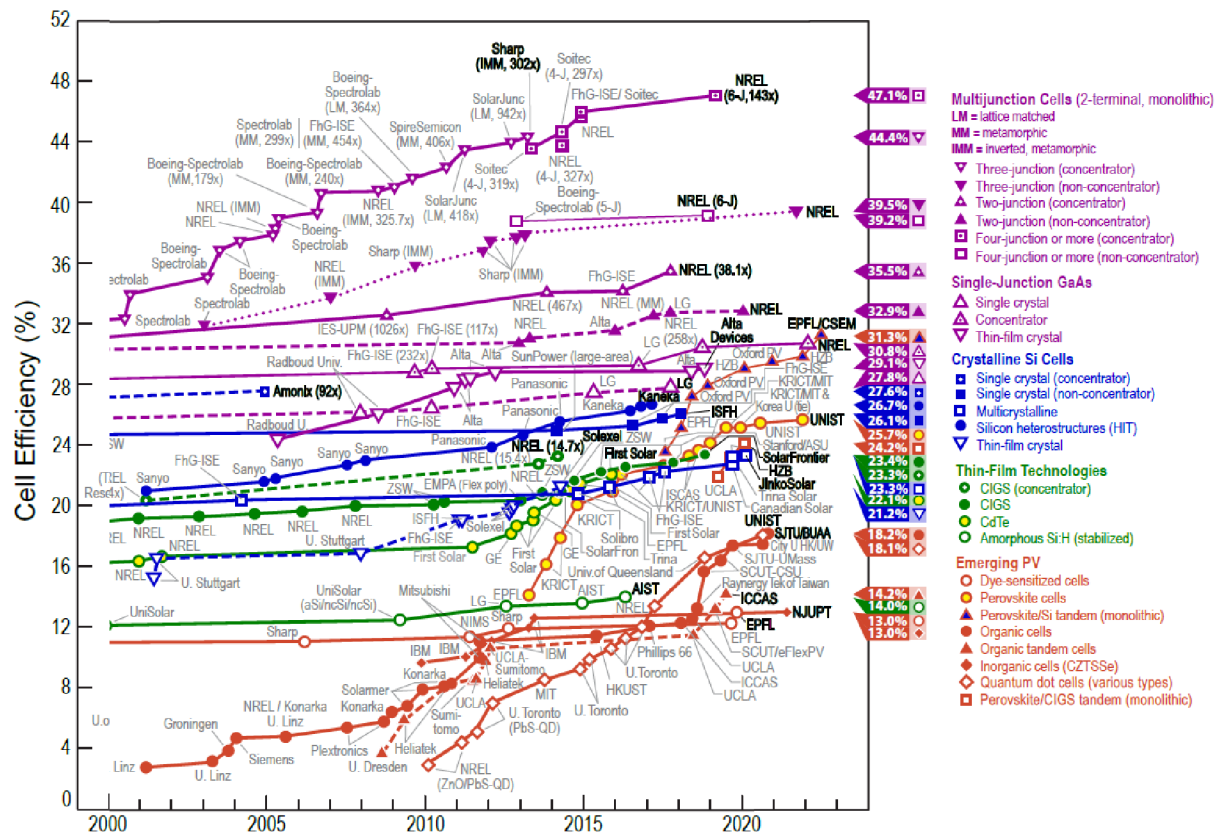
Popsaný nepřetržitý klesající trend výrobních nákladů platí stále, přesto však v roce 2021 došlo k nárůstu průměrných instalačních nákladů FV panelů v důsledku celosvětového narušení dodavatelsko-odběratelských řetězců (IRENA 2022).

3.2.5.2 Výzkum a vývoj FV technologií

Průměrný komerční solární článek dosahoval v poslední dekádě 2010–2020 efektivity okolo 15 % (Obrázek 29), což znamená, že pouze 1/6 sluneční energie dopadající na FV článek generuje elektřinu. Rozvoj a vylepšení efektivity solárního článku za podmínky udržení jeho nízké výrobní ceny je tedy stále důležitým cílem FV průmyslu (Mohanty et al. 2015).

Financování výzkumu a vývoje FV článků probíhá ve velké míře z veřejných rozpočtů, vlády jednotlivých zemí pečlivě zvažují podporu konkrétní technologie, jejíž výzkum a vývoj se rozhodnou podpořit. V současné době stoupá trend podpory tenkovrstvých článků na úkor dříve preferovaného krystalického článku. Do rozvoje FV článků nejvíce investují USA, Německo, Korea, Čína, Japonsko a Austrálie, a to v celkové roční sumě v řádu desítek miliard USD (Mohanty et al. 2015).

Není bez zajímavosti, že 90 % takto vynakládaných finančních prostředků z veřejných rozpočtů směřuje do rozvoje již objevených a vyvinutých technologií a pouze 10 % je soustředěno na výzkum a vývoj nových druhů FV článků (Mohanty et al. 2015). Podrobný přehled výzkumu od roku 1975 je uveden v příloze 1.



Obrázek 29: Efektivita FV článků (NREL 2022)

Aktuálně světově nejefektivnější článek vyvinuli v National Renewable Energy Laboratory (NREL), jejichž Six-junction cell s využitím koncentrátoru se blíží k výkonu dosahujícímu 50 %. Tento solární článek je držitelem světového rekordu pro nejefektivnější solární konverzi na úrovni 47,1 %. Tento Six-junction cell je tvořen 6 různými FV články, přičemž každý článek je určen k zachycení slunečního záření o různé vlnové délce. Celkově obsahuje 140 vrstev z různých materiálů, přičemž tento Six-junction cell je v konečném důsledku užší než lidský vlas (Geisz et al. 2020).

3.2.5.3 Vize

Neustávající vývoj a výzkum v oblasti FV je podporován tlakem na dekarbonizaci světové ekonomiky a s tím spojené celospolečenské snižování emisí CO₂, díky čemuž poskytuje nepřehledné množství inovativních materiálů ve snaze maximalizovat využití sluneční energie. V komerčním využití solární energetiky je důležitý také design (Choi et al. 2016).

Choi et al. (2016) zmiňuje, že v blízké budoucnosti se již budeme často setkávat i se solárními panely na hladinách vodních ploch. Tento systém plovoucích panelů bude šetřit půdu, kterou by jinak FV panely zabíraly na zemi. Již je instalována první plovoucí FV elektrárna na území ČR, a to pilotní plovoucí elektrárna umístěná na horní přečerpávací nádrži Štěchovické elektrárny (Obrázek 30). Nádrž by mohla celkově pojmout FV články o celkovém výkonu 2,5 MW, ale současná instalace má výkon pouze 0,1 MW (ČEZ, a. s. 2022).



Obrázek 30: První plovoucí FV elektrárna na území ČR (ČEZ, a. s. 2022)

Solární panely budou více integrovány do klasických materiálů a stavebních prvků, jako je např. střešní krytina nebo skleněné plochy. Tato integrace umožní, aby integrovaný FV systém do skla propustil do budovy, ať už obytné či kancelářské, přirozené světlo, a navíc generoval energii (Biyik et al. 2017).

Jako novinka byla tato technologie organického FV článku představena při světové premiéře v rámci EXPO 2015 v italském Miláně, přičemž vývoj šel dále a po několika menších instalacích v řádu několika metrů čtverečních byla v brazilském Sao Paulu postavena budova Net-zero energy building, kde bylo v roce 2020 zprovozněno již 1 800 m² těchto článků (Burgués-Ceballos et al. 2021).

Tato nově vznikající FV technologie bude doplňovat a rozšiřovat stávající možnosti na trhu a výzkum se musí více zaměřit na jednodušší integraci obvodů a možnost laditelnosti barevných odstínů. To přinese svobodu designu a učiní technologii více přitažlivou pro budoucí trh (Burgués-Ceballos et al. 2021).

3.2.5.4 Vliv instalovaného výkonu FV na klima

Vliv globálního oteplování na klimatické změny na naší planetě je neoddiskutovatelný, a proto i Evropský „Green Deal“ počítá s dosažením alespoň 55% snížení emisí skleníkových plynů do roku 2030. Tento cíl vyžaduje rychlé dosažení dekarbonizace výroby elektrické energie, z čehož vyplývá, že poptávka po čisté, zelené elektrické energii vyrobené z fotovoltaických elektráren bude i nadále stoupat. V rámci energetického mixu je volba fotovoltaické elektřiny volbou „bez lítosti“, neboť takováto elektřina je vyráběna s nejnižšími náklady. Toliko proklínaný Green Deal tak nabízí unikátní příležitost masivní expanze fotovoltaických systémů na evropský trh (Kougias et al. 2021).

Z nejaktuálnějších predikcí budoucího vývoje vyplývá, že energie pocházející ze všech v budoucnu používaných FV článků bude v rámci celosvětového energetického mixu hrát čím dál tím větší roli a bude mít tak i výrazně větší podíl v celosvětové produkci elektrické energie (IRENA 2019).

Pokud se skutečně podaří dosáhnout v roce 2050 podílu 25 % elektrické energie vyrobené ze solárních zdrojů, pak je možné konstatovat, že takovýto vývoj by pomohl lidstvu ušetřit emise CO₂ ve výši 4,9 Gt ročně, což lidstvu umožní dosáhnout v rámci celosvětového úsilí o snížení emisí skleníkových plynů výsledného dosažení cílů specifikovaných v podobě nárůstu průměrné teploty na Zemi maximálně 1,5 °C na konci 21. století (IRENA 2019).

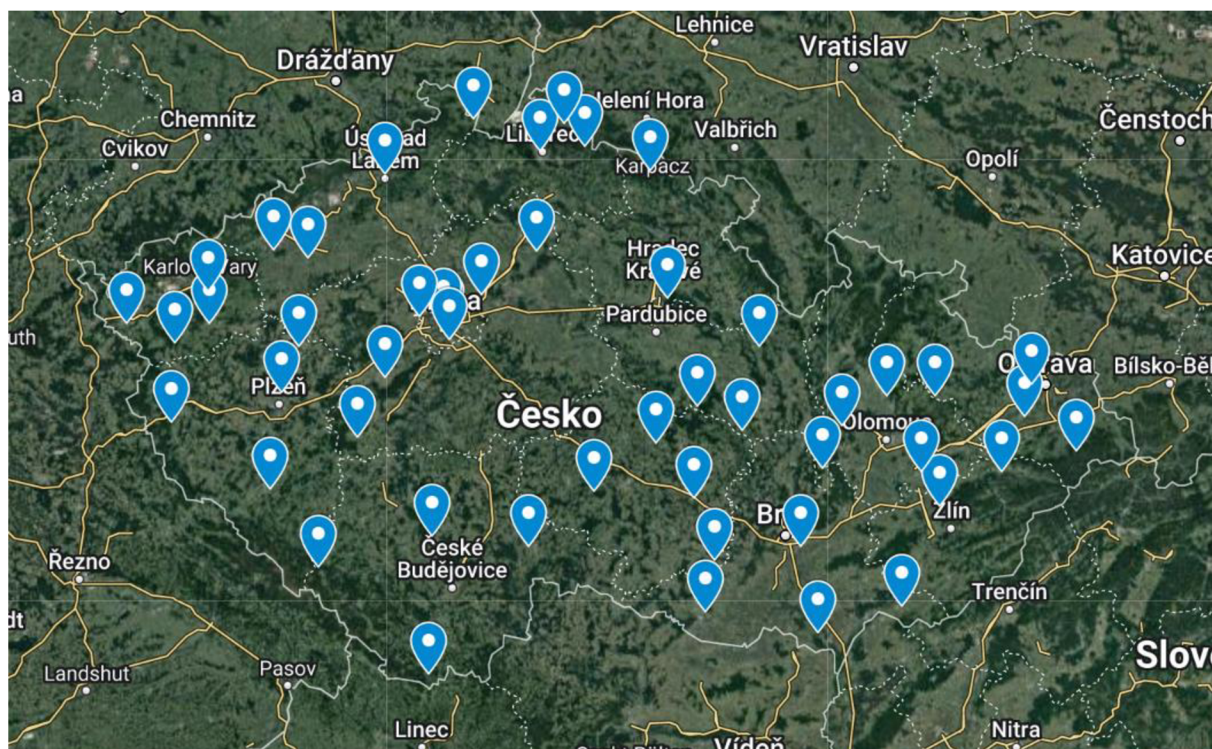
Nastíněný vývoj a 25% podíl přitom není nikterak nedosažitelný, ale naopak je poměrně reálný, neboť počítá pouze s každoročním nárůstem instalovaného výkonu o 9 % na celkových cca 8,5 GW instalovaného výkonu v roce 2050 (IRENA 2019).

4 Metodika

4.1 Výběr stanic

Informace o době trvání slunečního svitu byly získány z databáze ČHMÚ ze všech sledovaných stanic, pro které bylo možné získat ucelený datový soubor tohoto parametru pro období od r. 1991 do r. 2020 (tedy za období 30 let). Za ucelený datový soubor byl stanoven takový soubor, ve kterém byla obsažena data alespoň z 98 %. To znamená, že v období celých 30 let mohl chybět údaj maximálně pro 220 dní. Dále bylo nastaveno kritérium výběru na maximálně 4 stanice z jednoho kraje, a to tak, aby stanice měly co možná největší geografické pokrytí na mapě.

Celkem bylo vybráno 50 stanic (Obrázek 31). V příloze 2 je uveden přehled vybraných stanic rozřazených do jednotlivých krajů včetně základních údajů o zeměpisné šířce (dále jen „LAT“), zeměpisné délce (dále jen „LON“) a nadmořské výšce (dále jen „ALT“).



Obrázek 31: Mapa vybraných stanic na území ČR

V celkovém vzorku má tedy nejmenší zastoupení, a to 2 stanice, Královéhradecký kraj a Zlínský kraj. Zastoupení 3 stanic má Liberecký kraj a Pardubický kraj. Ostatní kraje mají zastoupeny 4 stanice.

4.2 Zpracování dat

4.2.1 Korekce dat

Aby se předešlo možnému zkreslení dat na jednotlivých stanicích, bylo přistoupeno k jejich korekci. Korekce spočívala v ručním doplnění hodnoty u chybějícího měření v konkrétním dnu. Pro opravu byla vždy na konkrétní stanici stanovena hodnota příslušného měsíčního průměru za celé období zkoumání dat, tedy 30 let.

Celkem došlo k opravě 300 hodnot na 9 stanicích. Korekce byla provedena v 0,53 % celkových případů. Pokud se jedná o stanici Paseka v Olomouckém kraji, kde bylo provedeno nejvíce, a to 181 korekcí, jedná se o hodnotu 1,6 %. Přehled počtu opravených dnů po stanicích ukazuje tabulka 2.

Tabulka 2: Přehled korekce dat u jednotlivých stanic

Lokalita	Kraj	Počet dnů s korekcí
Praha, Klementinum	Hlavní město Praha	5
Lednice	Jihomoravský kraj	2
Dukovany	Kraj Vysočina	2
Pec pod Sněžkou	Královéhradecký kraj	38
Desná, Souš	Liberecký kraj	48
Paseka	Olomoucký kraj	181
Svratouch	Pardubický kraj	2
Ústí nad Orlicí	Pardubický kraj	9
Žatec	Ústecký kraj	13

4.2.2 Zobrazení dat

Získaná data SSV po korekci byla podle krajů vykreslena v celém 30letém horizontu. Přestože se jedná o data úhrnu slunečního svitu, který je nespojitou veličinou, byl zvolen namísto správného sloupcového grafu graf spojnicový. Využití spojnicového grafu v tomto případě ospravedlňuje umožnění vzájemného srovnání dat z jednotlivých stanic a jeho přehlednost. Dále došlo k vypočítání ročních průměrných sum SSV za posledních 10, 20 a 30 let a jejich vyobrazení opět podle krajů v mapě ČR.

4.2.3 Analýza závislostí

4.2.3.1 Regresní analýza

Data ze všech stanic byla podrobena srovnání pomocí lineární regrese. Regresní analýza je statistickou metodou, která se na základě znalosti nezávisle, proměnné snaží odhadnout veličinu závisle proměnnou. Hodnoty na ose x jsou přesná data a hodnoty na ose y mohou být zatíženy chybou (Lepš & Šmilauer 2016).

Lineární regresní metoda předpokládá možnost proložit soubor dat v grafu spojitou přímkou, kterou můžeme vyjádřit rovnicí $y = a + bx$. Koeficient a (absolutní člen) nám udává posun přímky, tedy hodnotu, kde přímka protne osu y. Přímka může protnout osu y v počátku v případě, že je koeficient a roven 0. Koeficient b (regresní koeficient) určuje sklon přímky. V případě kladného koeficientu b hovoříme o přímé lineární závislosti a u záporného koeficientu b o nepřímé lineární závislosti (Lepš & Šmilauer 2016).

Pro nalezení optimálních koeficientů a a b bude využita metoda nejmenších čtverců, která se ostatně pro výpočet lineární regrese využívá nejčastěji. Přímka je body vedena tak, aby součet druhých mocnin odchylky změřeného bodu oproti přímce byl co nejmenší. Koeficienty se vypočítají podle rovnic:

$$a = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2},$$

$$b = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}.$$

Odvození výpočtu je uvedeno v literatuře (Anděl 2019).

Síla závislosti závisle proměnné na nezávisle proměnné je určena koeficientem determinace r^2 , který udává z kolika procent je závisle proměnná ovlivněna nezávisle proměnnou. Podle hodnoty r^2 můžeme hovořit o závislosti:

- neexistující ($r^2 = 0$),
- slabé ($0 < r^2 \leq 0,3$),
- střední ($0,3 < r^2 \leq 0,5$),
- silné ($0,5 < r^2 \leq 0,7$),
- velmi silné ($0,7 < r^2 < 1$),
- pevné ($r^2 = 1$) (Lepš & Šmilauer 2016).

4.2.3.2 Vícenásobná lineární regrese

U analýzy závislostí se můžeme setkat s možností, že jednu závislou proměnou ovlivňuje větší počet nezávisle proměnných a v takovém případě hovoříme o vícenásobné regresi. V našem případě závislosti SSV na LAT a ALT se bude jednat o dvě nezávisle proměnné, a tak zjednodušíme lineární rovnici na $y = a + b_1x_1 + b_2x_2$ (Anděl 2019).

Analýza v tomto případě bude odlišná od „jednoduché“ regrese, a to tak, že bude stanoven celkový regresní koeficient, který vypovídá o ovlivnění závisle proměnné vzájemným působením nezávisle proměnných (Anděl 2019).

5 Výsledky

Byla studována data slunečního svitu z 50 vybraných stanic nasbíraná za dobu 30 let, a to od roku 1991 až do roku 2020. Nejprve se jsou uvedeny výsledky pro průběh hodnot ročního úhrnu slunečního svitu na jednotlivých stanicích a v krajích a následují výsledky analýz jeho závislosti na zeměpisné šířce a nadmořské výšce.

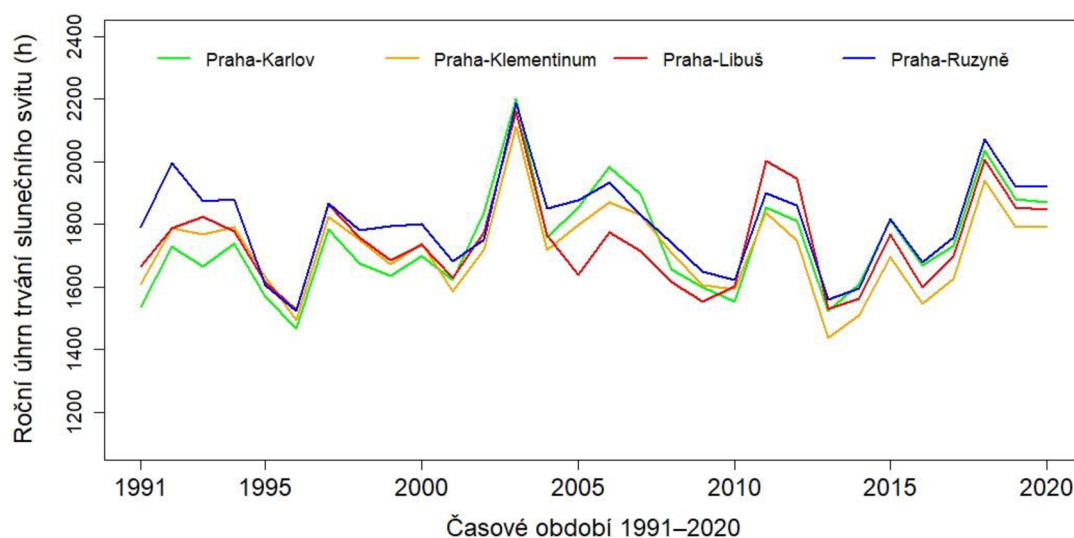
5.1 Průběh slunečního svitu za 30 let

Průběh slunečního svitu za 30 let byl zkoumán pomocí ročního úhrnu slunečního svitu, který byl nejdříve zkoumán na všech 50 vybraných stanicích. Bylo využito grafického znázornění po jednotlivých krajích. Následně byla stanovena a porovnána hodnota ročního úhrnu slunečního svitu pro jednotlivé kraje a celou ČR. Dále byla provedena analýza závislosti pomocí regresní analýzy pro každou stanicí, kraj a celou ČR.

5.1.1 Průběh SSV za 30 let na jednotlivých stanicích

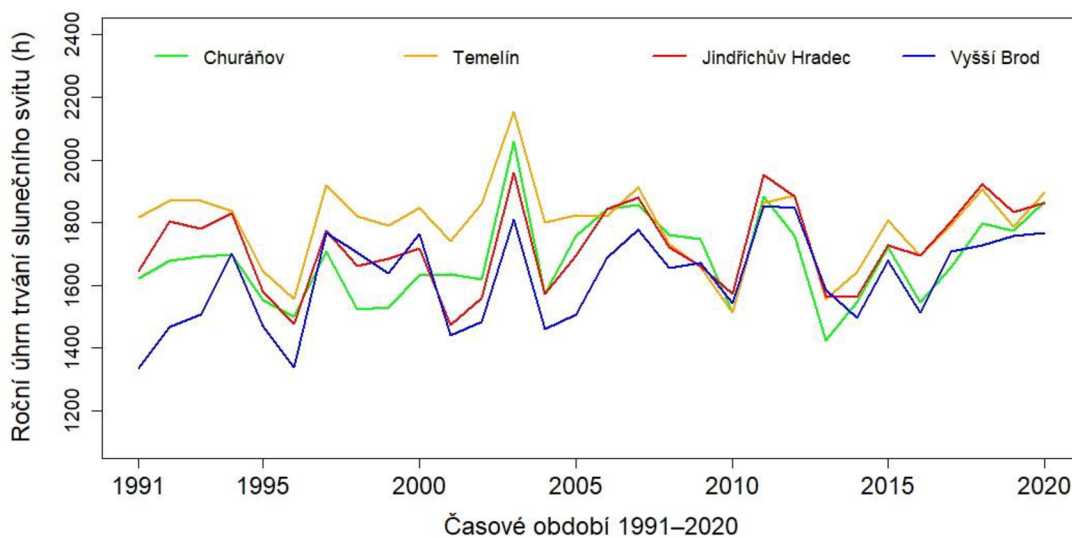
Na každé vybrané stanici došlo ke stanovení ročního průměrného úhrnu slunečního svitu za období 1991–2020. Trend vývoje průměrného ročního úhrnu slunečního svitu je vyobrazen po jednotlivých krajích (Obrázky 32–45). Průměrná roční hodnota za sledované období napříč stanicemi byla 1679 h. Za nadprůměrný téměř na všech stanicích v ČR s průměrně naměřenou hodnotou na jedné stanici 2036,4 h můžeme označit rok 2003. Rok 2013 byl oproti maximálnímu roku 2003 podprůměrným a průměrná hodnota roční naměřené hodnoty dosahovala pouze 1474,6 h na jednu stanicí.

Trend porovnání stanic v Praze (Obrázek 32) neukazuje na příliš velké rozdíly v měření, které jsou dány velmi podobnou zeměpisnou polohou vybraných stanic. Na stanici Praha, Karlov bylo v roce 2003 naměřeno roční maximum pro Prahu ve výši 2199,8 h. Roční minimum pro Prahu bylo zaznamenáno na stanici Praha, Klementinum v roce 2013 (1435,9 h).



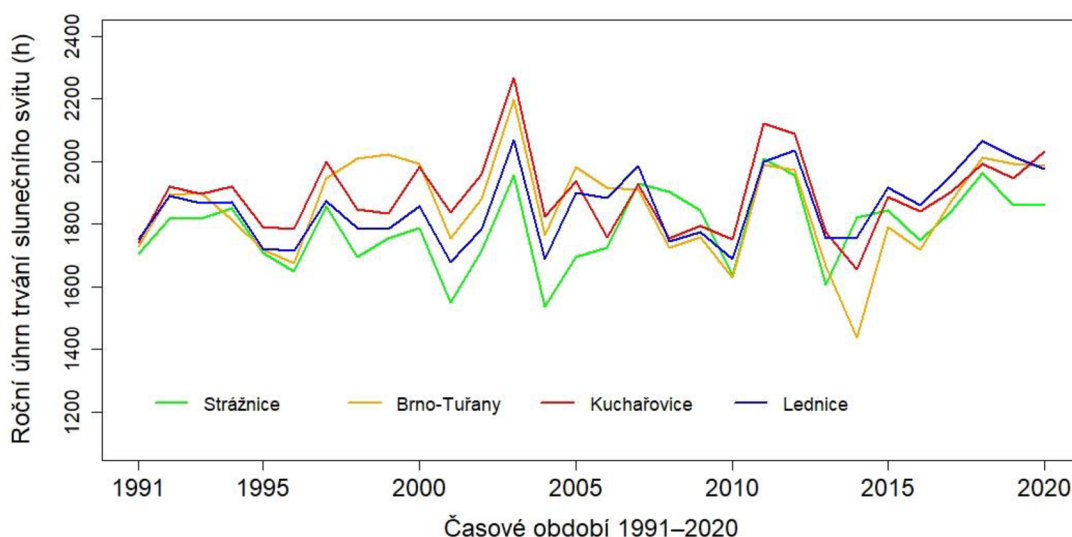
Obrázek 32: Úhrn SSV na stanicích v Praze

Oproti celorepublikovému průměru bylo minimum zaznamenáno v roce 1991 na stanici Vyšší Brod z Jihočeského Kraje (Obrázek 33). Stanice Vyšší brod ovlivňuje i průměr daného kraje, přestože většina stanic dosáhla minima v roce 2013, rokem s nejnižším ročním úhrnem trvání slunečního svitu je rok 1996. Stanice Vyšší Brod je oproti ostatním stanicím v kraji umístěna blíže k rovníku o hodnotu 0,5° a jedná se zároveň o nejjihnější stanici z posuzovaných v celé ČR.



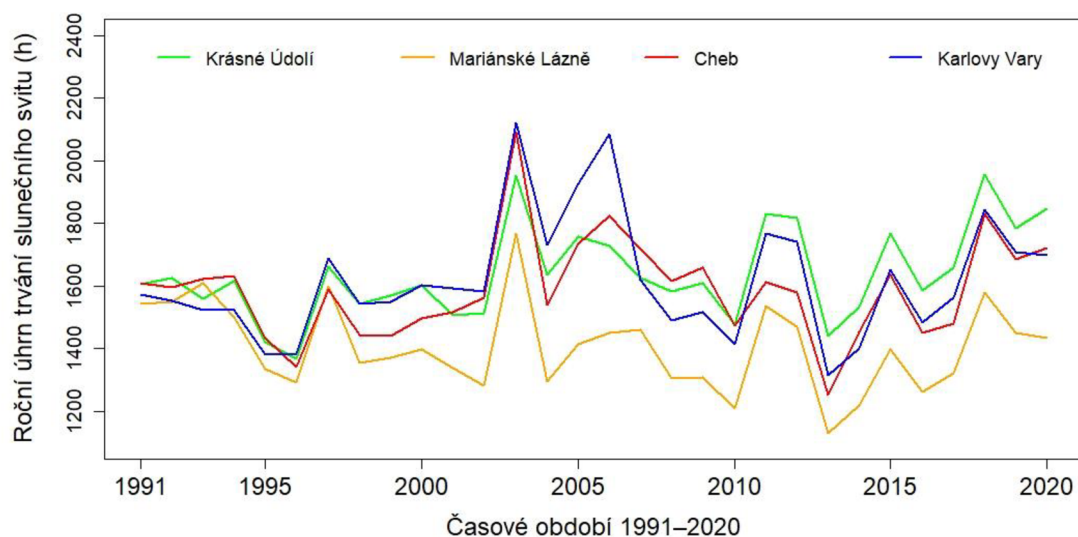
Obrázek 33: Úhrn SSV na stanicích v Jihočeském kraji

Nejvyšší roční průměr za sledovaných 30 let v ČR byl zjištěn v Jihomoravském kraji na stanici Kuchařovice (Obrázek 34) o hodnotě 1892 h. I druhý a třetí nejvyšší roční průměr náleží Jihomoravskému kraji (stanice Brno, Tuřany a Lednice).



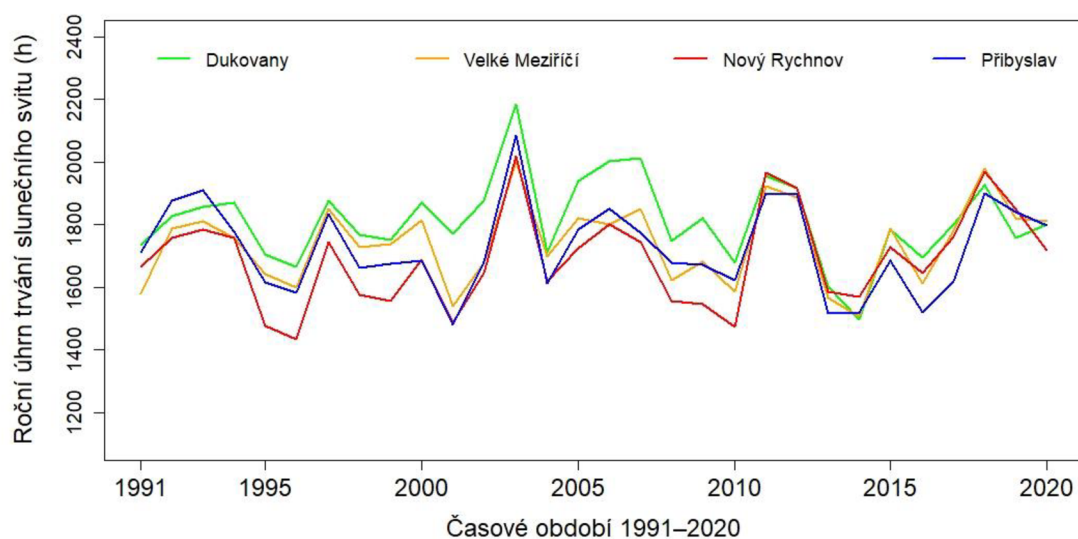
Obrázek 34: Úhrn SSV na stanicích v Jihomoravském kraji

Stanice Karlovarského kraje (Obrázek 35) odpovídají celorepublikovému průměru s minimálním a maximálním rokem. Maximální hodnota 2122,3 h byla zaznamenána na stanici Olšová Vrata v roce 2003 a minimální hodnota 1129,2 h na stanici Mariánské Lázně. Graficky znázorněné průběhy úhrnu SSV v čase nám ukazují zvyšující se rozptýl a také na první pohled viditelný rozdíl mezi stanicí v Mariánských lázních a ostatními stanicemi. Stanice v Mariánských lázních je umístěna v nadmořské výšce 700 m což je o 119 m výše než průměr ostatních stanic v kraji.



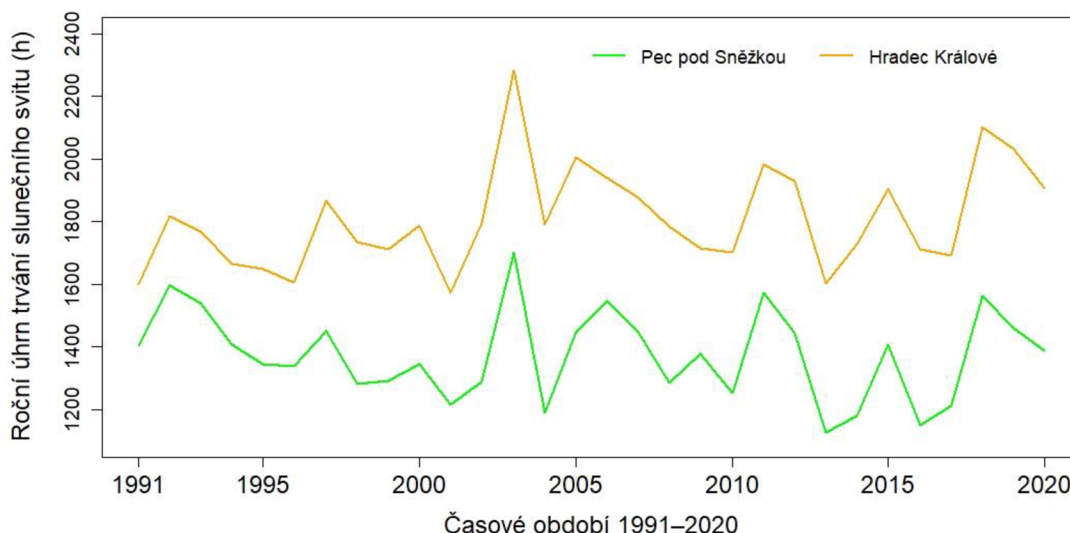
Obrázek 35: Úhrn SSV na stanicích v Karlovarském kraji

Také stanice na Vysočině dosáhli maximálních hodnot v roce 2003 s průměrnou hodnotou 2072,5 h. Přestože minimální hodnota 1433 byla naměřena v roce 1996 v Novém Rychnově, dosáhli stanice Kraje Vysočina minimální průměrné hodnoty 1523,8 v roce 2014. Průběh všech čtyř vybraných stanic nenasvědčuje v posledních 30 letech výraznému růstu či poklesu.



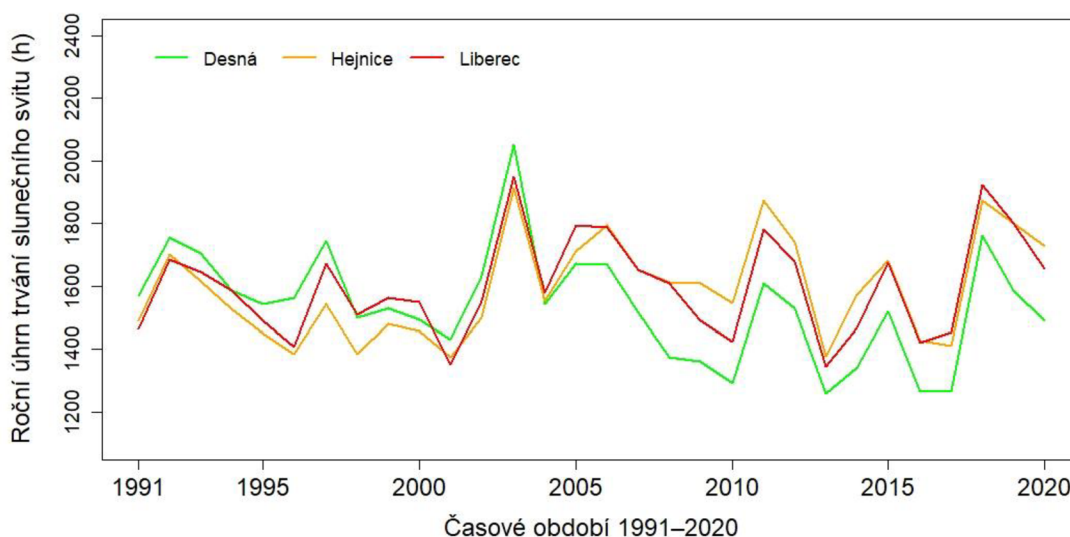
Obrázek 36: Úhrn SSV na stanicích v Kraji Vysočina

Nejmenší úhrn SSV byl zaznamenán v celé ČR v roce 2013 na stanici v Peci pod Sněžkou v Královéhradeckém kraji (Obrázek 37), a to pouhých 1126,8 h, tato stanice má i minimální průměrnou naměřenou roční hodnotu SSV za sledovaných 30 let ve výši 1374,7 h. Stanice v Královéhradeckém kraji disponují i na první pohled velkým rozptylem hodnot, který je pravděpodobně způsoben rozdílnou nadmořskou výškou s rozdílem větším než 500 m.



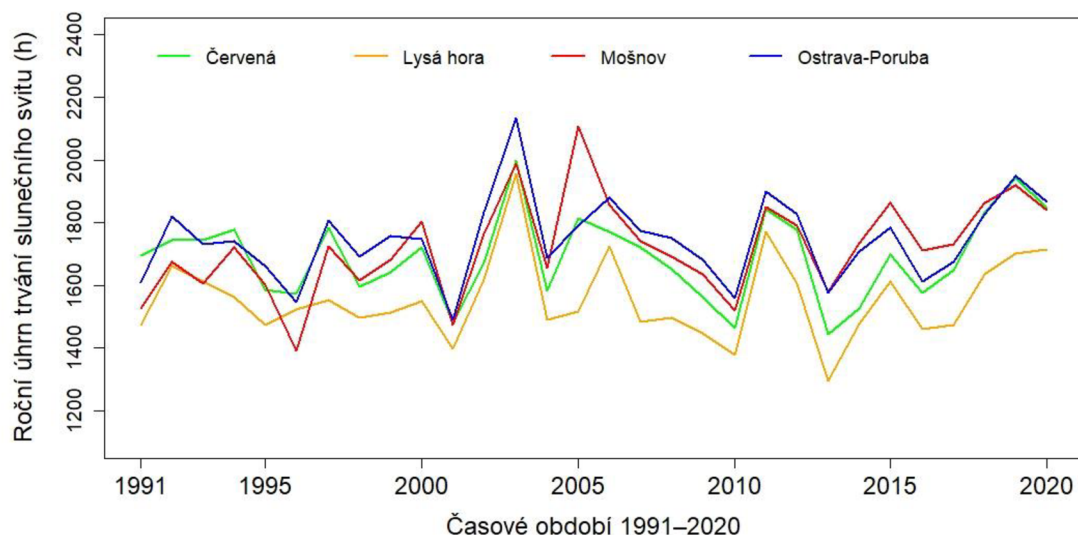
Obrázek 37: Úhrn SSV na stanicích v Královéhradeckém kraji

Maximální naměřená hodnota v Libereckém kraji 2051,4 h byla naměřena v roce 2003 na stanici Desná (Obrázek 38). Na stejné stanici v roce 2013 byla naměřena i minimální hodnota 1258,9 h. Ve zmíněných letech byl zaznamenán i minimální a maximální průměr stanic v Libereckém kraji. Stanice jsou poměrně v těsné blízkosti a rozdíl je dán nadmořskou výškou stanice Desná o 375 m větší oproti ostatním stanicím (Hejnice a Liberec), který může stát za nižšími hodnotami.



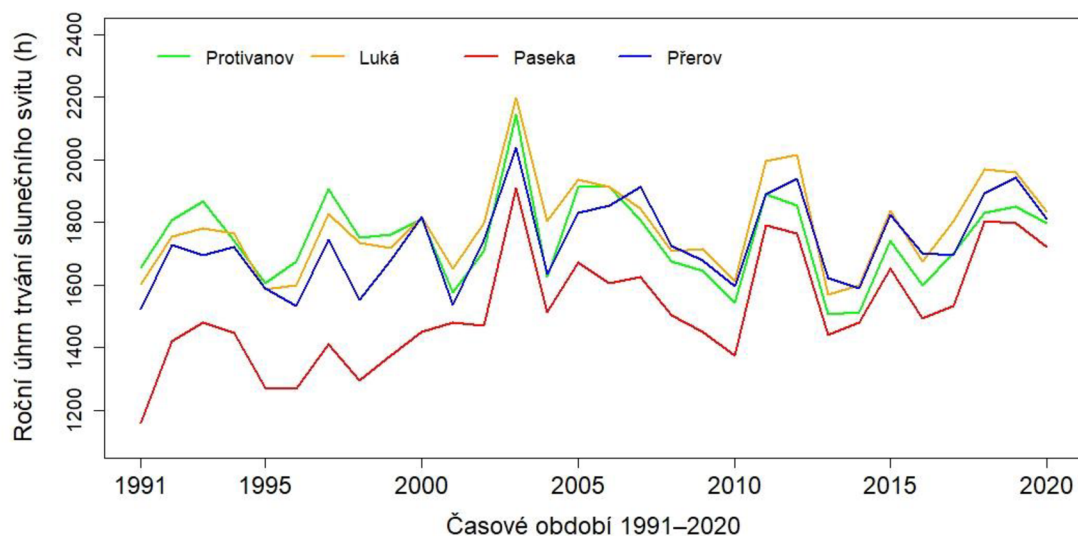
Obrázek 38: Úhrn SSV na stanicích v Libereckém kraji

V Moravskoslezském kraji byl maximální rok s hodnotou 2132,9 h zaznamenán na stanici Poruba v roce 2003, ve stejném roce byl zaznamenán i maximální průměr stanic o hodnotě 2019,1 h (Obrázek 39). Minimální hodnota ročního úhrnu v tomto kraji byla naměřena v roce 2013 na stanici Lysá hora o hodnotě 1294,8 h, přesto je minimální průměr zaznamenán o 12 let dříve (rok 2001) o hodnotě 1460,8 h. Znárodnění hodnot nám ukazuje že nejnižších hodnot bylo dosahováno na stanici Lysá hora s nadmořskou výškou 1325 m.



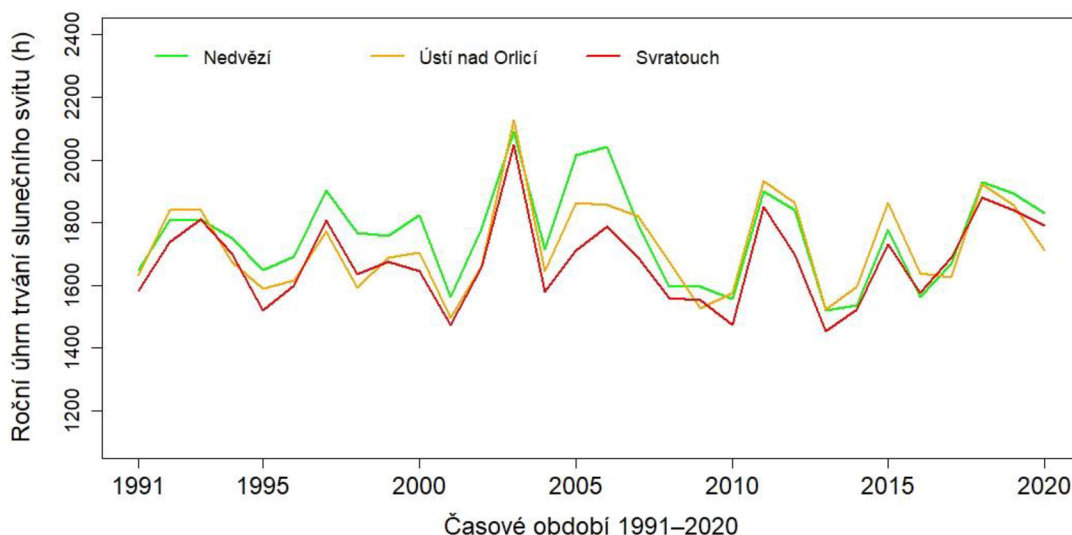
Obrázek 39: Úhrn SSV na stanicích v Moravskoslezském kraji

V Olomouckém kraji byla zaznamenána maximální roční hodnota úhrnu SSV o délce 2195,6 h na stanici Luká v roce 2003. V tomto roce byla zaznamenána i největší průměrná hodnota stanic tohoto kraje o velikosti 2072 h (Obrázek 40). Minimální hodnota 1485,5 h nebyla zaznamenána v roce 2013, ale již v roce 1991 ovlivněním velmi nízké hodnoty 1158 h na stanici Paseka. Průběh hodnot u této stanice vykazuje nepřehlédnutelný nárůst hodnot v čase.



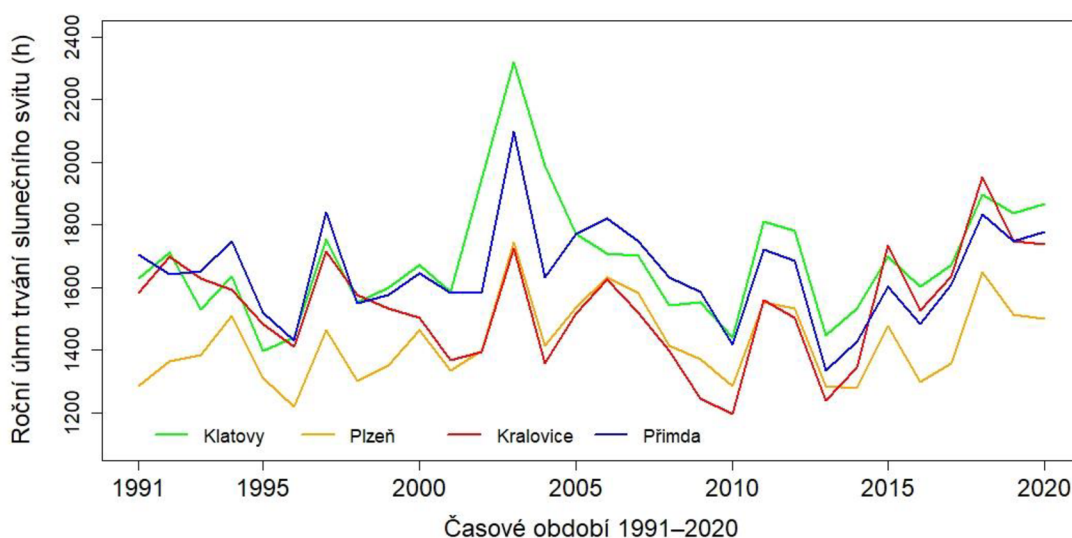
Obrázek 40: Úhrn SSV na stanicích v Olomouckém kraji

V Pardubickém kraji opět můžeme konstatovat, že rok 2003 byl s průměrnou hodnotou stanic 2089,1 h nadprůměrným a naopak rok 2013 s průměrnou hodnotou 1499,8 h podprůměrným (Obrázek 41). Maximální roční hodnota 2126,5 byla zaznamenána opět v roce 2003 a to na stanici Ústí nad Orlicí a minimální roční hodnota 1454,3 byla zaznamenána na stanici Svatouch. Stanice nevykazují příliš velký rozptyl, přestože rozdíl v nadmořské výšce u stanic přesahuje 320 m.



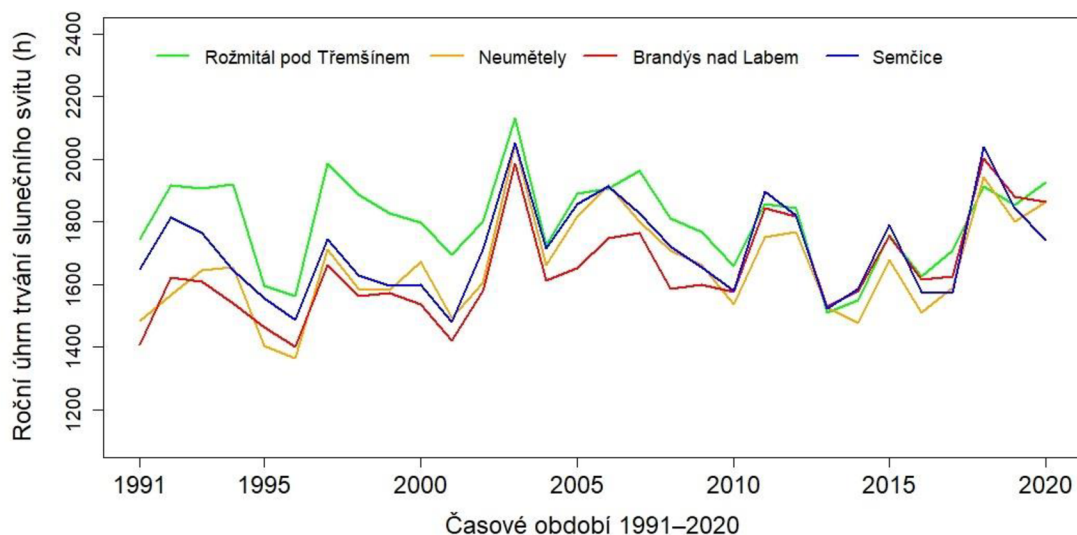
Obrázek 41: Úhrn SSV na stanicích v Pardubickém kraji

Maximální roční délku SSV v ČR naměřila v roce 2003 stanice Klatovy v Plzeňském kraji (Obrázek 42), a to 2319 h. V tento rok byl zaznamenán maximální průměr stanic v kraji o hodnotě 1970,9 h. Nejnižší roční průměr o hodnotě 1326,3 h byl naměřen v roce 2013. Stanice Kralovice naměřila nejnižší hodnotu 1196,3 h v roce 2010. Nižších hodnot je zaznamenáváno pravidelně na stanici Přimda, která má nejvyšší nadmořskou výšku (745 m) v kraji. Průměrná nadmořská výška ostatních stanic v kraji dosahuje 404 m, což může zapříčinit vzniklý rozptyl.



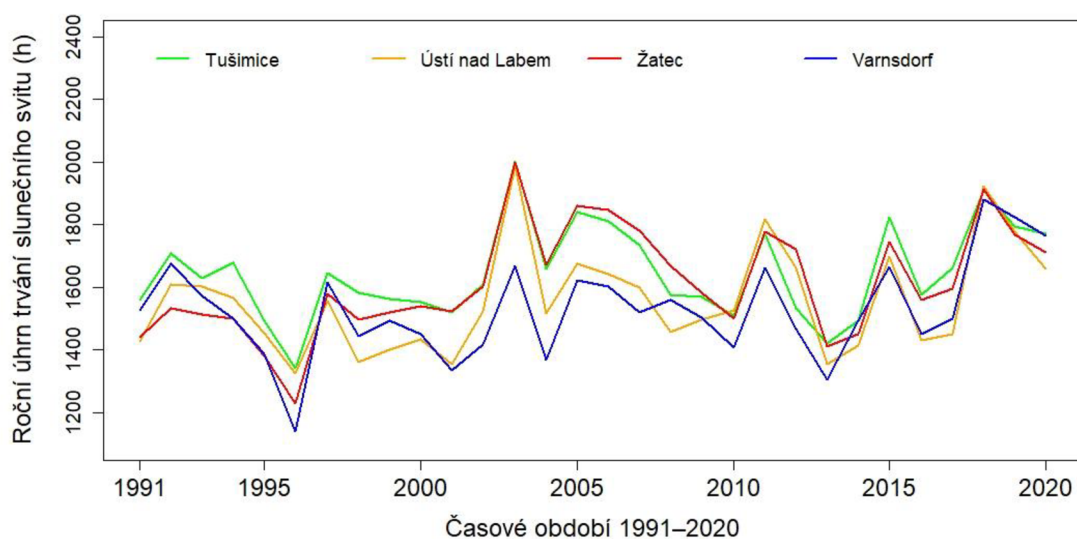
Obrázek 42: Úhrn SSV na stanicích v Plzeňském kraji

Středočeský kraj zaznamenal nejvyšší roční úhrn slunečního svitu o hodnotě 2132,4 na stanici Rožmitál pod Třemšínem v roce 2003 (Obrázek 43). Ve stejném roce byla naměřena i nejvyšší průměrná hodnota kraje a velikosti 2053,7 h. Nejnižší hodnoty byly zaznamenány v roce 1996 a to průměrná nejnižší hodnota s velikostí 1453,6 h a nejnižší hodnota stanice o velikost 1365 h, která náleží stanici Neumětely.



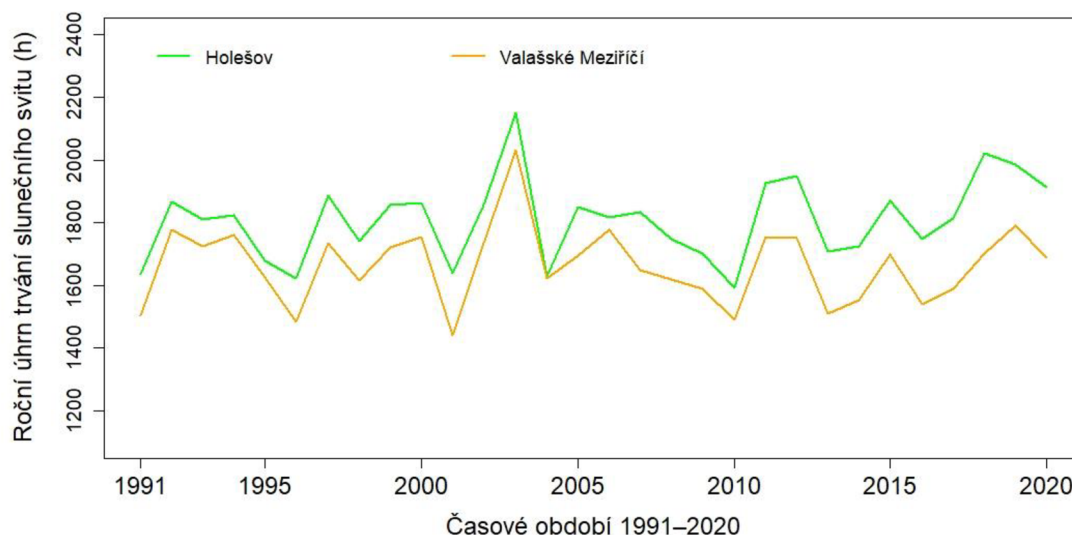
Obrázek 43: Úhrn SSV na stanicích ve Středočeském kraji

Rok 2003 byl nadprůměrný i pro Ústecký kraj, kde byl zaznamenán průměr roční hodnoty úhrnu SSV o hodnotě 1913,7 h (Obrázek 44). Ve stejném roce 2003 byla naměřena maximální krajská hodnota 2003,1 na stanici Tušimice. Nejnižší roční hodnota v Ústeckém kraji 1138,4 hodin byla naměřena ve Varnsdorfu roku 1996. Tento rok byl i rokem s nejnižší průměrnou hodnotou o velikost 1258,9 h. Stanice Varnsdorf je nejseverněji položenou stanicí ze všech vybraných stanic s hodnotu LAT 50,9°. U všech stanic kraje můžeme zaznamenat nárůst hodnot v čase.



Obrázek 44: Úhrn SSV na stanicích v Ústeckém kraji

Poslední Zlínský kraj vykazuje maximální hodnotu u obou stanic v roce 2003 s průměrným maximem ve výši 2090,1 h. Nejvyšší roční hodnota v kraji o velikosti 2149,8 byla naměřena stanicí Holešov (Obrázek 45). Minimální hodnoty připadají roku 2001, kdy nejnižší hodnota naměřená stanicí Valašské Meziříčí činila 1440,4 h a průměr obou stanic v tomto roce dosáhl hodnoty 1539,7 h. Stanice Holešov vykazující vyšší hodnoty má o 113 m vyšší nadmořskou výšku a je o 0,14° blíže rovníku.



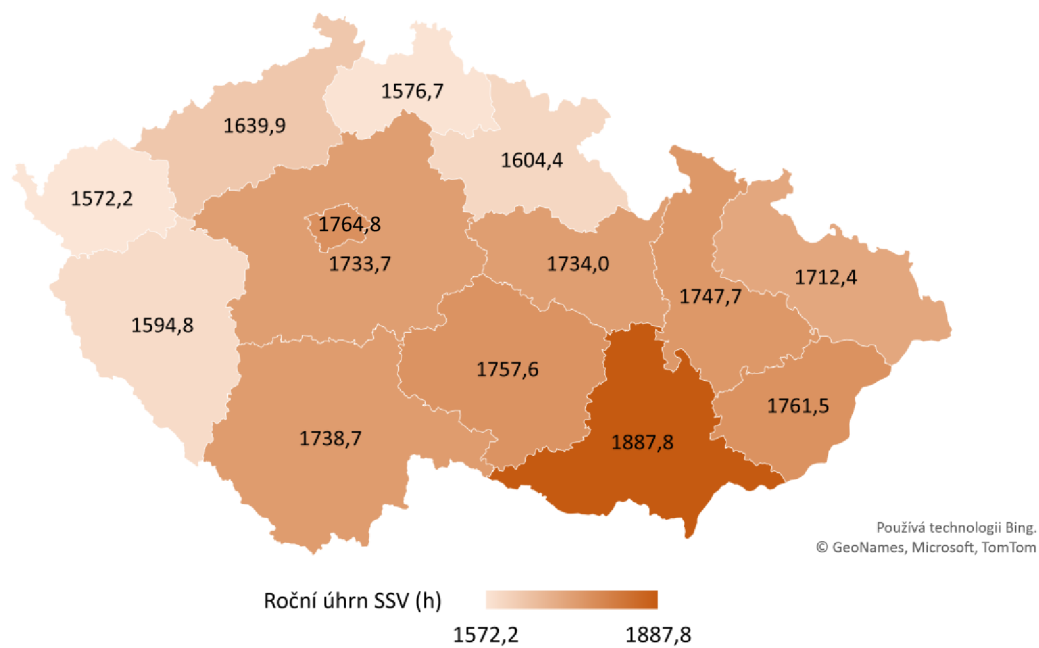
Obrázek 45: Úhrn SSV na stanicích ve Zlínském kraji

5.1.2 Průběh SSV za 30 let v jednotlivých krajích

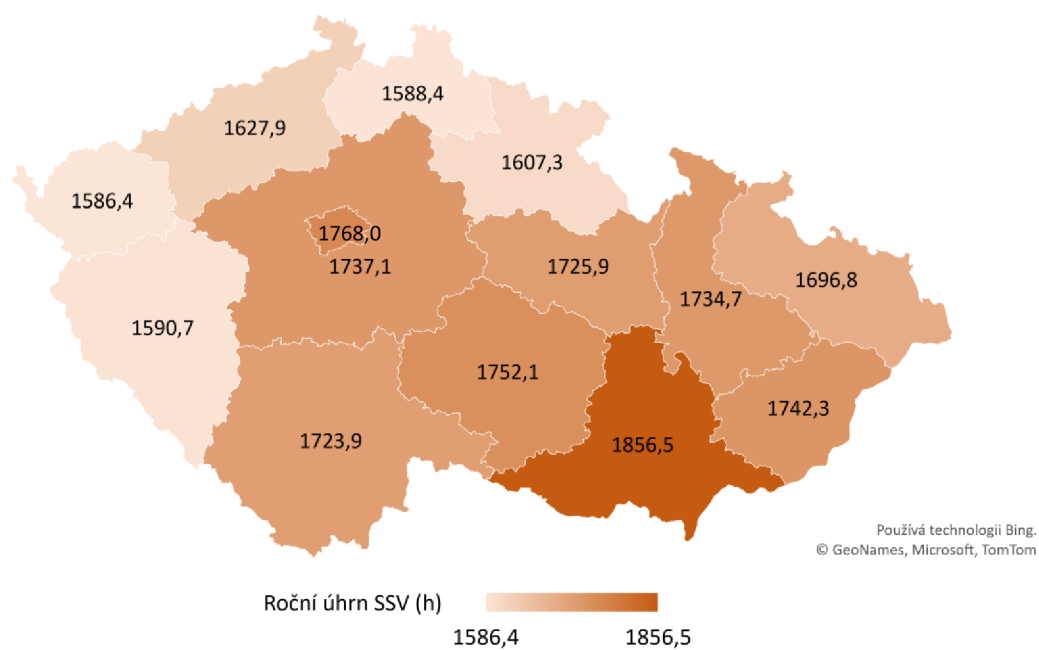
Průměrná hodnota ročního úhrnu SSV za období vyhodnocovaných 30 let byla rozdělena do třech období, a sice období posledních 10, 20 a 30 let (na období 2011–2020, 2001–2020 a 1991–2020). Ve všech těchto obdobích byla průměrná hodnota s přehledem nejvyšší právě v Jihomoravském kraji (Obrázek 46, 47 a 48).

Z výsledků pro období 1991–2020 (Obrázek 48) je možné konstatovat, že v Jihomoravském kraji je průměrný roční úhrn SSV 1847,4 hodiny, což je o 18,2% vyšší úhrn než v Karlovarském kraji, kde je tento úhrn z celé ČR nejnižší, a to 1562,9 hodin. Druhý největší průměrný roční úhrn SSV o hodnotě 1751,2 h je naměřen v Praze. Oproti Praze je průměrný roční úhrn SSV v Jihomoravském kraji o 5,5 % vyšší. V Jihomoravském kraji tedy trvá sluneční svit o 284,5 h déle než v kraji Karlovarském a o 96,2 h déle než v Praze.

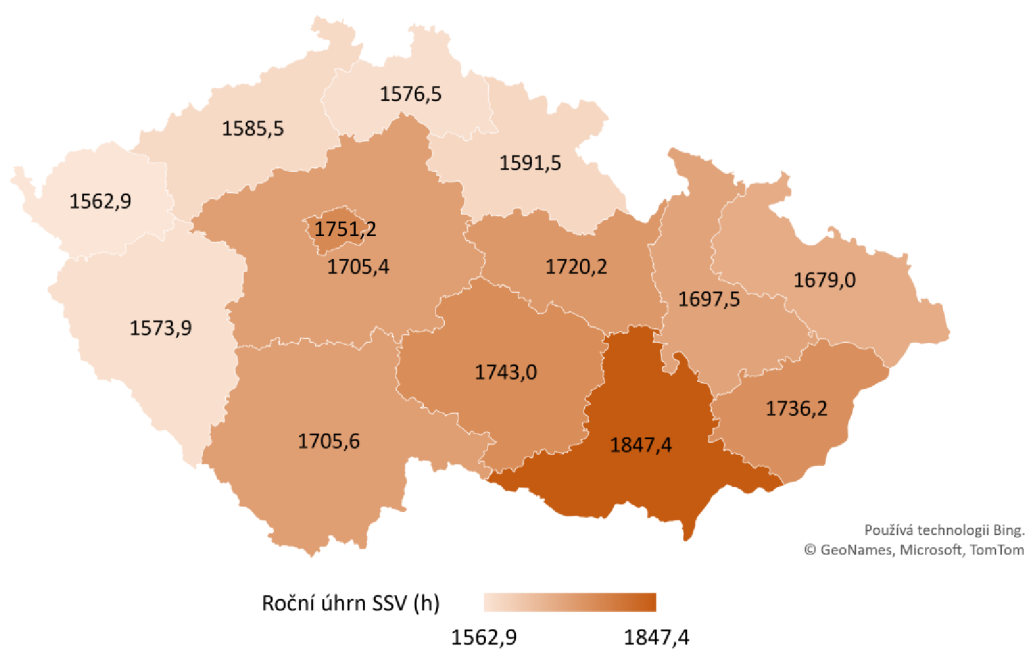
Ještě většího rozdílu dosáhneme ve srovnání dat období let 2011–2020 (Obrázek 46), kde můžeme u Jihomoravského kraje pozorovat 20,1% nárůst oproti Karlovarskému kraji s nejnižším úhrnem a 7% nárůst oproti Praze s druhým nejvyšším úhrnem. V celkovém počtu hodin trvání slunečního svitu v tomto sledovaném období je o 123 hodin méně SSV v Praze než v Jihomoravském kraji a o 315,6 hodin méně SSV v Karlovarském než v Jihomoravském kraji.



Obrázek 46: Průměrná hodnota ročního úhrnu SSV za období 2011–2020

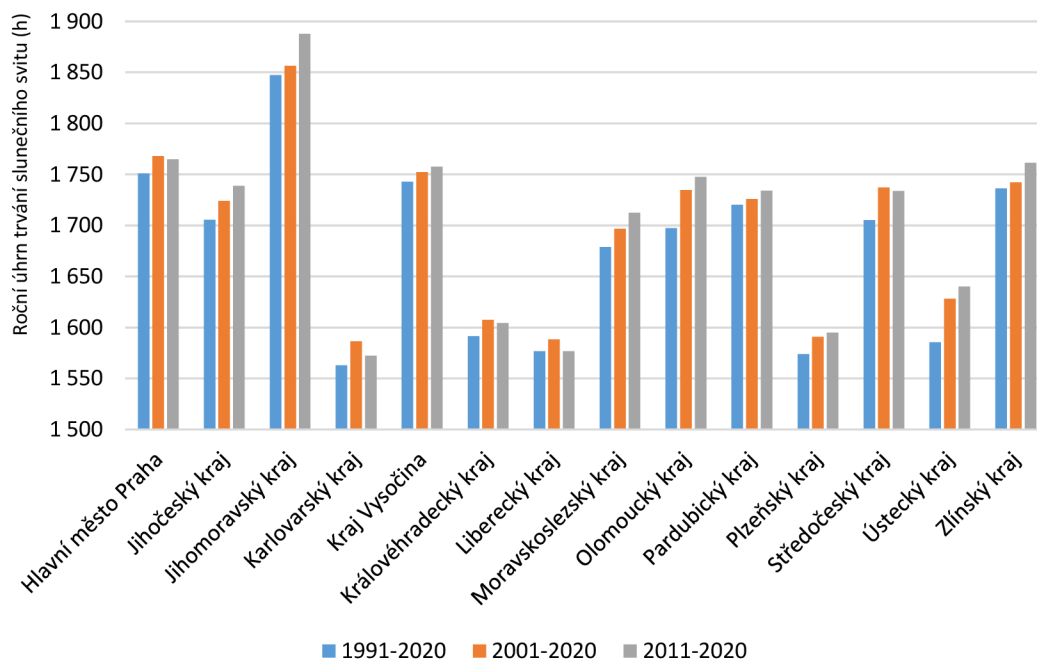


Obrázek 47: Průměrná hodnota ročního úhrnu SSV za období 2001–2020



Obrázek 48: Průměrná hodnota ročního úhrnu SSV za období 1991–2020

V celkem 13 krajích došlo k navýšení průměrného ročního úhrnu SSV mezi pozorovaným obdobím 2011–2020 a obdobím 1991–2020 (Obrázek 49). V jediném Libereckém kraji zůstala hodnota tohoto průměrného ročního úhrnu shodná na úrovni 1577 hodin (i zde byl minimální nárůst pozorován o velikosti 1,3 ‰).



Obrázek 49: Srovnání průměrné hodnoty ročního úhrnu SSV za období 1991–2020

Nejvyšší nárůst průměrné hodnoty ročního úhrnu SSV mezi obdobími 1991–2020 a obdobími 2011–2020 můžeme sledovat v Ústeckém kraji (Obrázek 49), kde se průměrná hodnota úhrnu SSV zvýšila o 3,43 % (54,4 h). Druhý nejvyšší nárůst úhrnu SSV je v Olomouckém kraji, a to v absolutní hodnotě o 50,2 hodin, tedy o 2,96 %.

Kraje v ČR můžeme rozdělit podle velikosti hodnoty průměrného ročního úhrnu SSV na tři skupiny, a sice kraje s vysokou, střední a nízkou hodnotou průměrného ročního úhrnu SSV. Do skupiny s vysokým úhrnem v hodnotě okolo 1850 h bychom zařadili pouze Jihomoravský kraj, skupina se středním úhrnem okolo hodnoty 1700 h by zahrnovala Prahu, Jihočeský kraj, Kraj Vysočinu, Moravskoslezský kraj, Olomoucký kraj, Pardubický kraj, Středočeský kraj a Zlínský kraj a skupina s nízkým úhrnem pohybující se v dlouhodobém průměru okolo hodnoty 1580 h by obsahovala Karlovarský kraj, Královéhradecký kraj, Liberecký kraj, Plzeňský kraj a Ústecký kraj.

U 9 krajů došlo ke kontinuálnímu nárůstu průměrné hodnoty ročního úhrnu SSV mezi pozorovanými obdobími 1991–2020, 2001–2020 a 2011–2020.

5.1.3 Analýza závislosti úhrnu SSV za 30 let na jednotlivých stanicích

Na všech 50 vybraných stanicích, jejichž roční průměrné hodnoty jsou vyobrazeny výše, byla provedena regresní analýza v závislosti na čase (Příloha 3). Test regresního koeficientu r na hladině 5 % neprokázal u většiny sledovaných stanic statisticky významnou závislost na čase. Pouze u 11 stanic (Tabulka 3) byla prokázána tato závislost.

U naprosté většiny stanic splňující test významnosti regresního koeficientu, a to 10 z 11, byla prokázána rostoucí tendence ročního úhrnu SSV v čase s výjimkou stanice Desná, Souš, kde byl naopak potvrzen pokles o 7,6 hodiny za každý rok ovlivněný z 16 % právě časem. Nejsilnější přímá závislost byla prokázána u stanice Paseka, kde ze 41,85 % dochází k ovlivnění ročního růstu SSV o téměř 12,9 hodiny.

Tabulka 3: Přehled stanic s prokázanou závislostí ročního úhrnu SSV na čase

Lokalita	Kraj	p-value	R ² 1991–2020	b 1991–2020
Vyšší Brod	Jihočeský kraj	0,0130	0,1945	7,0900
Lednice	Jihomoravský kraj	0,0303	0,1518	4,9946
Krásné Údolí	Karlovarský kraj	0,0213	0,1695	6,5998
Hradec Králové, Nový H. K.	Královéhradecký kraj	0,0497	0,1264	6,3545
Desná, Souš	Liberecký kraj	0,0257	0,1601	-7,5946
Hejnice	Liberecký kraj	0,0483	0,1278	6,2488
Mošnov	Moravskoslezský kraj	0,0293	0,1534	6,5423
Paseka	Olomoucký kraj	0,0001	0,4185	12,8710
Přerov	Olomoucký kraj	0,0261	0,1593	5,9798
Brandýs nad Labem - St. B.	Středočeský kraj	0,0015	0,2987	9,3329
Žatec	Ústecký kraj	0,0095	0,2104	8,5722

5.1.4 Analýza závislosti SSV za 30 let v jednotlivých krajích a ČR

Pro všechny průměrné roční úhrny SSV v jednotlivých krajích byla také provedena regresní analýza v závislosti na čase (Tabulka 4). Test regresního koeficientu r na hladině 5 % neprokázal u většiny krajů statisticky významnou závislost na čase, s výjimkou Ústeckého kraje, kde byla prokázána slabá závislost s regresním koeficientem o hodnotě 6,1.

Tabulka 4: Závislost ročního úhrnu SSV na čase v jednotlivých krajích a celé ČR (červeně označena neprokázaná závislost na hladině 5 %)

Územní celek	p-value	R ² 1991– 2020	b 1991– 2020
Hlavní město Praha	0,7808	0,0027	0,83
Jihočeský kraj	0,3097	0,3555	2,54
Jihomoravský kraj	0,2935	0,0380	2,45
Karlovarský kraj	0,6630	0,0066	1,24
Kraj Vysočina	0,7624	0,0032	0,80
Královéhradecký kraj	0,5554	0,0121	1,71
Liberecký kraj	0,8695	0,0009	0,50
Moravskoslezský kraj	0,3210	0,0340	2,56
Olomoucký kraj	0,0504	0,1257	5,48
Pardubický kraj	0,7709	0,0030	0,83
Plzeňský kraj	0,7348	0,0040	1,00
Středočeský kraj	0,2299	0,0512	3,50
Ústecký kraj	0,0375	0,1408	6,10
Zlínský kraj	0,4987	0,0159	1,67
Česká republika	0,3741	0,0273	2,34

Analýza závislosti byla provedena také pro průměrné roční hodnoty SSV v celé ČR (Tabulka 4) a neprokázala statisticky významnou závislost. Přímka lineární regresní přímky pro ČR byla stanovena na $y = -3012,86 + 2,34x$.

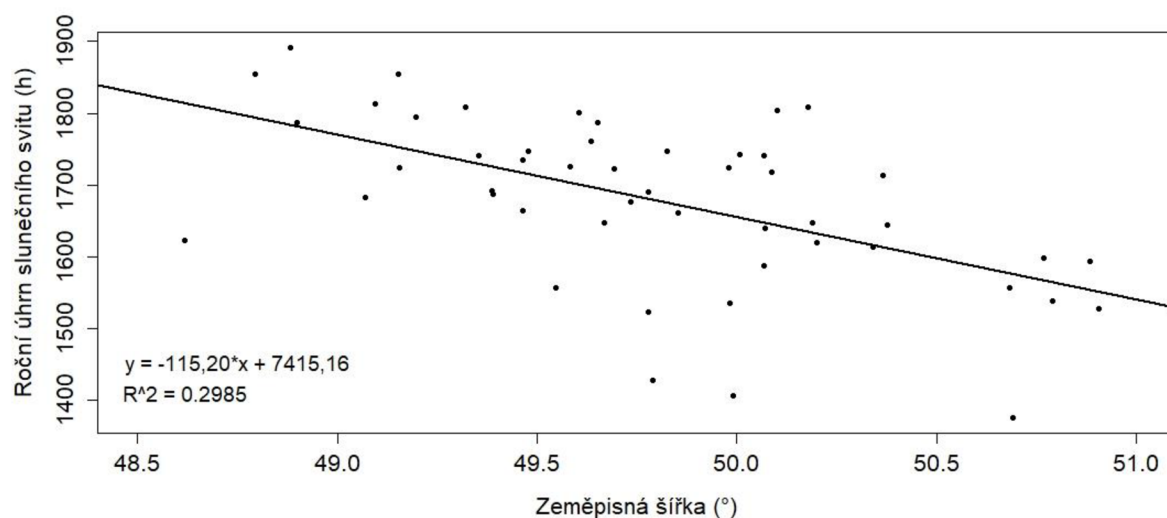
5.2 Závislost slunečního svitu na zeměpisné šířce a nadmořské výšce

Analýza závislosti SSV na zeměpisné šířce a nadmořské výšce byla provedena samostatně pro zeměpisnou šířku i nadmořskou výšku. Následně byla provedena vícenásobná analýza závislosti pro ALT i LAT. Pro analýzy závislosti byly použity průměrné roční úhrny SSV od roku 1991 až 2020 na každé konkrétní stanici. Výpočty a grafické znázornění analýz závislostí bylo prováděno v programu R, výpočet v programu R je pro každou jednotlivou závislost uveden v přílohách této práce (Příloha 4–6).

5.2.1 Závislost SSV na LAT

Výpočet závislosti SSV na LAT (Příloha 4) stanovil jako ideální rovnici přímky $y = 7415,16 - 115,2x$. Korelační koeficient r byl stanoven na hodnotu 0,5593 a determinační koeficient r^2 na hodnotu 31 %. Hodnota p -value o velikosti $2.42e^{-5}$ spolehlivě zamítla H_0 a potvrdila H_A , tedy že existuje závislost SSV na zeměpisné šířce.

Tato střední závislost je záporná, tedy s rostoucí hodnotou zeměpisné šířky klesá celkový počet hodin SSV (Obrázek 50). Průměrný roční úhrn slunečního svitu na konkrétní místo v ČR lze dle výsledků vysvětlit z 29,85 % jeho zeměpisnou polohou.

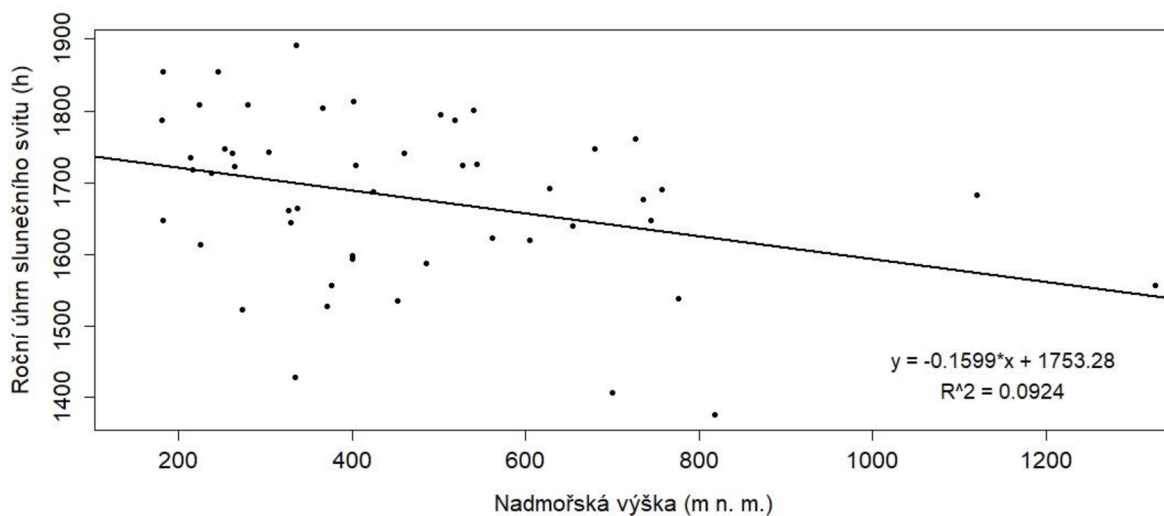


Obrázek 50: Závislost SSV na LAT

5.2.2 Závislost SSV na ALT

Výpočet závislosti SSV na ALT (Příloha 5) stanovil jako ideální rovnici přímky $y = 1753,27 - 0,16x$. Korelační koeficient r byl stanoven na hodnotu 0,3330 a determinační koeficient r^2 na hodnotu 9,24 %. Hodnota p -value o velikosti 0,0182 stále dostatečně zamítla H_0 a potvrdila H_A , tedy že existuje závislost SSV na nadmořské výšce (Obrázek 51).

Tato slabá závislost je opět záporná, tedy s rostoucí hodnotou nadmořské výšky klesá celkový počet hodin SSV. Přestože se většina stanic nachází v nižších nadmořských výškách, můžeme konstatovat, že podobné klesající závislosti o téměř shodné síle dosáhneme odstraněním stanic s vysokou nadmořskou výškou, a to konkrétně stanice Lysá hora a Churáňov. V takovém případě by byla definována rovnice přímky $y = 1771,19 - 0,23x$. Korelačního koeficientu r by byl stanoven na hodnotu 0,3422 a determinační koeficient r^2 na hodnotu 11,7 %. Hodnota p -value o velikosti 0,0172 by byla opět dostatečná pro přijetí H_A .



Obrázek 51: Závislost SSV na ALT

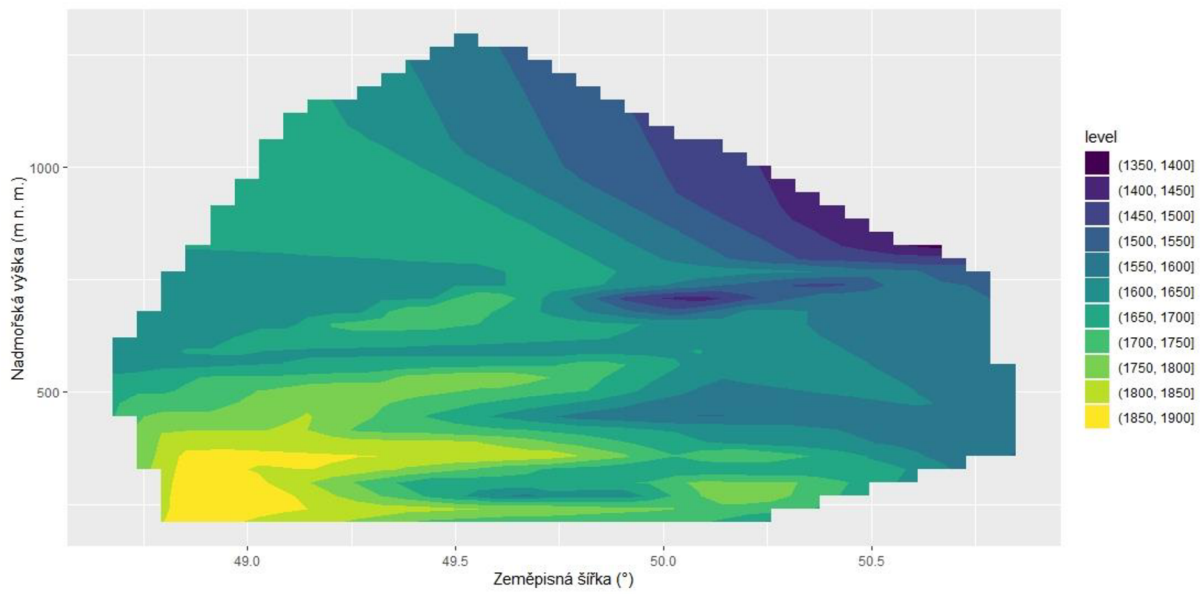
Průměrný roční úhrn slunečního svitu na konkrétní místo v ČR lze dle výsledků vysvětlit z 11 %, respektive z 11,7 % po odstranění stanic s vysokou nadmořskou výškou, právě jeho nadmořskou výškou.

5.2.3 Závislost SSV na LAT + ALT

Výpočet závislosti SSV na LAT + ALT stanovil jako ideální rovnici přímky $y = 7652,55 - 118,37x_1 - 0,17x_2$, kde x_1 je hodnota LAT a x_2 je hodnota ALT. Totální determinanční koeficient r^2 má hodnotu 44 %. Hodnota p-value o velikosti $1,189e^{-6}$ spolehlivě zamítla H_0 a potvrdila H_A , tedy že existuje závislost SSV na zeměpisné šířce a nadmořské výšce.

Tato střední závislost je záporná, tedy s rostoucí hodnotou zeměpisné šířky a s rostoucí hodnotou nadmořské výšky klesá celkový počet hodin SSV (Obrázek 49). Průměrný roční úhrn slunečního svitu na konkrétní místo v ČR lze dle výsledků vysvětlit ze 44 % jeho zeměpisnou polohou a nadmořskou výškou.

Závislost SSV na LAT + ALT (Obrázek 52) je vyobrazena trojrozměrně, na ose x je zeměpisná šířka, na ose y je nadmořská výška a barevnou škálou je v obrázku vyobrazena roční suma SSV. Konkrétně žlutou barvou je vyznačena hladina průměrného ročního úhrnu SSV v rozmezí 1850 hod. až 1900 hod., která ukazuje, že čím je menší LAT, a zároveň čím je menší ALT, tím větší je její výskyt. Opačně se vzrůstající LAT a vzrůstající ALT klesá celkový roční průměr úhrnu SSV (označeno fialovou barvou).



Obrázek 52: Závislost SSV na LAT + ALT

6 Diskuse

Nejprve je třeba se zaměřit na kvalitu získávání dat SSV, která je pro námi zvolené 30leté období mírně problematická. V takto dlouhém časovém úseku došlo několikrát, a to i opakovaně, k výměně slunoměrů na měřicích stanicích. Jsou také vyhodnoceny možnosti využití SSV pro solární energii a v neposlední řadě je práce srovnána s podobnými pracemi.

6.1 Kvalita získaných dat SSV

Naměřená data o SSV mohou být zatížena různými chybami, které jsou v této práci popsány a mohou ovlivnit úvahy v této práci. Připomenout můžeme možnou chybovost u mechanického Campbell-Stokesových slunoměrů při subjektivním vyhodnocování různých registračních pásek. Dále můžeme zmínit zavádění nových elektronických, často také nekalibrovaných přístrojů DSU12 nebo také slunoměrů SD4, které mohly v časové řadě způsobit podle Matušky a Mareše zápornou chybovost až -10 % (2009).

Dále je potřeba připomenout předpoklad Pokorného a Vanička, kteří po přechodu od Campbell-Stokesových slunoměrů ke slunoměrům SD5 očekávali nevýrazný 2% pokles u ročních sum, který podložili svou prací (2007).

Většina autorů upozorňuje na problém nutnosti ověření a homogenizaci naměřených dat v souvislosti s nahrazením tradičních heliografů za automatické, avšak žádný z nich jednoznačně nedospěl k názoru, že by výrazně ovlivňovaly velikost nebo sklon časových trendů (Valík & Brázdil 2019).

Průměrné naměřené hodnoty nevykazují průkazný pokles, ale naopak ukazují statisticky neprůkazný průměrný nárůst, který by mohl být po výše popsaných korekcí ještě větší a možná i statisticky průkazný.

6.2 Použití SSV pro solární energii

Výrobu solární energii samozřejmě ovlivňuje nejvíce síla a doba dopadajícího slunečního záření na FV panel. Ta je dána velkou měrou zeměpisnou polohou a následně i oblačností a dalšími jevy, které tato práce popisuje. Data SSV jsou ovlivněna stejnými aspekty. Je tedy vhodné vycházet z dat SSV, protože v této práci byly zjištěny rozdíly mezi kraji dosahující 20% rozdílu, a to konkrétně pro období let 2011–2020 mezi Karlovarským a Jihomoravským krajem ve prospěch Jihomoravského kraje.

Průměrný rozdíl za stejné období ročního úhrnu SSV v Jihomoravském kraji ke všem ostatní krajům je nižší, a to konkrétně 11,9 % ve prospěch Jihomoravského kraje. Tedy můžeme konstatovat, že za splnění všech ostatních, v této práci většinou popsanych, aspektů můžeme zvýšit výnosnost vhodným umístěním FV panelů podle dat SSV.

6.3 Srovnání s podobnými pracemi

Smysluplnost využití dat SSV jako prvního kroku před výběrem lokality pro umístění solární elektrárny se dočteme napříč články z celého světa. Například můžeme uvést, že v Argentině dochází k rozdílům SSV o velikosti 3 hodin v průměrném dnu mezi městem Mar del Plata a Rio Colorado, a to i přesto, že jsou tato města od sebe vzdálena méně než 30 kilometrů (Fernández ME et al. 2018).

Prací zahrnujících výzkum naměřených dat slunečního svitu území ČR není mnoho. Pokud na některé narazíme, zabývají se převážně srovnáním pouze jednotek stanic, anebo se zabývají velmi krátkým obdobím srovnání především s důrazem na časové rozložení v roce (jaro, léto, podzim a zima), pro příklad mohu uvést práci: Vztahy mezi slunečním svitem, globálním zářením, oblačností a délkou dne, hlavně v Hradci Králové (Schováňková 2010) či Sunshine duration and its variability in the main ridge of the Karkonosze Mountains in relation to with atmospheric circulation (Urban et al. 2018).

Bartoszek, et al. na území Polska potvrzuje trend tzv. globálního zjasnění na území Evropy, tedy rostoucího trendu délky slunečního svitu napříč všemi stanicemi (2021). Ve stejné práci také autor hovoří o rozmanitosti naměřených hodnot v závislosti na zeměpisné šířce, kterou můžeme pozorovat i na území „menší“ ČR. S potvrzením pozitivního trendu dat slunečního svitu od 90. let se v Evropě můžeme setkat mezi mnohými také i v práci Manara et al., který na italských stanicích potvrzuje růst v rozmezí 2 až 5 % (2014).

Musíme tedy konstatovat, že většina prací se shoduje, že je vhodné využít data SSV při umístování solárních elektráren, a to především pro jejich dlouhou kontinuitu a snadné měření. Většina autorů se shoduje, že dochází k růstu měřených hodnot SSV od 90. let minulého století, který potvrzuje i tato práce. Výzkum tohoto růstu bohužel přesahuje rámec této práce, ale je pravděpodobně způsoben poklesem emisí znečišťujících látek přispívajících k zmenšení optické tloušťky aerosolu atmosféry a možným úbytkem oblačnosti.

7 Závěr

- Pomocí 50 vybraných stanic napříč ČR s kontinuální 30letou historií dat slunečního svitu (v období 1991–2020) byly předloženy a srovnány výsledné průběhy ročního úhrnu slunečního svitu za jednotlivé stanice a kraje. Průměrný roční úhrn slunečního svitu byl v tomto 30letém období jednoznačně největší v Jihomoravském kraji.
- Rozdíl průměrné hodnoty slunečního svitu (v období 1991–2020) dosahoval mezi jednotlivými kraji až 18,2 %, což představovalo rozdíl 284,5 hodin ročně. Takto vysoký rozdíl jasně dokládá relevantnost výzkumu a přínosnost této práce právě pro instalaci solárních elektráren na území ČR.
- Průměrný roční úhrn slunečního svitu na klouzavém průměru zaznamenával nevýrazný nárůst o velikosti nižších jednotek procent mezi všemi kraji ČR. Ve většině krajích dosahoval desítek hodin slunečního svitu ročně. Až na jednu výjimku nebyla v žádném kraji prokázána na hladině 5 % statisticky významná závislost na čase, přesto byla v práci pro každý kraj sestavena rovnice tohoto možného budoucího vývoje, který potvrzuje globální zjasnění na území ČR pohybující se okolo 3 % ve sledovaném období.
- Práce předložila komplexní přehled nejen nad zkoumanými vybranými stanicemi, ale také poskytuje informace pro predikci úhrnu slunečního svitu na území celé ČR. Byla prokázána střední záporná závislost úhrnu slunečního svitu na zeměpisné šířce a nadmořské výšce. Průměrný roční úhrn slunečního svitu na konkrétní místo v ČR byl dle zjištěných výsledků vysvětlen ze 44 % jeho zeměpisnou polohou a nadmořskou výškou.
- Stanovená hypotéza, že výroba solární energie je nejvýhodnější v Jihomoravském kraji byla potvrzena. Pouze ve 4 letech z 30 zkoumaných let byl nejvyšší úhrn slunečního svitu zaznamenán v jiném než Jihomoravském kraji.
- Práci by bylo možné v budoucnu rozšířit delší historií zkoumaných dat a srovnat předložený budoucí vývoj délky slunečního svitu na území ČR. Obohatit předloženou práci by bylo také možné i zkoumáním globálního slunečního záření na vzorku překrývajících se stanic a ověření zjištěného mezikrajového rozdílu vyplývajícího ze zeměpisné šířky a nadmořské výšky.

8 Literatura

Anděl J. 2019. Statistické metody. Matfyzpress, Praha.

Amador-Bedolla C, Olovares-Amaya R, Hachmann J, Aspuru-Guzik A. 2013. Organic Photovoltaics. *Informatics for Materials Science and Engineering* **2013**:423-442.

Bartlome R, Strahm B, Siquin Y, Feltrin A, Ballif C. 2010. Laser applications in thin-film photovoltaics. *Applied Physics B* **100**:427-436.

Bartoszek K, Matuszko D, Weglarczyk S. 2021. Trends in sunshine duration in Poland (1971–2018). *International Journal of Climatology*, **41.1**: 73-91.

Benghanem M, Almohammed A. 2020. Organic Solar Cells: A Review. Strana 81-106 v Mellit A, Benghanem M. *A Practical Guide for Advanced Methods in Solar Photovoltaic Systems*. Springer, Cham.

Biyik E, Araz M, Hepbasil A, Shahrestani M, Yao R, Shao L, Essah E, Oliveira, AC, Cano T, Rico E, Lechon JL, Andrade L, Mendes A, Ath YB. 2017. A key review of building integrated photovoltaic (BIPV) systems. *Engineering Science and Technology, an International Journal* **20**, 833-858.

Braniš M, Hůnová I. 2009. Atmosféra a klima: aktuální otázky ochrany ovzduší. Karolinum, Praha.

Burgués-Ceballos I, Lucera L, Tiwana P, Ocytko K, Tan LW, Kowalski S, Snow J, Pron A, Bürckstümmer H, Blouin N, Morse G. 2021. Transparent organic photovoltaics: A strategic niche to advance commercialization. *Joule* **5**, 2261-2272.

Cihelka J. 1994. Solární tepelná technika. Grada Publishing, a.s, Praha.

Čeman R. 2002. Vesmír 1, Sluneční soustava. Mapa Slovakia Bratislava, Bratislava.

Česká meteorogická společnost. 2022. Elektronický meteorogický slovník. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz> (citováno červen 2022).

ČEZ, a. s. 2022. ČEZ testuje první plovoucí fotovoltaickou elektrárnu v ČR. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/cez-testuje-prvni-plovouci-fotovoltaickou-elektrarnu-v-cr-154466> (citováno září 2022).

Dargel R, Heinemeyer F, Köntges M, Vogt J, Vogt C. 2009. Detection of trace impurities in Cu (In, Ga) Se₂ thin film solar cells by laser ablation ICP-MS. *Microchimica Acta* **165**: 265-270.

- Drábová D, Pačes V. 2014. Perspektivy české energetiky: současnost a budoucnost. Novela bohemika, Praha.
- Esen V, Sağlam Ş, Oral B. 2020. Solar irradiation fundamentals and solar simulators. Strana 3-28 v Mellit A, Benghanem M. A Practical Guide for Advanced Methods in Solar Photovoltaic Systems. Springer, Cham.
- Fernández ME, Gentili JO, Campo AM. 2018. Sunshine Duration Analysis as a First Step to Estimate Solar Resource for Photovoltaic Electricity Production in Middle Latitudes. Environmental Processes: An International Journal, **5(2)**:313-328.
- Geisz JF, France RM, Schulte KL, Steiner MA, Norman AG, Guthrey HL, Young MR, Song T, Moriarty T. 2020. Six-junction III–V solar cells with 47.1% conversion efficiency under 143 Suns concentration. Nature Energy **5**:326-335.
- Green MA, Emery K, Hishikawa Y, Warta W, Dunlop ED. 2016. Solar Cell Efficiency Tables (version 48). Progress in Photovoltaics: Research and Applications. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/pip.2788> (citováno srpen 2022).
- Gueymard ChA. 2018. A reevaluation of the solar constant based on a 42-year total solar irradiance time series and a reconciliation of spaceborne observations. Solar Energy **168**:2-9.
- Haselhuhn R. 2010. Fotovoltaika: budovy jako zdroj proudu. HEL, Ostrava.
- Haselhuhn R, Maule P. 2017. Fotovoltaické systémy. Česká fotovoltaická asociace, Plzeň.
- Chmel L, Hamerlík I. 2016. Fotovoltaika, fototermika. Dostupné z: <https://publi.cz/books/91/Cover.html> (citováno červen 2022).
- Choi YK., Choi WS, Lee JH. 2016. Empirical Research on the Efficiency of Floating PV Systems. Science of Advanced Materials **8**:681-685.
- Iqbal M. 1983. An Introduction to Solar Radiation. Academic Press, New York.
- IRENA. 2019. Future of Solar Photovoltaic. The International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA. 2021. Renewable Power Generation Costs In 2021. The International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA. 2022. Renewable Energy Statistics 2022. The International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- Kerrod R. 2000. The Sun. Graham Beehag Books, Singapore.

Klassen S. 2011. The Photoelectric Effect: Reconstructing the Story for the Physics Classroom. *Science & Education* **20**:719-731.

Klezcek J. 2002. *Velká encyklopedie vesmíru*. Academia, Praha.

Kougias L, Taylor N, Kakoulaki G, Jäger-Waldau A. 2021. The role of photovoltaics for the European Green Deal and the recovery plan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **144**:111017.

Lackner M, Sajjadi B, Chen W. 2022. *Handbook of Climate Change Mitigation and Adaptation*. Springer, Cham.

Lepš J, Šmilauer P. 2016. *Biostatistika*. Nakladatelství Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích, České Budějovice.

Libra M, Poulek V, Jirka V. 2018. *Technologie polysiloxanového gelu pro efektivnější využití solární energie*. Knihy LTD, Londýn.

Libra M, Poulek V. 2006. *Solární energie, fotovoltaika – perspektivní trend současnosti i blízké budoucnosti*. ČZU, Praha.

Libra M, Poulek V. 2009. *Fotovoltaika, teorie i praxe využití solární energie*. Ilsa, Praha.

Libra M, Poulek V. 2010. Konstrukce a výroba fotovoltaických článků a panelů. *Elektro*. **3**:6-9.

Lewis RS. 1983. *The Illustrated Encyclopedia of the Universe*. Harmony Books, New York.

Manara M, Beltrano MC, Brunetti M, Maugeri M, Simolo C, Sorrenti S. 2014. Temporal trends in sunshine duration over Italy (1936-2013). *EMS Annual Meeting Abstracts* **11**-179.

Matuška T, Mareš L. 2009. *Experimentální metody 1*. Dostupné z: <https://adoc.pub/experimentalni-metody-1.html> (citováno červen 2022).

Mertens K. 2019 *Photovoltaics: fundamentals, technology, and practice*. 2nd edition. Wiley, Chichester.

Mohanty P, Muneer T, Gago EJ, Kotak Y. 2015. Solar radiation fundamentals and PV system components. Strana 7-47 v Mohanty P, Muneer T, Kolhe M. *Solar Photovoltaic System Applications*. Springer, Cham.

Murtinger K, Beranovský J, Tomeš M. 2008. *Fotovoltaika: elektřina ze slunce*. EkoWATT, Praha.

Myslík J. 1998. Elektromagnetické pole: základy teorie. Ben, Praha.

NASA. 2003. Is the Sun Brighter or Not? Dostupné z: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/VariableSun/variable2.php> (citováno červen 2022).

Pokorný J, Vaníček K. 2007. Automatizace měření slunečního svitu na stanicích Českého hydrometeorologického ústavu pomocí elektronických slunoměrů. Meteorologické zprávy: Meteorological Bulletin **60**:106-116.

Poulek V, Libra M. 2006. Vysoce účinné fotovoltaické systémy s trackery a koncentrátory záření. Alternativní energie **3**:47-51.

Quaschnig V. 2010. Obnovitelné zdroje energií. Grada, Praha.

Reinders A. 2017. Photovoltaic Solar Energy: From Fundamentals to Applications. Wiley, Chichester.

Ruda A. 2014. Klimatologie a Hydrogeografie pro učitele. Masarykova univerzita, Brno.

Sedlák B, Štoll I. 2002. Elektřina a magnetismus. Academia, Praha.

Strahler AH. 2003. Introducing physical geography. John Wiley & Sons, New York.

Škorpík J. 2020. Transformační technologie: Sluneční záření jako zdroj energie. Dostupné z: https://www.transformacni-technologie.cz/02_slunecni-zareni-jako-zdroj-energie_1-cast.pdf (citováno červen 2022).

Švanda M. 2003. Proměná sluneční konstanta. Instantní astronomické noviny (e468) Dostupné z: <https://www.asu.cas.cz/~svanda/prace/clanky/ian/ian468.html> (citováno květen 2022)

Themessel A, Werner W. 2005. Solární systémy. Grada, Praha.

Urban G, Migala K, Pawliczek P. 2018. Sunshine duration and its variability in the main ridge of the Karkonosze Mountains in relation to with atmospheric circulation. Theoretical and Applied Climatology volume **131**,1173–1189.

Valík A, Brázdil R. 2019. Measurements of sunshine duration by automatic sensors and their effects on the homogeneity of long-term series in the Czech Republic. Climate Research, **78**:83-101.

Vaníček K, Dubrovská I, Metelka L, Pokorný J. 2015. Sborník prací ČHMÚ. Měření složek radiační bilance a dlouhodobé změny globálního záření v České republice. ČHMÚ, Praha.

Vignola F, Michalsky J, Stoffel T. 2012. Solar and infrared radiation measurements. CRC Press, Boca Raton.

Vysoudil M. 2013. Základy fyzické geografie 1. Univerzita Palackého, Olomouc.

Wald L. 2021. Fundamentals of solar radiation. CRC Press, Boca Raton.

Zhao X, Huang G, Lu C, Zhou X, Li Y. 2020. Impacts of climate change on photovoltaic energy potential: A case study of China. *Applied Energy* **280**:115888.

Zdroje obrázků:

AV ČR. 2020. Planeta ve skleníku. In: AVex: expertní stanovisko AV ČR. Ústav termomechaniky AV ČR. Dostupné z: https://www.avcr.cz/export/sites/avcr.cz/cs/veda-a-vyzkum/avex/files/2020-02_.pdf (citováno červen 2022).

ČEZ, a. s. 2022. ČEZ testuje první plovoucí fotovoltaickou elektrárnu v ČR. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/cez-testuje-prvni-plovouci-fotovoltaickou-elektrarnu-v-cr-154466> (citováno září 2022).

ČEZ, a. s. 2023. Fotovoltaický jev. Svět energie. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/stahuj-zdarma/media-ke-stazeni?sort=dateAsc&polozka=72> (citováno leden 2023).

ČHMÚ. 2022. Trvání slunečního svitu. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/ok/klimazmena/cc_vav_svit_cs.html (citováno červen 2022).

DJSarchitecture. 2022. Fotovoltaika pro rodinný dům – výhody a nevýhody, návratnost. Dostupné z: <https://www.djsarchitecture.cz/fotovoltaika-pro-rodinny-dum> (citováno srpen 2022).

Fiedler AMS, s.r.o. 2022. SG002 Snímač globální radiace – pyranometr. Dostupné z: <https://www.fiedler.company/cs/produkty/snimace-meteorolog-velicin/globalni-radiace/pyranometr-sg002> (citováno červen 2022).

Global Solar Atlas. 2019. World. Dostupné z: <https://globalsolaratlas.info/download/world> (citováno červen 2022).

Global Solar Atlas. 2019. Czech Republik. Dostupné z: <https://globalsolaratlas.info/download/czech-republic> (citováno červen 2022).

Gueymard ChA. 2018. A reevaluation of the solar constant based on a 42-year total solar irradiance time series and a reconciliation of spaceborne observations. *Solar Energy* **168**:2-9.

Landsberg HE. 2009. Wikimedia Commons: Sunshine.png. Dostupné z: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Sunshine.png> (citováno červen 2022).

Klein C. 2019. Infrared Radiation and Infrared Spectroscopy. Dostupné z: <https://www.thermofisher.com/blog/materials/all-about-infrared-radiation-and-spectroscopy/> (citováno červen 2022).

NASA. 2003. Is the Sun Brighter or Not? Dostupné z: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/VariableSun/variable2.php> (citováno červen 2022).

Newelektronics. 2022. Researchers claim breakthrough in thin-film solar cells. Dostupné z: <https://www.newelectronics.co.uk/content/news/researchers-claim-breakthrough-in-thin-film-solar-cells> (citováno srpen 2022).

NREL. 2022. Best Research-Cell Efficiency Chart. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (citováno srpen 2022).

Opting servis Luboš Ševčík. 2022. Laboratorní přístroje: heliograf, slunoměr. Dostupné z: <https://www.optingservis.cz/index.php/30-laboratorni-pristroje/meteorologicke-pristroje-vlhkomery-barometry/54-heliograf-slunomer> (citováno červen 2022).

Pokorný J, Vaníček K. 2007. Automatizace měření slunečního svitu na stanicích Českého hydrometeorologického ústavu pomocí elektronických slunoměrů. *Meteorologické zprávy: Meteorological Bulletin. Český hydrometeorologický Ústav. Praha.* **60**:106-116

Poulek V, Libra M. 2006. Vysoce účinné fotovoltaické systémy s trackery a koncentrátory záření. *Alternativní energie. CEMC. Praha.* **3**:47-51.

Rohde RA. 2008. Wikimedia Commons: Solar Spectrum.png. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_Spectrum.png?uselang=cs (citováno červen 2022).

Ronan P. 2007. Wikimedia Commons: EM Spectrum.svg. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM_spectrum.svg (citováno srpen 2022).

Solaren. 2020. MONOCRYSTALLINE OR POLYCRYSTALLINE? Dostupné z: <https://solaren-power.com/monocrystalline-or-polycrystalline-solar-panels/> (citováno srpen 2022).

Solargis, s.r.o. 2020. Energetická výnosnost fotovoltaické elektrárny. Dostupné z: <http://www.cheb.srdceunie.cz/assets/documents/studie-osvitu-5-zs-cheb.pdf> (citováno červen 2022).

Štork R. 2023. Pluto už není planetou. Dostupné z: <https://www.asu.cas.cz/~stork/cz/noviny/pluto/> (citováno únor 2023).

The Science and Maths Zone. 2021. The Photoelectric Effect, Photons and Planck's Equation. Dostupné z: <http://thescienceandmathszone.com/the-photoelectric-effect-photons-and-plancks-equation/> (citováno červen 2022).

Vaněček M. 2000. Přeměna sluneční energie v energii elektrickou. Fyzikální ústav AV ČR. Dostupné z: <https://www.fzu.cz/aktuality/premena-slunecni-energie-v-energii-elektrickou> (citováno srpen 2022).

9 Seznam použitých obrázků, tabulek a grafů

Seznam obrázků

Obrázek 1: Sluneční soustava (Štork 2023). U planet je zachováno měřítko, vzdálenosti jsou ale upravené.	10
Obrázek 2: Elektromagnetické záření (Klein 2019)	11
Obrázek 3: Spektrum elektromagnetického záření (Ronan 2007).....	12
Obrázek 4: Měření solární konstanty v čase (NASA 2003)	13
Obrázek 5: Vývoj solární konstanty v čase (Gueymard 2018). Červená křivka zobrazuje dvacetidenní klouzavý průměr zeleně zobrazeného denního měření.	14
Obrázek 6: Energetická bilance Země (AV ČR 2020)	15
Obrázek 7: Spektrum slunečního záření dopadajícího na horní hranici atmosféry Země (žlutá plocha) na povrch Země (červená plocha) (Rohde 2008).....	16
Obrázek 8: Poměr difúzního a přímého záření na solární elektrárně v lokalitě Cheb v roce 2019 (Solargis, s.r.o. 2020).....	17
Obrázek 9: Přímé záření dopadající na území ČR (Global Solar Atlas, ČR 2019)	17
Obrázek 10: Přímé záření dopadající na povrch Země (Global Solar Atlas, World 2019)	18
Obrázek 11: Segmentový pyranometr Fiedler SG002 (Fiedler AMS, s.r.o. 2022)	19
Obrázek 12: Potenciál sluneční energie na Zemi (Global Solar Atlas, World 2019).....	19
Obrázek 13: Potenciál sluneční energie na území ČR (Global Solar Atlas, ČR 2019).....	20
Obrázek 14: Roční úhrny SSV na Zemi (Landsberg, 2009).....	21
Obrázek 15: Roční úhrny slunečního svitu na území ČR (ČHMÚ 2022)	22
Obrázek 16: Campbell-Stokesův slunoměr – heliograf (Pokorný & Vaniček 2007)	22
Obrázek 17: Zimní registrační pásy do heliografu (Opting servis Luboš Ševčík 2022)	23
Obrázek 18: Průběh vnějšího fotoefektu (The Science and Maths Zone 2021)	24
Obrázek 19: Fotovoltaický jev (ČEZ, a. s. 2023)	25
Obrázek 20: Schéma pásů P-N přechodu pro krystalický křemík (Vaněček 2000)	26
Obrázek 21: Srovnání monokrystalického a polykrystalického FV článku (Solaren 2020).....	27
Obrázek 22: Tenkovrstvý fotovoltaický panel (Newelectronics 2022)	29
Obrázek 23: Schéma otáčení dvouosého trackeru Traxler (Poulek & Libra 2006).....	33
Obrázek 24: Off-grid systém (DJSarchitecture 2022)	34
Obrázek 25: On-grid systém (DJCarchitecture 2022)	35
Obrázek 26: Hybridní systém (DJCarchitecture 2022).....	35

Obrázek 27: Celosvětový nominální kumulativní instalovaný výkon solárních panelů (zpracováno podle IRENA 2022)	37
Obrázek 28: Průměrná cena a efektivita instalovaných FV panelů ve světě (IRENA 2021) ..	38
Obrázek 29: Efektivita FV článků (NREL 2022)	39
Obrázek 30: První plovoucí FV elektrárna na území ČR (ČEZ, a. s. 2022)	40
Obrázek 31: Mapa vybraných stanic na území ČR	42
Obrázek 32: Úhrn SSV na stanicích v Praze	46
Obrázek 33: Úhrn SSV na stanicích v Jihočeském kraji	47
Obrázek 34: Úhrn SSV na stanicích v Jihomoravském kraji	47
Obrázek 35: Úhrn SSV na stanicích v Karlovarském kraji	48
Obrázek 36: Úhrn SSV na stanicích v Kraji Vysočina	48
Obrázek 37: Úhrn SSV na stanicích v Královéhradeckém kraji	49
Obrázek 38: Úhrn SSV na stanicích v Libereckém kraji	49
Obrázek 39: Úhrn SSV na stanicích v Moravskoslezském kraji	50
Obrázek 40: Úhrn SSV na stanicích v Olomouckém kraji	50
Obrázek 41: Úhrn SSV na stanicích v Pardubickém kraji	51
Obrázek 42: Úhrn SSV na stanicích v Plzeňském kraji	51
Obrázek 43: Úhrn SSV na stanicích ve Středočeském kraji	52
Obrázek 44: Úhrn SSV na stanicích v Ústeckém kraji	52
Obrázek 45: Úhrn SSV na stanicích ve Zlínském kraji	53
Obrázek 46: Průměrná hodnota ročního úhrnu SSV za období 2011–2020	54
Obrázek 47: Průměrná hodnota ročního úhrnu SSV za období 2001–2020	54
Obrázek 48: Průměrná hodnota ročního úhrnu SSV za období 1991–2020	55
Obrázek 49: Srovnání průměrné hodnoty ročního úhrnu SSV za období 1991–2020	55
Obrázek 50: Závislost SSV na LAT	58
Obrázek 51: Závislost SSV na ALT	59
Obrázek 52: Závislost SSV na LAT + ALT	60

Seznam tabulek

Tabulka 1: Časový snímek největších solárních elektráren ve světě (zpracováno podle Lackner et al. 2022)	38
Tabulka 2: Přehled korekce dat u jednotlivých stanic	43
Tabulka 3: Přehled stanic s prokázanou závislostí ročního úhrnu SSV na čase.....	56
Tabulka 4: Závislost ročního úhrnu SSV na čase v jednotlivých krajích a celé ČR (červeně označena neprokázaná závislost na hladině 5 %)	57

10 Seznam použitých zkratek a symbolů

Seznam zkratek

Zkratka	Význam
ALT	nadmořská výška
AV	Akademie věd
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ČR	Česká republika
ČEZ	České energetické závody
EVA	ethylvinylacetát
FEJ	fotoelektrický efekt
FV	fotovoltaický
IR	infračervené
IRENA	International Renewable Energy Agency
LAT	zeměpisná šířka
LON	zeměpisná délka
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NREL	National Renewable Energy Laboratory
RTG	rentgenové
SSV	sluneční svit
SZ	sluneční záření
UV	ultrafialové

Seznam symbolů

Symbol	Popis	Jednotka
λ	vlnová délka	m
a	absolutní člen	-
b	regresní koeficient	-
c	rychlost světla ve vakuu	m/s
E	energie fotonů	eV
E_C	energie vodivostního pásu	eV
E_g	šířka zakázaného pásu	eV
E_V	energie valenčního pásu	eV
h	Planckova konstanta	eV/Hz
H_0	nulová hypotéza	-
H_A	alternativní hypotéza	-
I	intenzita SZ	W/m ²
I_D	intenzita difúzního SZ	W/m ²
I_P	intenzita přímého SZ	W/m ²
m	hmotnost	kg
Q_D	úhrn energie dopadajícího difúzního záření	kWh/m ²
Q_S	denní úhrn SZ	kWh/m ²
$Q_{S,teor}$	úhrn energie SZ bez oblačnosti s znečištěním atmosféry	kWh/m ²
r	Pearsonův korelační koeficient	-
r^2	determinační koeficient	%
v	frekvence	Hz
V_{OC}	napětí P-N přechodu	V
x	nezávisle proměnná	-
y	závisle proměnná	-
τ	poměrná doba slunečního svitu	-

11 Seznam příloh

Příloha 1: Efektivita FV článků od roku 1975 (NREL 2022)

Příloha 2: Vybrané stanice

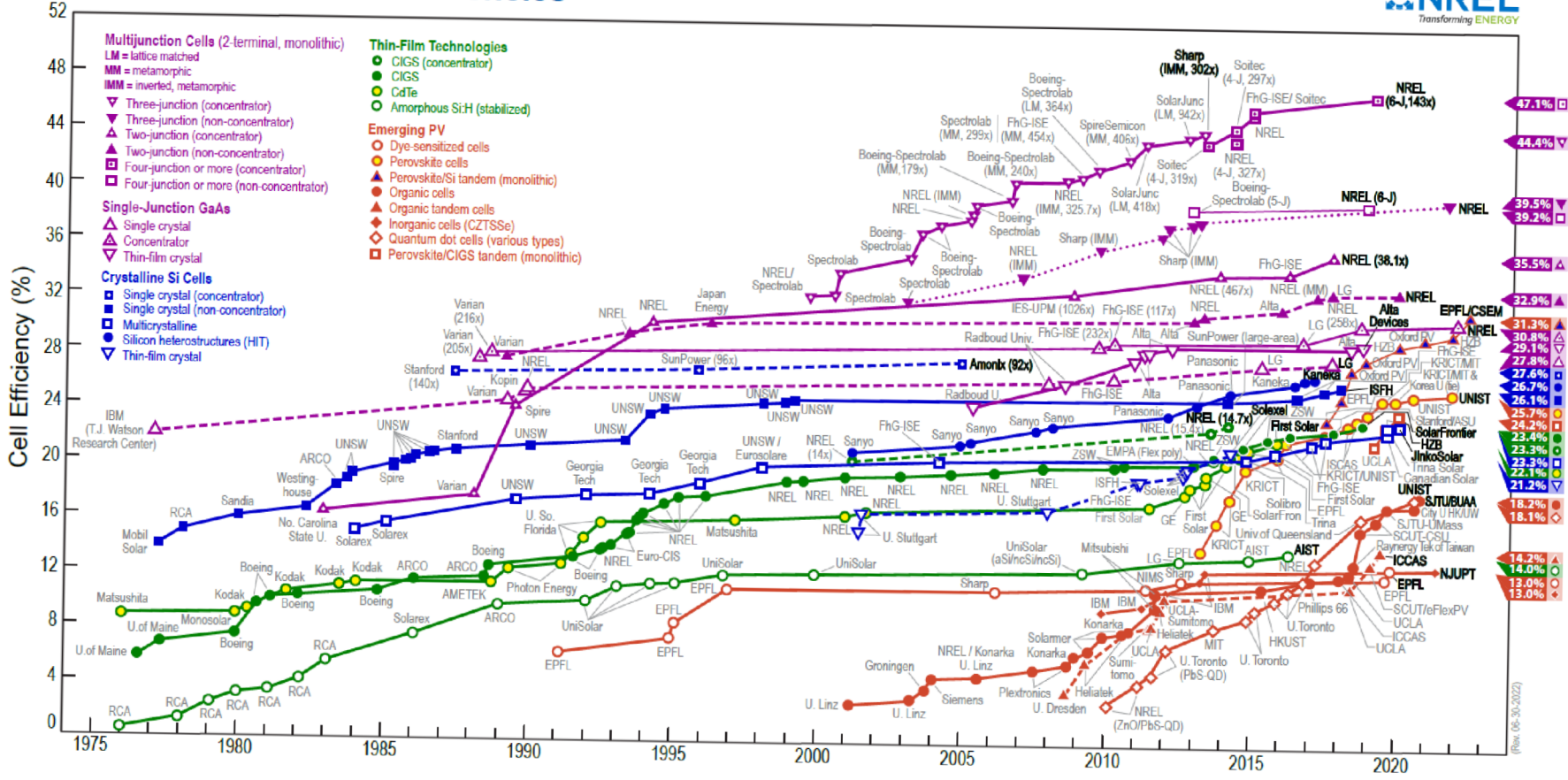
Příloha 3: Závislost ročního úhrnu SSV na čase na jednotlivých stanicích (červeně označena neprokázaná závislost na hladině 5 %)

Příloha 4: Výpočet regrese SSV na ALT v programu R

Příloha 5: Výpočet regrese SSV na LAT v programu R

Příloha 6: Výpočet regrese SSV na ALT + LAT v programu R

Best Research-Cell Efficiencies



Príloha I : Efektivita FV článků od roku 1975 (NREL 2022)

Příloha 2: Vybrané stanice

Lokalita	Kraj	LON / °	LAT / °	ALT / m. n. m.
Praha, Karlov	Hlavní město Praha	14,42778	50,06917	262
Praha, Klementinum	Hlavní město Praha	14,41692	50,08663	217
Praha, Libuš	Hlavní město Praha	14,44694	50,00778	304
Praha, Ruzyně	Hlavní město Praha	14,25556	50,10028	366
Churáňov	Jihočeský kraj	13,61528	49,06833	1 120
Temelín	Jihočeský kraj	14,34222	49,19778	502
Jindřichův Hradec, Děbolín	Jihočeský kraj	14,95750	49,15560	527
Vyšší Brod	Jihočeský kraj	14,31440	48,61750	562
Strážnice	Jihomoravský kraj	17,33810	48,89920	181
Brno, Tuřany	Jihomoravský kraj	16,68889	49,15306	246
Kuchařovice	Jihomoravský kraj	16,08528	48,88111	336
Lednice	Jihomoravský kraj	16,79890	48,79262	182
Krásné Údolí	Karlovarský kraj	12,92096	50,07129	654
Mariánské Lázně, vodárna	Karlovarský kraj	12,69597	49,99062	700
Cheb	Karlovarský kraj	12,39139	50,06833	485
Karlovy Vary, Olšová Vrata	Karlovarský kraj	12,91417	50,20167	605
Dukovany	Kraj Vysočina	16,13444	49,09556	402
Velké Meziříčí	Kraj Vysočina	16,00860	49,35280	460
Nový Rychnov	Kraj Vysočina	15,36500	49,38580	628
Příbyslav, Hřiště	Kraj Vysočina	15,76250	49,58278	544
Pec pod Sněžkou	Královéhradecký kraj	15,72889	50,69194	818
Hradec Králové, Nový H. K.	Královéhradecký kraj	15,83845	50,17765	280
Desná, Souš	Liberecký kraj	15,31970	50,78940	776
Hejnice	Liberecký kraj	15,18317	50,88456	401
Liberec	Liberecký kraj	15,02389	50,76972	400
Červená	Moravskoslezský kraj	17,54194	49,77722	757
Lysá hora	Moravskoslezský kraj	18,44750	49,54611	1 325
Mošnov	Moravskoslezský kraj	18,11278	49,69194	265
Ostrava, Poruba	Moravskoslezský kraj	18,15940	49,82530	254
Protivanov	Olomoucký kraj	16,83105	49,47782	680
Luká	Olomoucký kraj	16,95333	49,65222	518
Paseka	Olomoucký kraj	17,23450	49,77760	274
Přerov	Olomoucký kraj	17,45889	49,46444	214
Nedvězí	Pardubický kraj	16,30970	49,63440	727
Ústí nad Orlicí	Pardubický kraj	16,42222	49,98028	404
Svratouch	Pardubický kraj	16,03417	49,73500	736
Klatovy	Plzeňský kraj	13,30302	49,39042	425
Plzeň, Bolevec	Plzeňský kraj	13,38641	49,78838	335
Kralovice	Plzeňský kraj	13,49401	49,98182	453
Přimda	Plzeňský kraj	12,67806	49,66944	745

Rožmitál pod Třemšínem	Středočeský kraj	13,86640	49,60500	540
Neumětely	Středočeský kraj	14,03750	49,85420	327
Brandýs nad Labem - St. B.	Středočeský kraj	14,66060	50,18970	183
Semčice	Středočeský kraj	15,00360	50,36710	238
Tušimice	Ústecký kraj	13,32806	50,37667	330
Ústí nad Labem, Kočkov	Ústecký kraj	14,04111	50,68333	377
Žatec	Ústecký kraj	13,54319	50,34147	225
Varnsdorf	Ústecký kraj	14,60222	50,90556	372
Holešov	Zlínský kraj	17,57000	49,32056	224
Valašské Meziříčí	Zlínský kraj	17,97420	49,46360	337

Příloha 3: Závislost ročního úhrnu SSV na čase na jednotlivých stanicích (červeně označena neprokázaná závislost na hladině 5 %)

Lokalita	Kraj	p-value	R ² 1991-2020	b 1991-2020
Praha, Karlov	Hlavní město Praha	0,1507	0,0699	4,7041
Praha, Klementinum	Hlavní město Praha	0,6797	0,0060	-1,1904
Praha, Libuš	Hlavní město Praha	0,8064	0,0021	0,7622
Praha, Ruzyně	Hlavní město Praha	0,7575	0,0033	-0,9698
Churáňov	Jihočeský kraj	0,4804	0,0173	2,0682
Temelín	Jihočeský kraj	0,3453	0,0308	-2,5637
Jindřichův Hradec, Děbolín	Jihočeský kraj	0,2003	0,0559	3,5546
Vyšší Brod	Jihočeský kraj	0,0130	0,1945	7,0900
Strážnice	Jihomoravský kraj	0,1347	0,0755	3,6634
Brno, Tuřany	Jihomoravský kraj	0,9133	0,0004	-0,3465
Kuchařovice	Jihomoravský kraj	0,5717	0,0112	1,4848
Lednice	Jihomoravský kraj	0,0303	0,1518	4,9946
Krásné Údolí	Karlovarský kraj	0,0213	0,1695	6,5998
Mariánské Lázně, vodárna	Karlovarský kraj	0,0546	0,1215	-5,5639
Cheb	Karlovarský kraj	0,7039	0,0051	1,2586
Karlovy Vary, Olšová Vrata	Karlovarský kraj	0,7554	0,0193	2,8808
Dukovany	Kraj Vysočina	0,5859	0,0104	-1,4937
Velké Meziříčí	Kraj Vysočina	0,5412	0,0130	1,5989
Nový Rychnov	Kraj Vysočina	0,2283	0,0496	3,7185
Přibyslav, Hřiště	Kraj Vysočina	0,8362	0,0015	-0,6053
Pec pod Sněžkou	Královéhradecký kraj	0,3101	0,0355	-2,9375
Hradec Králové, Nový H. K.	Královéhradecký kraj	0,0497	0,1264	6,3545
Desná, Souš	Liberecký kraj	0,0257	0,1601	-7,5946
Hejnice	Liberecký kraj	0,0483	0,1278	6,2488
Liberec	Liberecký kraj	0,3715	0,0276	2,8506
Červená	Moravskoslezský kraj	0,3281	0,0037	0,9021
Lysá hora	Moravskoslezský kraj	0,8266	0,0017	0,5869
Mošnov	Moravskoslezský kraj	0,0293	0,1534	6,5423
Ostrava, Poruba	Moravskoslezský kraj	0,4056	0,0240	2,2266
Protivanov	Olomoucký kraj	0,6057	0,0093	-1,4913
Luká	Olomoucký kraj	0,1281	0,0780	4,5423
Paseka	Olomoucký kraj	0,0001	0,4185	12,8710
Přerov	Olomoucký kraj	0,0261	0,1593	5,9798
Nedvězí	Pardubický kraj	0,8221	0,0018	-0,6992
Ústí nad Orlicí	Pardubický kraj	0,5458	0,0127	1,8079
Svratouch	Pardubický kraj	0,6201	0,0086	1,3838
Klatovy	Plzeňský kraj	0,4497	0,0198	2,9805
Plzeň, Bolevec	Plzeňský kraj	0,2449	0,0463	3,0079
Kralovice	Plzeňský kraj	0,9580	0,0001	-0,1926

Přimda	Plzeňský kraj	0,5766	0,0109	-1,8021
Rožmitál pod Třemšínem	Středočeský kraj	0,2569	0,0441	-3,3836
Neumětely	Středočeský kraj	0,0944	0,0935	5,3475
Brandýs nad Labem - St. B.	Středočeský kraj	0,0015	0,2987	9,3329
Semčice	Středočeský kraj	0,3750	0,0272	2,7181
Tušimice	Ústecký kraj	0,1233	0,0799	4,5646
Ústí nad Labem, Kočkov	Ústecký kraj	0,0504	0,1256	6,5273
Žatec	Ústecký kraj	0,0095	0,2104	8,5722
Varnsdorf	Ústecký kraj	0,1301	0,0772	4,7954
Holešov	Zlínský kraj	0,1273	0,0783	3,9520
Valašské Meziříčí	Zlínský kraj	0,8091	0,0020	-0,6027

Příloha 4: Výpočet regrese SSV na ALT v programu R

```
summary(lm(data$SSV~data$ALT))
```

```
Call:
```

```
lm(formula = data$SSV ~ data$ALT)
```

```
Residuals:
```

```
  Min   1Q  Median   3Q   Max
-273.12 -71.79  14.76  84.19 192.44
```

```
Coefficients:
```

```
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 1753.27594  34.13794  51.359 <2e-16 ***
data$ALT    -0.15988   0.06539  -2.445  0.0182 *
```

```
---
```

```
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 110.2 on 48 degrees of freedom
```

```
Multiple R-squared: 0.1108, Adjusted R-squared: 0.09224
```

```
F-statistic: 5.979 on 1 and 48 DF, p-value: 0.0182
```

Příloha 5: Výpočet regrese SSV na LAT v programu R

```
summary(lm(data$SSV~data$LAT))
```

```
Call:
```

```
lm(formula = data$SSV ~ data$LAT)
```

```
Residuals:
```

```
  Min   1Q   Median   3Q   Max
-252.81 -32.55  12.81  65.93 173.73
```

```
Coefficients:
```

```
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  7415.16  1227.21   6.042 2.16e-07 ***
data$LAT    -115.20   24.65  -4.674 2.42e-05 ***
```

```
---
```

```
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 96.91 on 48 degrees of freedom
Multiple R-squared: 0.3128, Adjusted R-squared: 0.2985
F-statistic: 21.85 on 1 and 48 DF, p-value: 2.42e-05
```

Příloha 6: Výpočet regrese SSV na ALT + LAT v programu R

```
lm.1<-lm(data$SSV~data$LAT+data$ALT,data=data)
summary(lm.1)
```

Call:

```
lm(formula = data$SSV ~ data$LAT + data$ALT, data = data)
```

Residuals:

```
Min 1Q Median 3Q Max
-275.06 -34.17 18.45 55.59 144.09
```

Coefficients:

```
Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 7652.55186 1121.51413 6.823 1.51e-08 ***
data$LAT -118.36813 22.49632 -5.262 3.45e-06 ***
data$ALT -0.17175 0.05247 -3.273 0.002 **
```

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 88.38 on 47 degrees of freedom
Multiple R-squared: 0.4404, Adjusted R-squared: 0.4166
F-statistic: 18.49 on 2 and 47 DF, p-value: 1.189e-06