

Česká zemědělská univerzita v Praze  
Fakulta životního prostředí

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2022

Lucie Vaňoutová

Česká zemědělská univerzita v Praze  
Fakulta životního prostředí  
Katedra vodního hospodářství a environmentálního  
modelování

Semivariogramy denních srážkových úhrnů  
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Máca, Ph.D.

Bakalant: Lucie Vaňoutová

2022

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Lucie Vaňoutová

Krajinářství  
Vodní hospodářství

Název práce

**Semivariogramy denních srážkových úhrnů**

Název anglicky

**The semivariograms of dailly rainfall rates**

---

### Cíle práce

Odvoďte pro data denních srážkových úhrnů empirické a teoretické semivariogramy. Semivariogramy odvoďte na základě zpracování dat z různých období.

### Metodika

Metodický postup se skládá z následujících kroků:

1. Příprava data pro stanovení semivariogramů
2. Stanovení empirických semivariogramů
3. Odvození parametrů teoretických semivariogramů
4. Porovnání semivariogramů stanovených pro různá období

## Doporučený rozsah práce

standarní

## Klíčová slova

srážky, interpolace, semivariogram, prostorová kovariance

---

## Doporučené zdroje informací

Goovaerts, P. Geostatistics for natural resources evaluation. Applied geostatistics series. Oxford University Press, Incorporated, 1997. ISBN 9780195115383.

Hanel, M. – Máca, P. Spatial variability and interdependence of rain event characteristics in the Czech Republic. Hydrological Processes. 2013. ISSN 1099-1085.

Viessman, W. – Lewis, G. L. – Knapp, J. W. Introduction to Hydrology, 3rd Edition. Harper & Row, 1989. ISBN 978-0-06-046822-4.

---

## Předběžný termín obhajoby

2021/22 LS – FZP

## Vedoucí práce

doc. Ing. Petr Máca, Ph.D.

## Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 14. 3. 2022

**prof. Ing. Martin Hanel, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 15. 3. 2022

**prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.**

Děkan

V Praze dne 25. 03. 2022

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou/závěrečnou práci na téma: „Semivariogramy denních srážkových úhrnů“ vypracoval/a samostatně a citoval/a jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil/a, a které jsem rovněž uvedl/a na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědom/a, že na moji bakalářskou/závěrečnou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom/a, že odevzdáním bakalářské/závěrečné práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzi tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze dne .....

.....

Lucie Vaňoutová

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Petrovi Mácovi, Ph.D. za trpělivost a za čas, který mi v rámci této bakalářské práce věnoval.

# **Semivariogramy denních srážkových úhrnů**

## **Abstrakt**

Práce se zabývá odvozením empirických a teoretických semivariogramů pro data denních srážkových úhrnů sítě srážkoměrných stanic Českého hydrometeorologického ústavu na území České republiky. Bylo provedeno odvození semivariogramů na základě zpracování dat z různých časových období. Pro vyhotovení semivariogramů byl v této bakalářské práci použit Maternův model semivariogramu. První část se zabývá metodikou, daty a představením semivariogramů. Ve druhé části jsou odvozeny samotné semivariogramy pro různá časová období.

## **Klíčová slova**

srážky, interpolace, semivariogram, prostorová korelace

# **The semivariograms of daily rainfall rates**

## **Abstract**

The thesis deals with the derivation of empirical and theoretical semivariograms for the total data of daily precipitation produced by the network of precipitation measuring stations of the Czech Hydrometeorological Institute in the Czech Republic. Derivation of semivariogram's based on data processing from different time periods. The Matern semivariogram model was used to make semivariograms in this bachelor thesis. The first part deals with the methodology, data and semivariograms estimation. In the second part there are derived single semivariograms for different time periods.

## **Key words**

precipitation, interpolation, semivariogram, spatial correlation

# Obsah

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 1. Úvod.....                    | 1  |
| 1.1 Srážky.....                 | 1  |
| 1.2 Data.....                   | 2  |
| 1.3 Interpolace.....            | 3  |
| 1.4 Cíl bakalářské práce.....   | 6  |
| 2. Metodika.....                | 7  |
| 2.1 Data.....                   | 7  |
| 2.2 Semivariogram.....          | 15 |
| 3. Výsledky.....                | 26 |
| 3.1 Měsíční data.....           | 26 |
| 3.2 Sezónní data.....           | 37 |
| 3.3 Data pro 10letá období..... | 43 |
| 4. Diskuse.....                 | 50 |
| 5. Závěr.....                   | 51 |
| 6. Použitá literatura.....      | 52 |



# 1. Úvod

## 1.1 Srážky

V české meteorologické terminologii souborné označení pro hydrometeory. Rozeznáváme buď srážky padající nebo usazené. Mezi padající srážky, které dosahují zemského povrchu, patří následující hydrometeory: déšť, mrznoucí déšť, mrholení, mrznoucí mrholení, sníh, sněhové krupky, sněhová zrna, krupky, zmrzlý déšť, kroupy a ledové jehličky. Mezi usazené srážky řadíme následující hydrometeory: rosa, jíní, námraza, ledovka a srážky z mlhy [31].

Podle časového údaje se dělí padající srážky na:

Srážky trvalého rázu jsou srážky se stálou intenzitou velkoplošných srážek, které mají delší dobu trvání.

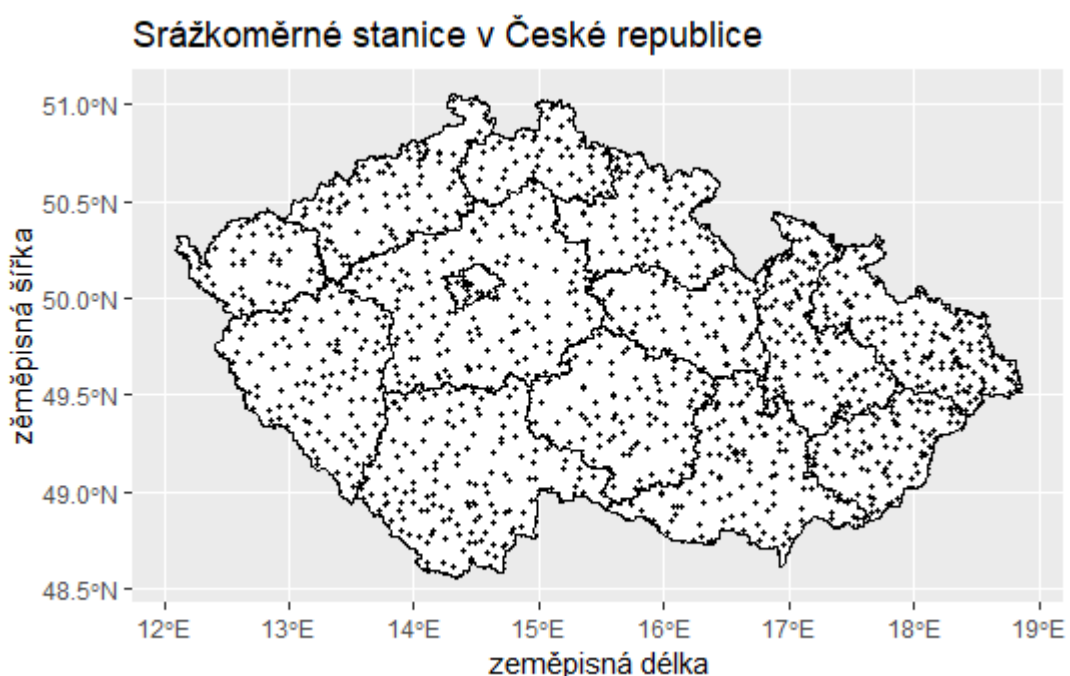
Srážky občasného rázu, jedná se o opakovaný výskyt srážek, přičemž přestávky mezi jednotlivými srážkovými jevy jsou relativně dlouhé (řádově hodiny). Tento výraz se používá jak u velkoplošných, tak i u konvektivních (přeháňky) srážek [1].

Přeháňky mají krátkou dobu trvání jedná se řádově o minuty nebo desítky minut. Intenzita srážek a množství oblačnosti poměrně rychle kolísá a mezi jednotlivými přeháňkami dochází nezřídka i k vyjasnění [1].

Pro měření srážek se v současnosti užívají dva typy srážkoměrných stanic, manuální nebo automatické. Na stanicích s automatickým srážkoměrem je umístěn jeden ze dvou typů automatických srážkoměrů, a to člunkový nebo váhový. Všechny srážkoměry musí být umístěny na podstavci tak, aby horní okraj velké srážkoměrné nádoby byl ve výšce 1 metru nad terénem. Na stanicích v pozorovací síti ČHMÚ se standardně používají srážkoměry se zachytnou plochou 500 cm<sup>2</sup>. Výšce srážek 1 mm odpovídá množství vody 1 litr na 1 m<sup>2</sup> vodorovné plochy [4].

## 1.2 Data

Pro tuto bakalářskou práci byla použita data poskytnutá a pořízená Českým hydrometeorologickým ústavem z 1 300 manuálních a automatických stanic po celé České republice v časové řadě od 1.1.1961 do 31.12.2019. Datový balík obsahuje maximální teplotu vzduchu (TMA), minimální teplotu vzduchu (TMI), teplotu vzduchu (T), rychlost větru (F), vlhkost (H), tlak (P), celkovou výšku sněhu (SCE), srážky (SRA) a sluneční svit (SSV). Tato práce je zaměřená pouze na hodnoty srážek. Na následujícím obrázku je vyobrazena mapa srážkoměrných stanic v České republice.



*obr. 1.1 Srážkoměrné stanice na území České republiky*

Srážkoměrné stanice nepokrývají celé území České republiky v dostatečné hustotě. Na mnoha místech neznáme informaci o srážkách. Nicméně je možné bodovou informaci ze srážkoměřů použít pro odhad srážek mimo místa měření. K tomuto účelu jsou použity interpolační postupy.

### 1.3 Interpolace

Interpolace je postup, který předpovídá hodnoty určité proměnné v požadovaných nevzorkovaných bodech na základě naměřených hodnot v bodech zájmové oblasti v okolí těchto nevzorkovaných bodů [3]. Pomocí interpolace lze vypočítat mnoho prostorových typů dat, například srážky, data o nadmořské výšce, hladinu podzemní vody nebo hustotu zalidnění.

Pro vytvoření plynulé mapy je nutné použít vhodnou metodu interpolace pro optimální odhad hodnot v místech, kde nebyla pořízena nebo nejsou k dispozici žádná data. Interpolovaná data mohou být následně použita pro různé analýzy [6].

Jednou z nejjednodušších, často používaných a oblíbených metod je metoda IDW neboli metoda Vážených inverzních vzdáleností (Inverse Distance Weighting). Tato metoda je založena na principu váženého průměru, jehož váhy jsou nepřímo úměrné mocnině vzdálenosti mezi interpolovaným bodem a naměřenými body [7]. Váhy jsou přiřazeny vzorkovacím bodům pomocí váhového koeficientu, který určuje, jak vliv vah klesá s přibývajícím vzdáleností od interpolovaného bodu. Čím větší je váhový koeficient, tím menší efekt budou mít body, které jsou daleko od interpolovaného bodu. Při zvyšování koeficientu se hodnota neznámého bodu blíží k hodnotě nejbližšího pozorovacího bodu [6].

Další hojně používanou metodou je metoda RBF neboli metoda Radiálních bázových funkcí (Radial Basis Function). Metoda RBF je využívána především při aproximaci funkcí, v počítačové grafice, při interpolacích a také při řešení parciálních diferenciálních rovnic. Tato metoda je založena na výpočtu sumy jednotlivých kvadratických povrchů vážených příslušnými váhami, jejichž hodnoty je nutné určit [8]. Interpolační křivka nebo plocha vzniká jako lineární kombinace funkcí vzdálenosti mezi známými body. Stejně jako u metody IDW i zde platí, že každý naměřený bod má vliv na interpolaci stejně ve všech směrech svého okolí a čím blíže je datový bod interpolovanému bodu, tím na něj má větší vliv [7].

Významnou geostatickou interpolační metodou je metoda Kriging. Krigování je založeno na principu využití informace o prostorové kovarianční struktuře. Aby byla chyba odhadu co nejmenší musí být váhy váženého průměru optimalizovány za pomoci semivariogramu, který vyjadřuje vlastnosti prostorové proměnné. Když je hodnota odhadována pomocí krigingu v určitém bodě v prostoru jedná se potom o bodový kriging (point kriging). Když je hodnota odhadována pomocí krigingu pro určitou část prostoru jde o blokový kriging (block kriging). Výsledkem krigování je shlazený průběh prostorové veličiny, který minimalizuje chybu odhadu [7]. Pro různé okolnosti bylo v průběhu let vyvinuto mnoho typů krigingu, tak aby chyba odhadu byla co nejmenší. V tabulce 1.1 je vypsán přehled základních typů krigingu.

|                        |   |
|------------------------|---|
| Simple kriging         | předpokládá známou střední hodnotu v celé oblasti               |
| Ordinary kriging       | předpokládá neznámou střední hodnotu, konstantní v celé oblasti |
| Universal kriging      | uvažuje trend stejného typu v celé oblasti                      |
| IRFk kriging           | nepracuje s hodnotami veličiny ale s jejich rozdíly (přípustky) |
| Indicator kriging      | namísto veličiny se pracuje s indikátorovou funkcí              |
| Probability kriging    | modifikovaný indicator kriging                                  |
| Disjunctive kriging    | nelineární zobecnění krigingu                                   |
| Lognormal kriging      | kriging lognormální veličiny                                    |
| Cokriging              | využívá další veličinu  |
| External drift kriging | využívá korelaci se známou prostorovou veličinou                |

*tab 1.1 Přehled základních typů krigingu [převzato z: Ježek, Josef. Geostatistika a prostorová interpolace. Charles University in Prague, Karolinum Press, 2016.]*

Nejběžněji používaným typem krigingu je SK neboli jednoduchý kriging (Simple kriging), kterému se taky říká obyčejný kriging, obvyklý kriging nebo běžný kriging. Jednoduchý kriging, jak už název vypovídá je takovým stavebním kamenem pro odvozování dalších typů krigingu. Jednoduchý kriging je postavený na tom, že předpokládá známou střední hodnotu v celé oblasti. Tento typ krigování se využívá, když je známá střední hodnota prostorové proměnné nebo je odhadnuta s dostatečnou přesností.

Univerzální kriging (Universal kriging) nebo také nestacionární kriging je typ krigingu, který se využívá, když v interpolovaných datech existuje trend, tedy když je zpozorován systematický pokles nebo nárůst. UK uvažuje trend stejného typu v celé oblasti nebo místo od místa.

Cokriging je typ krigování, který využívá další veličinu, jestliže jsou zkoumané veličiny na sobě závislé. Tato metoda zajišťuje nestranné odhady s minimálním a známým rozptylem [10].

Interpolovat lze několika metodami, z nichž u metod krigování je nutné nejdříve vyhodnotit semivariogram s jehož pomocí je následně možné interpolaci provést.

Srážky lze také popsat pomocí rovnice

$$S(x) = m(x) + e_1(x) + e_2(x),$$

(1.1)

kde  $S$  je interpolovaná proměnná. V případě této bakalářské práce se jedná o srážky,  $x$  je pozice v prostoru,  $S(x)$  je tedy hodnota proměnné v bodě  $x$ ,  $m(x)$  je deterministická složka (trend) v bodě  $x$  a  $e_1(x) + e_2(x)$  je stochastická složka (regionalizovaná proměnná) v bodě  $x$ . Stochastická složka  $e_1(x)$  se získává pomocí semivariogramu, kterému se věnuje tato práce. Semivariogram popisuje prostorovou kovarianční strukturu pro daný interpolovaný proces. Semivariogram je zásadní částí velké skupiny interpolačních postupů. Pro jeho stanovení existuje celá řada postupů, a proto se ne něj bude tato práce zaměřovat.

## 1.4 Cíl bakalářské práce

Interpolace srážek je velmi důležitá. Pomocí interpolačních metod se dopočítávají chybějící data ze srážkoměrných stanic, které jsou zaznamenány v různém časovém kroku. Interpolací lze určit výšku srážky na neměřeném místě.

Jelikož existuje řada interpolačních metod tato práce je zaměřená pouze na důležitou část interpolačních postupů, které využívají semivariogramy. Pro vyhotovení semivariogramů v této bakalářské práci byl použit Maternův model semivariogramu.

Cílem bakalářské práce je popsat semivariogramy vyhotovené pro data sítě srážkoměrných stanic Českého hydrometeorologického ústavu na území České republiky v různých časových úsecích, posoudit a porovnat, jak statisticky významné jsou jejich odhadované hodnoty parametrů.

Pro potřeby řešení práce byla připravena data pro stanovení semivariogramů, následně byly stanoveny empirické semivariogramy, odvozeny parametry teoretických semivariogramů a nakonec porovnány semivariogramy stanovené pro různá období.

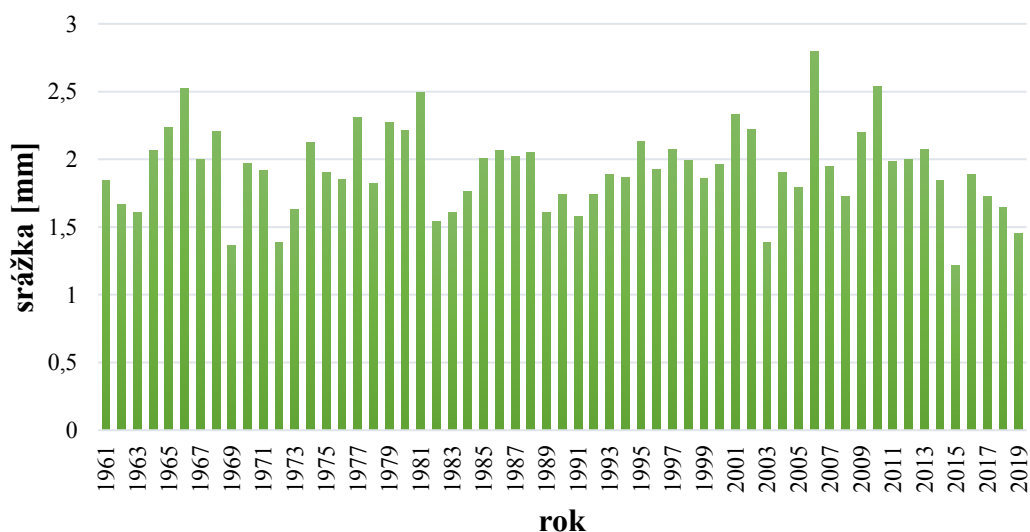
## 2. Metodika

### 2.1 Data

Pro řešení bakalářské práce byla využita data, poskytnutá dle zákona 123/1998 Sb. [<https://www.chmi.cz/>]. Z poskytnutých srážkových dat z celé České republiky v časové řadě od 1.1.1961 do 31.12.2019, byly odstraněny NA (not available) hodnoty neboli nedostupně hodnoty. Následně bylo možné stanovit průměrné srážky, maximální srážky a celkový úhrn pro určitá období. Časová řada byla rozdělena na roky, desetiletí, měsíce a sezóny a pro ně byly stanoveny výše uvedené hodnoty a vyneseny do grafů. Následující vyhodnocení zpracovávají průměry a maxima hodnot srážek větších než 0, které byly stanoveny z dat dní, ve kterých přšelo.

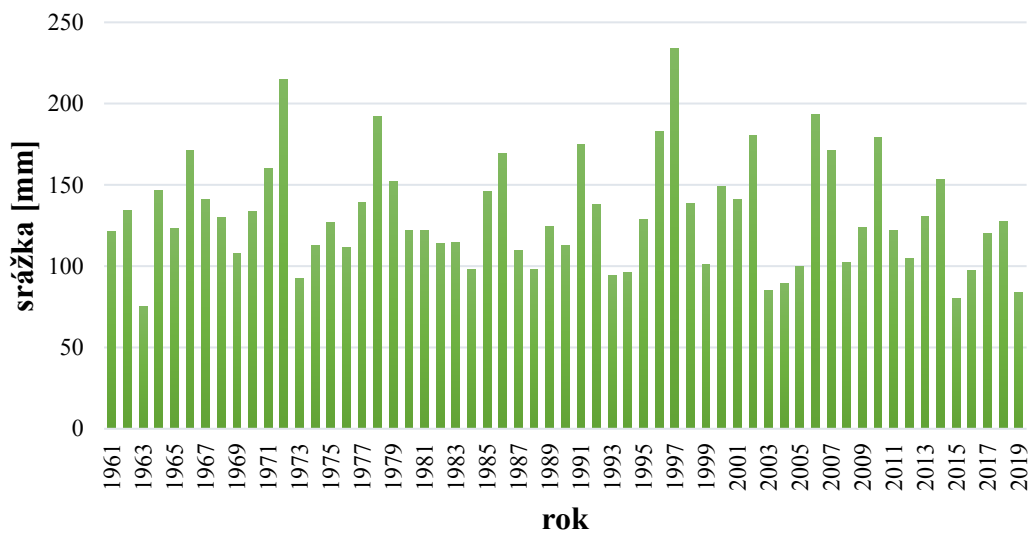
#### Roční data

Z obrázku 2.1, kde jsou do grafu vyneseny roční průměrné denní úhrny srážek lze vyčíst, že nejmenší roční průměrný denní průměr byl v roce 2015, 1,219557 mm srážek, a naopak největší v roce 2006, 2,79429 mm srážek.



obr. 2.1 Roční průměrné denní úhrny srážek v České republice pro roky 1961–2019

Na obrázku 2.2 jsou do grafu vyneseny roční maximální denní úhrny srážek v České republice pro roky 1961-2019. Rok 1963 je rok kdy bylo naměřeno nejmenší roční maximum a to 75,0 mm srážek. Největší roční maximum bylo v roce 1997 a naměřeno bylo 233,8 mm srážek.

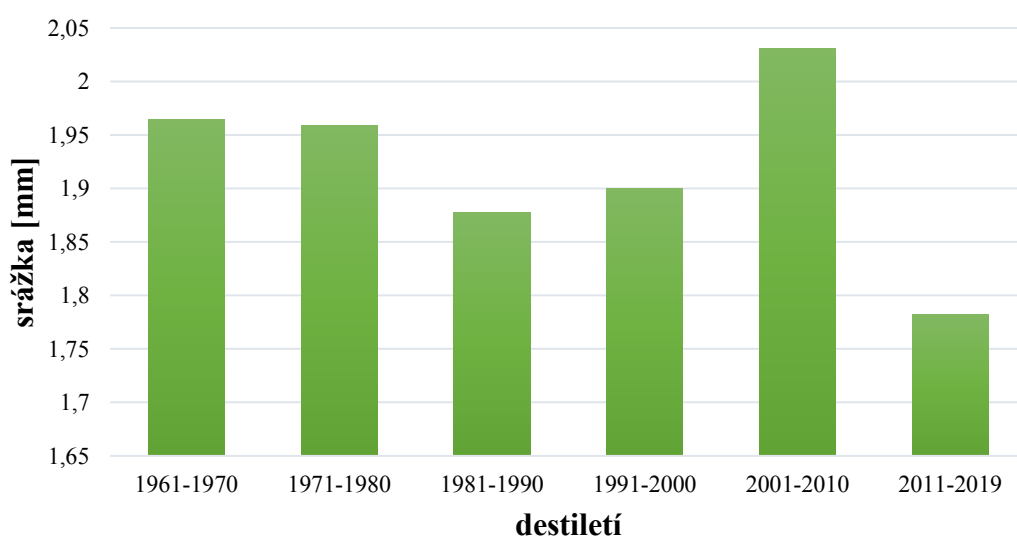


obr. 2.2 Roční maximální denní úhrny srážek v České republice pro roky 1961–2019



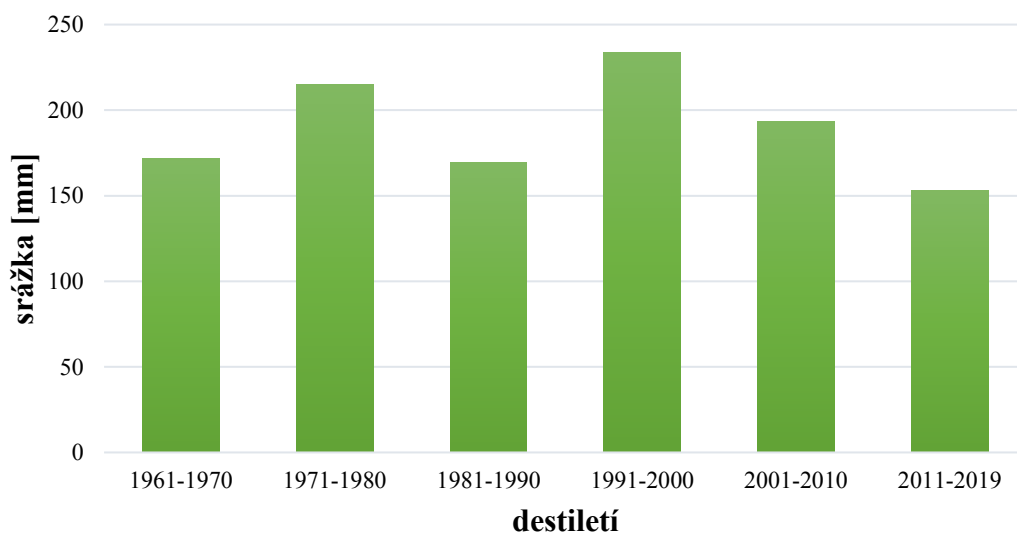
### Data pro 10letá období

Na obrázku 2.3 jsou graficky znázorněny průměrné denní úhrny srážek pro desetiletí v České republice pro roky 1961-2019. Období s nejmenší průměrnou denní srážkou je od roku 2011 do roku 2019 kdy průměrná denní srážka činila 1,8 mm srážek. V období od roku 2001 do roku 2010 bylo naopak období s největší průměrnou srážkou a to 2,0 mm srážek.



obr. 2.3 Průměrné denní úhrny srážek pro desetiletí v České republice pro roky 1961–2019

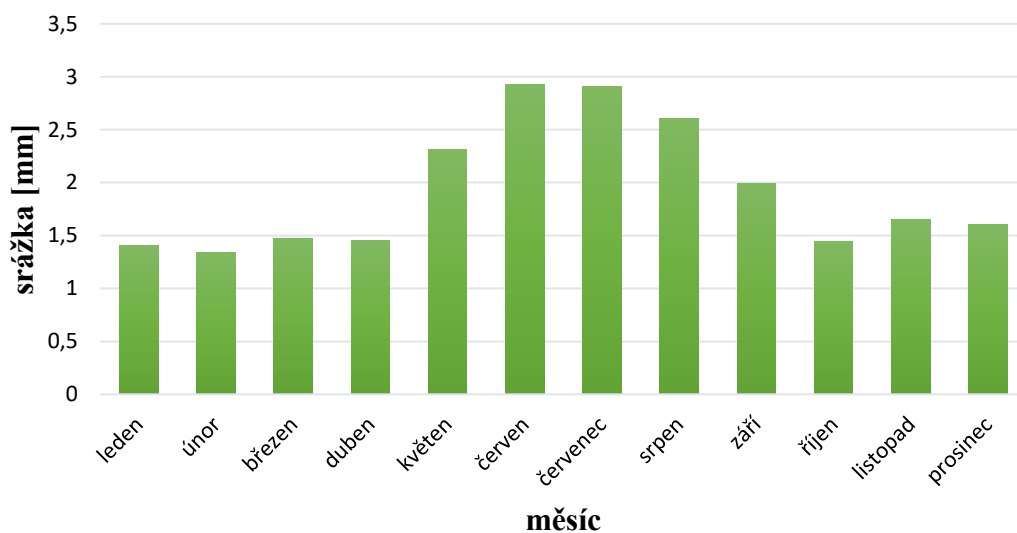
Z obrázku 2.4, na kterém jsou uvedeny maximální denní úhrny srážek pro jednotlivá desetiletí je patrné, že nejmenší maximální denní srážkový úhrn byl v letech 2011 až 2019, kdy bylo naměřeno maximum 153,2 mm srážek. Největší maximální denní úhrn byl v letech 1991 až 2000, a to 233,8 mm srážek.



obr. 2.4 Maximální denní úhrny srážek pro desetiletí v České republice pro roky 1961–2019

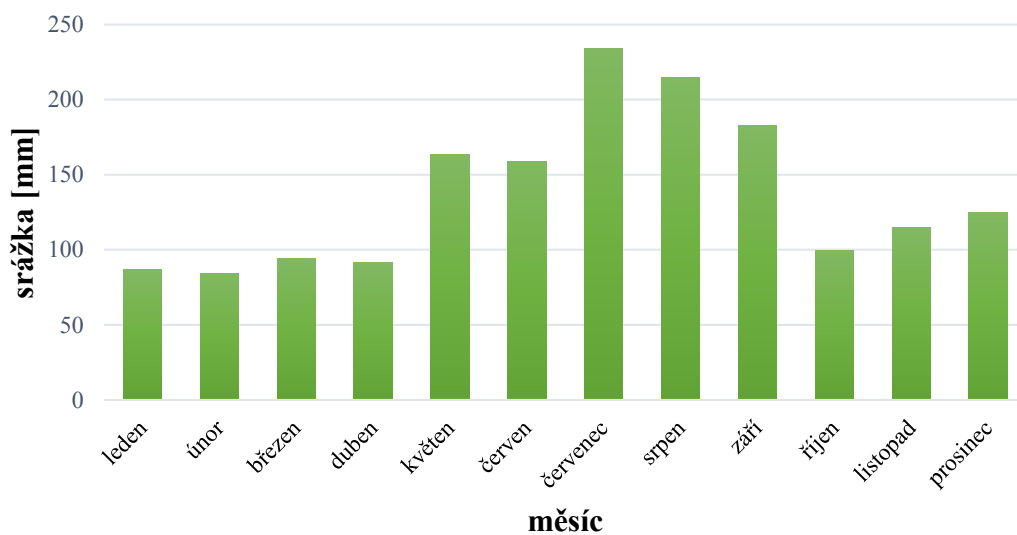
## Měsíční data

Z obrázku 2.5, na kterém jsou graficky znázorněny měsíční průměrné denní úhrny srážek v České republice pro roky 1961-2019 je možné vyčíst, že nejmenší průměrný denní úhrn srážek je v měsíci únoru, kdy byl 1,3 mm srážek. Největší průměrný denní úhrn srážek byl pozorován v měsíci červnu, kdy činil 2,9 mm srážek.



obr. 2.5 Měsíční průměrné denní úhrny srážek v České republice pro roky 1961–2019

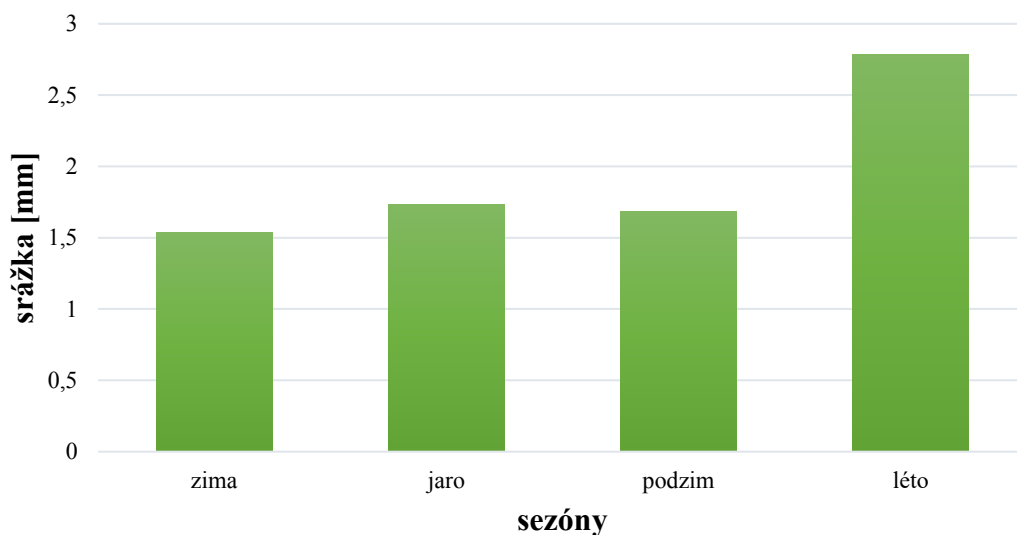
Na obrázku 2.6 je graf pro měsíční maximální denní úhrny srážek. Nejmenší maximální denní úhrn srážek v měsíci byl naměřen v měsíci únoru a to 84,5 mm srážek. Naopak největší maximální úhrn srážek byl v měsíci červenci, 233,8 mm srážek.



obr. 2.6 Měsíční maximální denní úhrny srážek v České republice pro roky 1961-2019

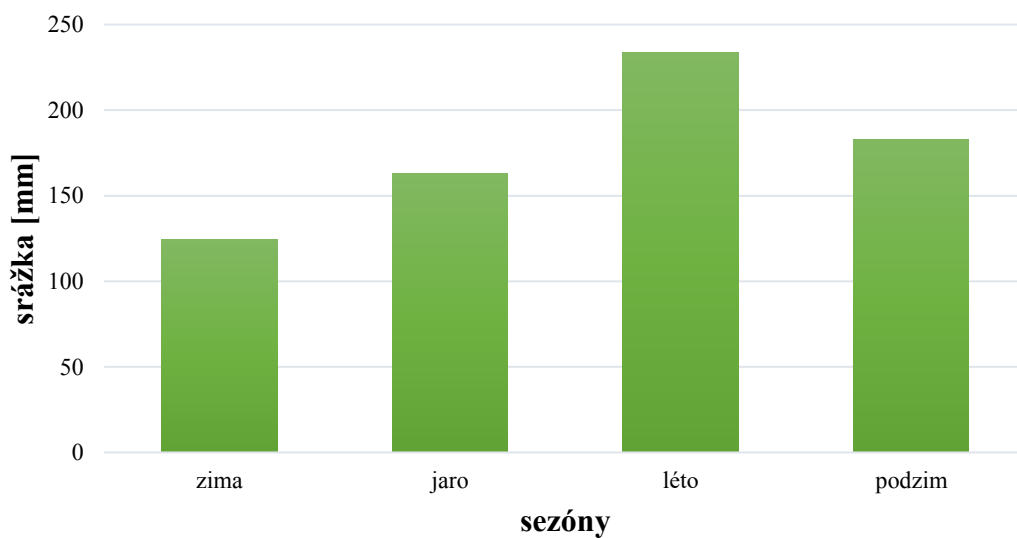
## Sezónní data

Obrázek 2.7 graficky znázorňuje sezónní průměrné denní úhrny srážek v České republice pro roky 1961-2019. Nejmenší průměrný denní sezónní úhrn srážek byl naměřen v zimním období, a to 1,5 mm srážek. Největší průměrný sezónní úhrn byl v letní sezóně, kdy činil 2,8 mm srážek.



obr. 2.7 Sezónní průměrné denní úhrny srážek v České republice pro roky 1961-2019

Z obrázku 2.8, kde jsou do grafu vyneseny sezónní maximální denní úhrny srážek je možné vyčíst, že nejmenší sezónní denní maximum padlo v zimě, a to 124,7 mm srážek. Na druhou stranu největší maximální denní sezónní srážka byla naměřena v letní sezóně, kdy se vyšplhala do výše 233,8 mm srážek.



obr. 2.8 Sezónní maximální denní úhrny srážek v České republice pro roky 1961-2019

## 2.2 Semivariogram

Semivariogram znázorňuje prostorovou kovarianční strukturu měřených bodů vzorku. Jakmile je každá dvojice míst vykreslena, proloží se jimi model. Existují určité charakteristiky, které se běžně používají k popisu těchto modelů [11].

Funkce semivariogramu kvantifikují předpoklad, že data naměřená blízko sebe jsou si mnohem podobnější než data, která byla naměřena daleko od sebe. Cílem semivariogramu je co nejpřesněji se přizpůsobit a začlenit znalosti o daném jevu do interpolačního modelu, který je potom možné použít k předpovědím.

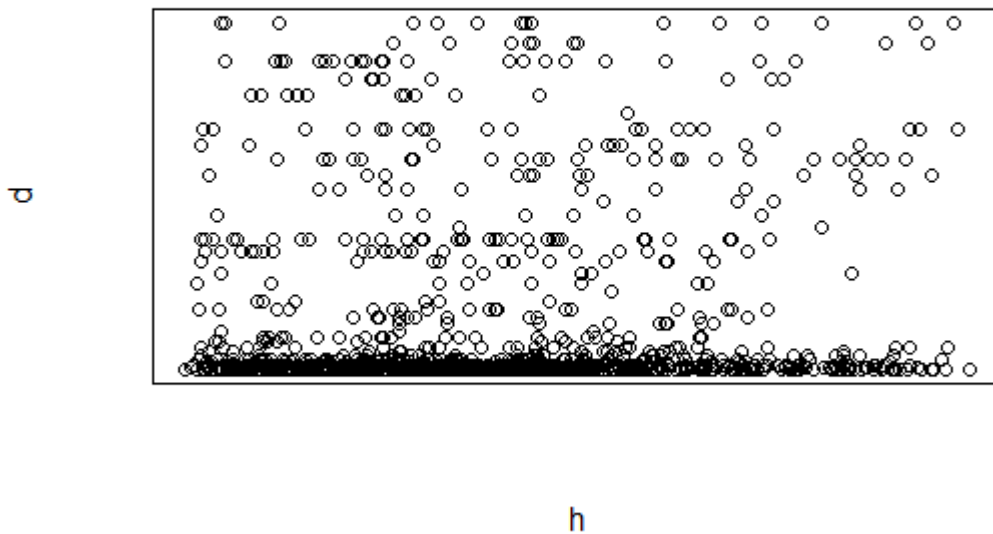
### Empirický semivariogram

Empirický semivariogram udává informace o datech v měřených místech. Pro určení hodnot v neměřených bodech je třeba si zvolit správný typ funkce, který ovlivňuje předpoklad hodnot v neznámých bodech. Volba správného typu funkce závisí na prostorové autokorelaci a také na znalosti vlastností jevu, který je zkoumán. Pro vyhotovení empirického semivariogramu existuje mnoho postupů [12].

Pro výpočet empirického semivariogramu je v první řadě nutné určit vzdálenosti všech párů měřených bodů. Výpočet všech párových vzdáleností mezi místy:

$$h(x_i; x_j) = |x_i - x_j| \tag{2.1}$$

kde  $x_i$  je souřadnice jednoho datového bodu a  $x_j$  je souřadnice druhého datového bodu [13]. Takto stanovená data lze zobrazit pomocí takzvaného semivariogramového mraku (semivariogram cloud) viz obrázek 2.9.



obr. 2.9 Semivariogramový mrak (semivariogram cloud),  $h$  je vzdálenost (lag),  $d$  je hodnota rozptylu

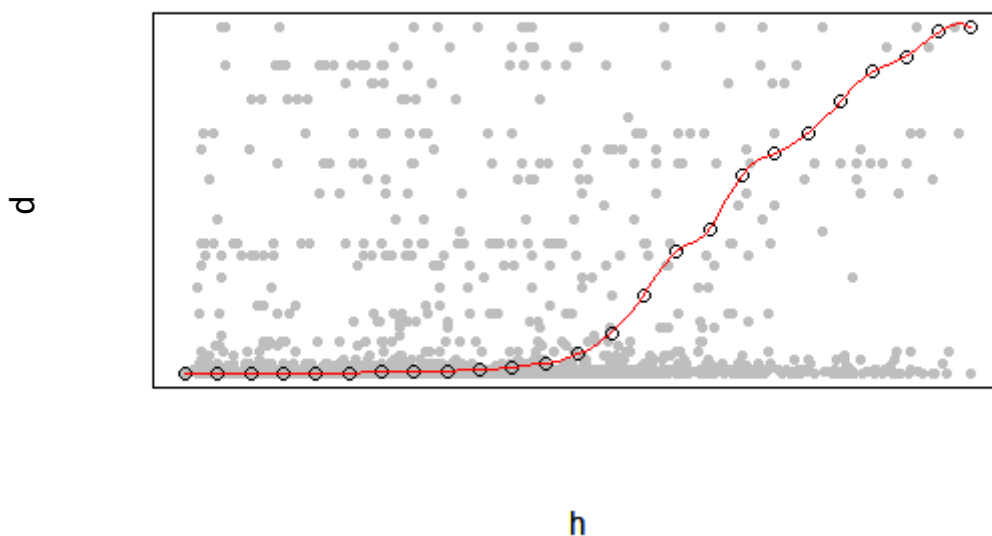
Následně se na základě vzdálenosti a směru mezi měřenými body osa  $h$  rozdělí na intervaly, takzvané distanční třídy. V každé ze vzniklých tříd spočítáme průměrnou nepodobnost a tu vyneseme do středu intervalů. Kdy vzdálenost středů tříd se nazývá krok semivariogramu (lag).

Výpočet empirického semivariogramu lze zapsat vzorcem:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{|x_i - x_j| \approx h} [z(x_i) - z(x_j)]^2 \quad (2.2)$$

kde  $\gamma(h)$  je odhadovaná semivariance pro  $h$ ,  $h$  je vzdálenost odpovídající středům distančních tříd a  $N(h)$  je počet dvojic datových bodů v třídách [7]. Na obrázku 2.10 je vyobrazeno schema výpočtu empirického semivariogramu.





obr. 2.10 Schéma výpočtu empirického semivariogramu,  $h$  je vzdálenost (lag),  $d$  je hodnota rozptylu

### **Teoretický semivariogram**

Z empirického semivariogramu nelze vyčíst hodnotu nepodobnosti ( $\gamma$ ) pro libovolnou vzdálenost ( $h$ ), jelikož je tvořen separovanými body. Je tedy potřeba empirickým semivariogramem proložit křivku, která musí splňovat určité vlastnosti a je nutné ji nastavit pomocí několika málo parametrů [7].

Teoretický semivariogram je analyticky vyjádřená křivka, která popisuje míru odlišnosti hodnot srážek mezi body vzdálenými o lag. Model teoretického semivariogramu má parametry, kterými lze teoretický semivariogram popsat. Jsou to: zbytkový rozptyl (nugget effect), prahová hodnota semivariogramu (psill), dosah semivariogramu (range) a hladkost průběhu (shape), pro lepší představu viz obrázek 2.11.

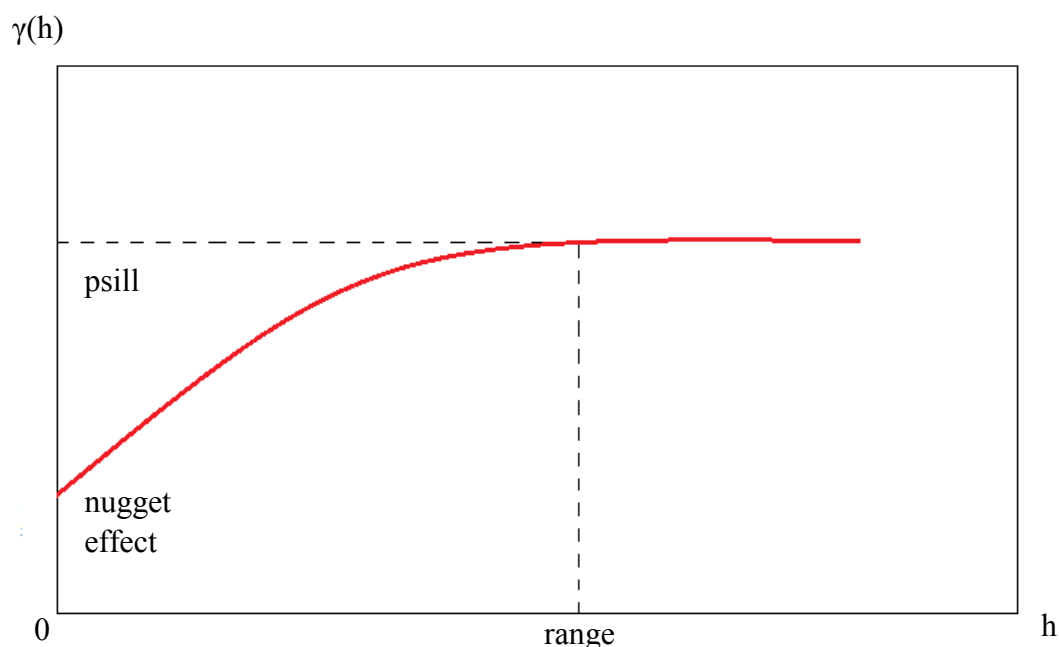
Parametr zbytkového rozptylu neboli nugget efekt vyjadřuje mikrovariabilitu prostorové veličiny, která je složená z chyb měření a rozptylu na menší vzdálenosti, než je použitá vzorkovací vzdálenost. Jinými slovy variabilitu, která je na velmi krátkých vzdálenostech [16]. Nugget efekt lze připsat chybám měření nebo prostorovým zdrojům odchylek ve vzdálenostech menších, než je interval vzorkování

nebo obojí. K chybám měření dochází z různých důvodů, ať už jsou to chyby měřících zařízení nebo přírodní jevy, které se mohou prostorově měnit v různých měřítcích [11].

Prahová hodnota semivariogramu neboli psill (sill), je maximální hodnota semivariogramu, která nastane, pokud lag = range.

Dosah semivariogramu neboli range udává prahovou hodnotu na vodorovné ose. Jedná se o hodnotu, od které už zvětšování vzdálenosti nemá vliv na nepodobnost, která do jisté vzdálenosti se vzdáleností narůstá.

Abychom docílili lepšího výsledku, je třeba vyhladit křivku. Tvar semivariogramu pro lag  $\in (0, \text{range})$  je kontrolován parametrem shape.



obr. 2.11 Základní parametry teoretického semivariogramu

Empirický semivariogram je definován vzorcem:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{var} [Z(x) - Z(x + h)], \tag{2.3}$$

kde  $\gamma(h)$  je odhadovaná semivariance pro  $h$ . Teoretický semivariogram musí splňovat tyto podmínky [7]:

- semivariogram je sudá funkce

$$\gamma(-h) = \gamma(h) \tag{2.4}$$

- semivariogram nabývá pouze nezáporných hodnot

$$\gamma(h) \geq 0 \tag{2.5}$$

- semivariogram je v počátku roven nule nebo nugget efektu

$$\gamma(0) = 0 \tag{2.6}$$

- pokud je semivariogram omezený, potřebujeme podmínku, aby rozptyl semivariogramu byl nezáporný

$$-\sum \sum \lambda_i \lambda_j \gamma(x_i - x_j) \geq 0 \tag{2.7}$$

Semivariogram popisuje informaci propojenou s prostorovou kovariancí, což je závislost mezi dvěma spojitými veličinami v prostoru. Kovarianci lze definovat pomocí vzorce:

$$C = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \tag{2.8}$$

Mezi semivariogramem a kovariancí platí jednoduchý vztah:

$$\gamma(h) = C(0) - C(h) \tag{2.9}$$

a naopak

$$C(h) = \gamma(\infty) - \gamma(h) \tag{2.10}$$

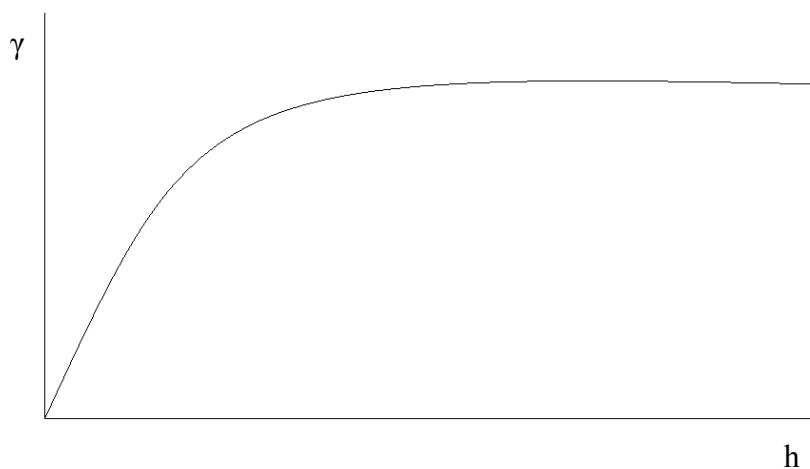
kde  $\gamma(\infty)$  je práh semivariogramu.

## Modely teoretického semivariogramu

Existuje několik typů teoretických modelů semivariogramů, které je možné vzájemně kombinovat. K těm základním, které se nejvíce používají, patří například Sférický model semivariogramu, Exponenciální model semivariogramu, Gaussovský model semivariogramu, Sinový model semivariogramu, Lineární model semivariogramu a Nugget efekt.

Nejčastěji používaným modelem semivariogramu je Sférický model semivariogramu (Spherical), který je vykreslen na obrázku 2.12. Má téměř lineární průběh do určité vzdálenosti, kde se stabilizuje. Je definován vzorcem:

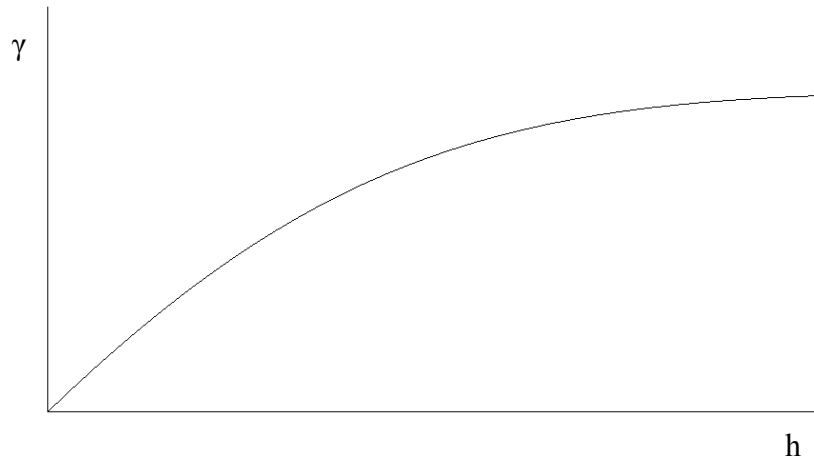
$$\gamma(h) = \begin{cases} c \left( \frac{3h}{2a} - \frac{1h^3}{2a^3} \right) & h < a \\ c & h \geq a \end{cases} \quad (2.11)$$



obr. 2.12 Sférický model semivariogramu

Alternativní možností k Sférickému modelu semivariogramu je Exponenciální model semivariogramu (Exponential) viz obrázek 2.13. V blízkosti počátku má model lineární průběh, prahu dosahuje až v nekonečnu, tudíž se za dosah považuje 95 % prahu. Což je přibližně  $3h/a$  vzdálenosti. Je definován vzorcem:

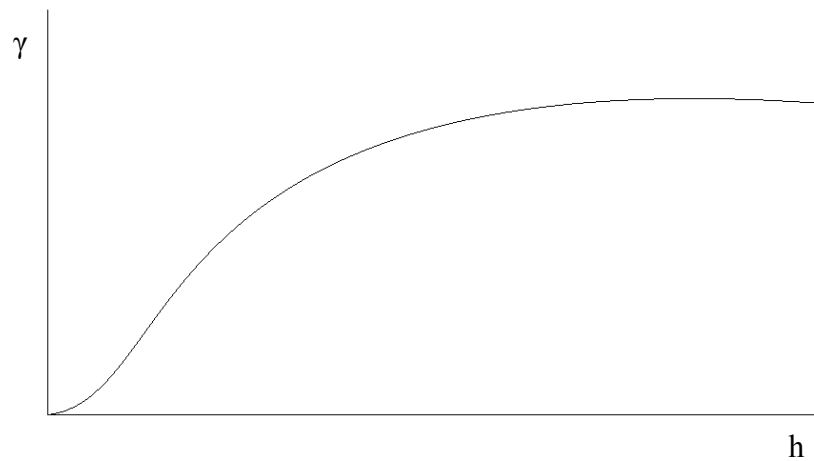
$$\gamma(h) = c \left( 1 - e^{-\frac{h}{a}} \right) \quad (2.12)$$



*obr. 2.13 Exponenciální model semivariogramu*

Gaussovský model semivariogramu vyjadřuje velmi korelovanou veličinu s hladkým průběhem [7]. Často je kombinován s nugget efektem, jelikož u něj často dochází k numerickým nestabilitám. Na následujícím obrázku 2.14 je vykreslena křivka Gaussovského modelu semivariogramu. Je definován vzorcem:

$$\gamma(h) = c \left( 1 - e^{-\frac{h^2}{a^2}} \right) \quad (2.13)$$

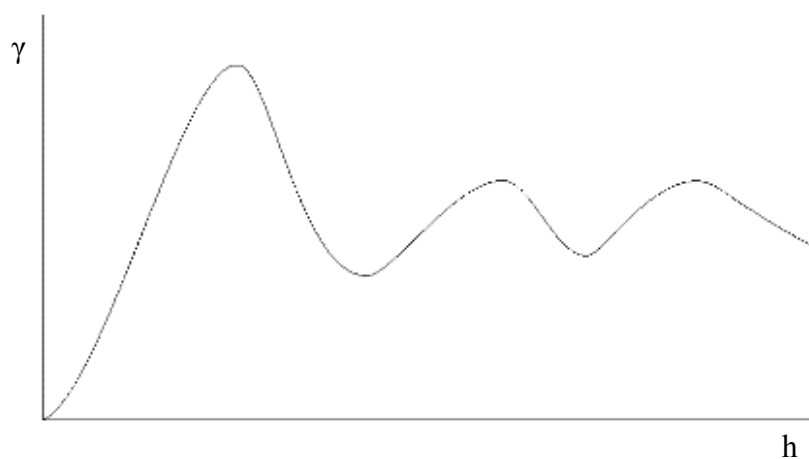


*obr. 2.14 Gaussovský model semivariogramu*

Sinový model semivariogramu neboli Kardinální sinusový model semivariogramu (Cardinal sine), který je vykreslen na obrázku 2.15, se využívá především pro modelování periodicity prostorové veličiny.

$$\gamma(h) = c \left( 1 - \frac{\sin(h/a)}{h/a} \right)$$

(2.14)



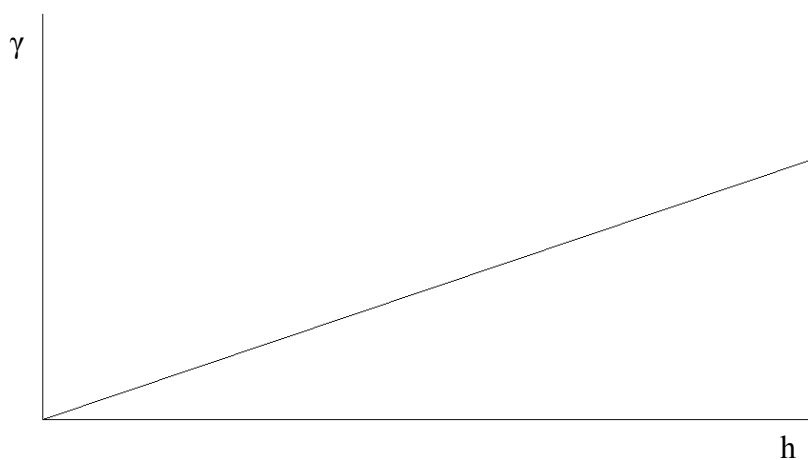
*obr. 2.15 Kardinální sinusový model semivariogramu*

Lineární model semivariogramu (linear) se dělí na neomezený a omezený. U neomezeného lineárního modelu semivariogramu rozptyl roste nad všechny meze a kovariance neexistuje. Nesplňuje podmínky teoretického semivariogramu. Je definován vzorcem:

$$\gamma(h) = h \tag{2.15}$$

Omezený lineární model semivariogramu (viz obr. 2.16) z počátku roste jako přímka, po dosažení prahu zůstane vodorovně nad vodorovnou osou. Splňuje podmínky teoretického semivariogramu. Je definován vzorcem:

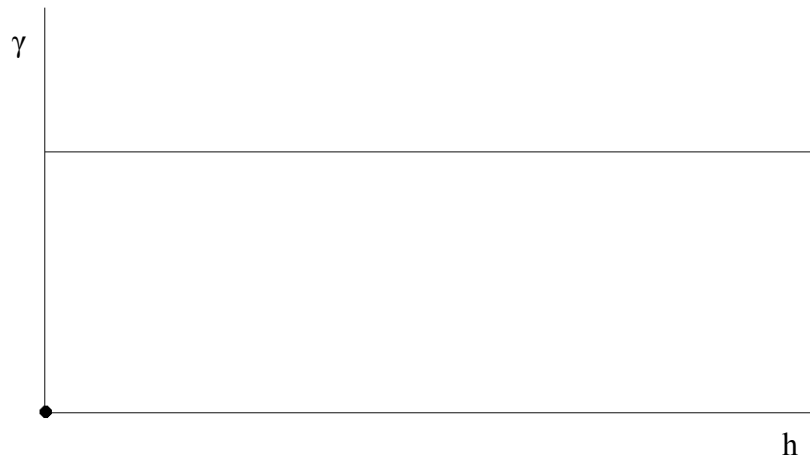
$$\gamma(h) = \begin{cases} C \frac{h}{a} & h < a \\ C & h \geq a \end{cases} \tag{2.16}$$



obr. 2.16 Lineární model semivariogramu

Na následujícím obrázku 2.17 je vyobrazen nugget efekt (nugget effect) někdy také nazývána jako náhodný šum. Je definován vzorcem:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ C & h > 0 \end{cases} \tag{2.17}$$



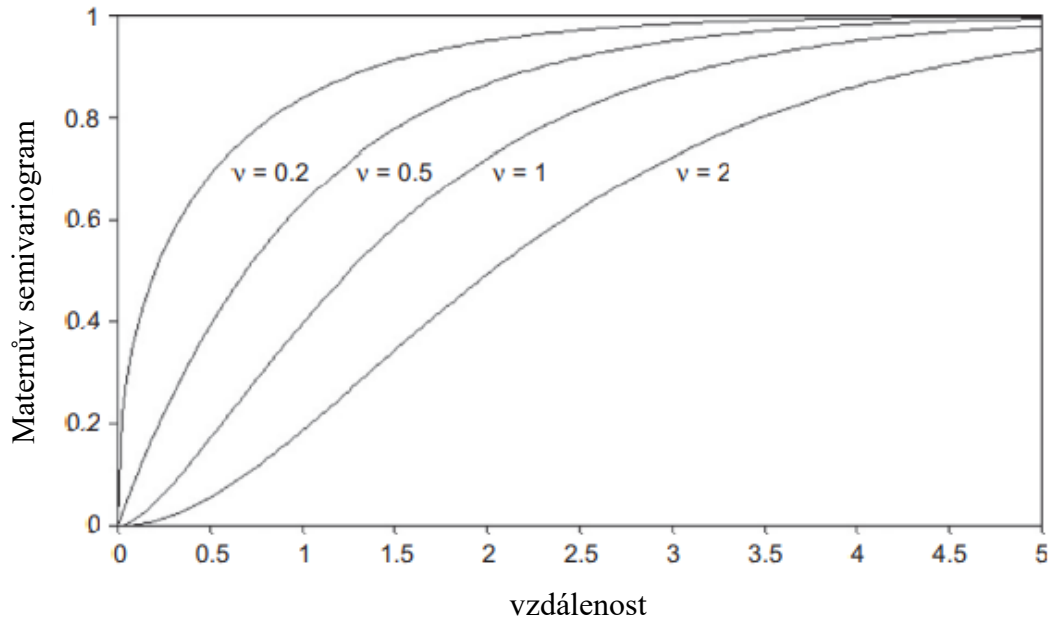
*obr. 2.17 Nugget efekt*

Dále se dají modely semivariogramů v určité míře kombinovat. Prostorová veličina je složená ze vzájemně nezávislých složek. Variabilita těchto složek se projevuje na různých prostorových škálách. Jednou z kombinací je takzvaný Maternův model semivariogramu (Matern semivariogram model). Maternův model semivariogramu je takový model, kde je hladkost náhodného pole řízena hladkostí profilu (shape). Tento model je také známý jako K-Besselův model (K-Bessel model) a Whittle-Maternův model (Whittle–Matern model) [15]. Maternův model semivariogramu je kombinací Gaussova modelu semivariogramu a Besselova modelu semivariogramu. Je definován vzorcem:

$$\gamma(h) = \sigma^2 \left\{ 1 - \frac{2^{1-v}}{\Gamma(v)} \left( \frac{|h|}{\alpha} \right)^v K_v \left( \frac{|h|}{\alpha} \right) \right\} \quad (2.18)$$

kde  $\sigma^2 > 0$  je rozptyl,  $\alpha > 0$  je parametr dosahu semivariogramu (range),  $\Gamma(\cdot)$  je funkce gama  $K_v(\cdot)$  je upravená Besselova funkce druhého řádu a  $v$  je hladkost profilu (shape) [15]. Na následujícím obrázku 2.18 jsou uvedeny příklady Maternových semivariogramů pro různé hodnoty parametru hladkosti profilu.





obr. 2.18 Příklady Maternových semivariogramů pro různé hodnoty parametru hladkosti profilu. Ve všech případech je rozptyl roven jedné. [převzato z: Pardo-Iguzquiza, Eulogio, and Mario Chica-Olmo. "Geostatistics with the Matern semivariogram model: A library of computer programs for inference, kriging and simulation." *Computers & Geosciences* 34.9 (2008): 1073-1079.]

Pro odhad modelu teoretického semivariogramu je výhodné použít metodu nejmenších čtverců, kterou je proložená hodnota empirického semivariogramu. Výsledkem proložení jsou odhady hodnot parametrů. Proto při fitování křivky semivariogramu byla použita metoda nejmenších čtverců, tak aby součet čtverců od bodů ke křivce semivariogramu byl co nejmenší pro odhadnuté parametry. Použití metody nejmenších čtverců je přívětivější než ruční grafické přizpůsobování metodou pokus omyl, což může být časově náročné a je jistě matoucí pro nováčky [26].

### 3. Výsledky

Pro vyhodnocování dat a fitování parametrů semivariogramu byl použit programovací jazyk R a program RStudio. K naitování vhodných parametrů byla použita metoda nejmenších čtverců. Pro tvorbu teoretického relativního semivariogramu byl použit Maternův model semivariogramu. Odhady parametrů byly posouzeny z hlediska statistické významnosti, k tomuto účelu byl použit t-test.  $P(t\text{-test})$  je pravděpodobnost t-testu, který je použit pro stanovení statistické významnosti odhadu parametrů. Statisticky významné parametry jsou ty, u kterých je  $P(t\text{-test}) \leq 0,05$ . V případě, že je pravděpodobnost  $P(t\text{-test}) = 0$ , tak je nejvýznamnější (\*\*\*) , když je  $P(t\text{-test}) = 0,001$  pak (\*\*), když je  $P(t\text{-test}) = 0,01$  pak (\*), když je  $P(t\text{-test}) = 0,05$  pak (•).  $P(t\text{-test})$  vyjadřuje pravděpodobnost, která je propojená se zamítnutím hypotézy  $h_0$ .

#### 3.1 Měsíční data

V níže uvedených tabulkách je uvedena odhadovaná hodnota parametru, chyba odhadu, předpoklad a statistická významnost pro každý z parametrů nugget, psill, range a shape, pro každý měsíc počínaje lednem, konče prosincem pro období od 1.1.1961 až do 31.12.2019.

V tabulce 3.1 jsou odhadované hodnoty parametrů, hodnoty parametru, chyba odhadu a statistická významnost pro měsíc leden, kde statistická významnost nugget parametru je nejvyšší možná statistická významnost (\*\*\*) , které lze dosáhnout. Ostatní parametry psill, range a shape nejsou statisticky významné. Stejně je tomu tak v tabulce 3.2, kde jsou uvedeny odhadované hodnoty parametrů, chyba odhadu a statistická významnost pro měsíc únor. Zároveň jsou u obou měsíců velké chyby odchylek u parametrů range a shape.

|               | <b>Odhadovaná hodnota parametru</b> | <b>Chyba odhadu</b> | <b>P(t-test)</b> | <b>Statistická významnost</b> |
|---------------|-------------------------------------|---------------------|------------------|-------------------------------|
| <b>nugget</b> | 0,44866                             | 0,01603             | 2,32e-14         | ***                           |
| <b>psill</b>  | 0,45523                             | 0,54967             | 0,421            |                               |
| <b>range</b>  | 450,00000                           | 672,44586           | 0,514            |                               |
| <b>shape</b>  | 5,00000                             | 45,39560            | 0,914            |                               |

*tab. 3.1 Odhadovaná hodnota parametru, chyba odhadu, předpoklad a statistická významnost pro leden 1.1.1961 - 31.12.2019*

|               | <b>Odhadovaná hodnota parametru</b> | <b>Chyba odhadu</b> | <b>P(t-test)</b> | <b>Statistická významnost</b> |
|---------------|-------------------------------------|---------------------|------------------|-------------------------------|
| <b>nugget</b> | 0,4575                              | 0,0182              | 1,12e-13         | ***                           |
| <b>psill</b>  | 0,4247                              | 0,6239              | 0,506            |                               |
| <b>range</b>  | 450,0000                            | 818,1354            | 0,590            |                               |
| <b>shape</b>  | 5,0000                              | 55,2308             | 0,929            |                               |

*tab. 3.2 Odhadovaná hodnota parametru, chyba odhadu, předpoklad a statistická významnost pro únor 1.1.1961 - 31.12.2019*

Obdobně jako tomu bylo u měsíce ledna a měsíce února je i v tabulce 3.3 a 3.4, kde jsou uvedeny odhadované hodnoty parametrů, hodnoty parametru, chyba odhadu a statistická významnost pro měsíce březen a duben. S tím rozdílem, že statistická významnost parametru psill má nejmenší možnou statistickou významnost (.) a chyby odhadu u parametru shape nejsou tak vysoké jako u předchozích měsíců.

|               | <b>Odhadovaná hodnota parametru</b> | <b>Chyba odhadu</b> | <b>P(t-test)</b> | <b>Statistická významnost</b> |
|---------------|-------------------------------------|---------------------|------------------|-------------------------------|
| <b>nugget</b> | 0,45762                             | 0,03492             | 1,29e-09         | ***                           |
| <b>psill</b>  | 0,42082                             | 0,23230             | 0,0901           | .                             |
| <b>range</b>  | 450,00000                           | 389,52537           | 0,2661           |                               |
| <b>shape</b>  | 0,87095                             | 1,01714             | 0,4053           |                               |

*tab. 3.3 Odhadovaná hodnota parametru, chyba odhadu, předpoklad a statistická významnost pro březen 1.1.1961 - 31.12.2019*

|               | <b>Odhadovaná hodnota parametru</b> | <b>Chyba odhadu</b> | <b>P(t-test)</b> | <b>Statistická významnost</b> |
|---------------|-------------------------------------|---------------------|------------------|-------------------------------|
| <b>nugget</b> | 0,48488                             | 0,04733             | 3,63e-08         | ***                           |
| <b>psill</b>  | 0,48472                             | 0,23466             | 0,0566           | .                             |
| <b>range</b>  | 450,00000                           | 369,15655           | 0,2417           |                               |
| <b>shape</b>  | 0,63524                             | 0,57689             | 0,2882           |                               |

*tab. 3.4 Odhadovaná hodnota parametru, chyba odhadu, předpoklad a statistická významnost pro duben 1.1.1961 - 31.12.2019*

V tabulkách 3.5 a 3.7, které udávají odhadované hodnoty parametrů, hodnoty parametru, chyba odhadu a statistická významnost pro měsíce květen a červenec je parametr nugget opět na nejvyšší možné hladině statistické významnosti (\*\*\*) a parametr psill se vyšplhal až na druhou nejnižší hladinu (\*).

|               | <b>Odhadovaná hodnota parametru</b> | <b>Chyba odhadu</b> | <b>P(t-test)</b> | <b>Statistická významnost</b> |
|---------------|-------------------------------------|---------------------|------------------|-------------------------------|
| <b>nugget</b> | 0,55371                             | 0,03517             | 9,78e-11         | ***                           |
| <b>psill</b>  | 0,52823                             | 0,23925             | 0,0432           | *                             |
| <b>range</b>  | 450,00000                           | 317,73013           | 0,1771           |                               |
| <b>shape</b>  | 0,89238                             | 0,86441             | 0,3183           |                               |

*tab. 3.5 Odhadovaná hodnota parametru, chyba odhadu, předpoklad a statistická významnost pro květen 1.1.1961 - 31.12.2019*

V tabulce 3.6, kde jsou odhadované hodnoty parametrů, hodnoty parametru, chyba odhadu a statistická významnost pro měsíc červen. Pro měsíc červen se jako pro jediný nepodařilo ani u jednoho parametru, aby jeho statistická významnost byla nějak významná.

|               | <b>Odhadovaná hodnota parametru</b> | <b>Chyba odhadu</b> | <b>P(t-test)</b> | <b>Statistická významnost</b> |
|---------------|-------------------------------------|---------------------|------------------|-------------------------------|
| <b>nugget</b> | 0,3491                              | 0,2333              | 0,155            |                               |
| <b>psill</b>  | 0,6658                              | 0,3846              | 0,104            |                               |
| <b>range</b>  | 450,0000                            | 486,4337            | 0,370            |                               |
| <b>shape</b>  | 0,1653                              | 0,1394              | 0,254            |                               |

*tab. 3.6 Odhadovaná hodnota parametru, chyba odhadu, předpoklad a statistická významnost pro červen 1.1.1961 - 31.12.2019*

|               | <b>Odhadovaná hodnota parametru</b> | <b>Chyba odhadu</b> | <b>P(t-test)</b> | <b>Statistická významnost</b> |
|---------------|-------------------------------------|---------------------|------------------|-------------------------------|
| <b>nugget</b> | 0,4888                              | 0,1045              | 0,000297         | ***                           |
| <b>psill</b>  | 0,5504                              | 0,2570              | 0,049033         | *                             |
| <b>range</b>  | 450,0000                            | 404,8937            | 0,283892         |                               |
| <b>shape</b>  | 0,2958                              | 0,2197              | 0,198148         |                               |

*tab. 3.7 Odhadovaná hodnota parametru, chyba odhadu, předpoklad a statistická významnost pro červenec 1.1.1961 - 31.12.2019*

Pro následující tabulky 3.8, 3.9, 3.10, 3.11 a 3.12 v kterých jsou odhadované hodnoty parametrů, hodnoty parametru, chyba odhadu a statistická významnost pro měsíce srpen, září, říjen, listopad a prosinec platí, že pro parametr nugget je statistická významnost nejvyšší možná (\*\*\*). U parametrů range a shape je velká chyba odhadu, největší je potom u měsíce listopadu (tab. 3.11) a to konkrétně 1,133e+03.

|        | <b>Odhadovaná hodnota parametru</b> | <b>Chyba odhadu</b> | <b>P(t-test)</b> | <b>Statistická významnost</b> |
|--------|-------------------------------------|---------------------|------------------|-------------------------------|
| nugget | 0,59704                             | 0,02443             | 1,7e-13          | ***                           |
| psill  | 0,53774                             | 0,83764             | 0,531            |                               |
| range  | 450,00000                           | 867,50545           | 0,612            |                               |
| shape  | 5,00000                             | 58,56372            | 0,933            |                               |

*tab. 3.8 Odhadovaná hodnota parametru, chyba odhadu, předpoklad a statistická významnost pro srpen 1.1.1961 - 31.12.2019*

|        | <b>Odhadovaná hodnota parametru</b> | <b>Chyba odhadu</b> | <b>P(t-test)</b> | <b>Statistická významnost</b> |
|--------|-------------------------------------|---------------------|------------------|-------------------------------|
| nugget | 0,4318                              | 0,0280              | 1,31e-10         | ***                           |
| psill  | 0,5885                              | 0,9598              | 0,549            |                               |
| range  | 450,0000                            | 908,2167            | 0,627            |                               |
| shape  | 5,0000                              | 61,3121             | 0,936            |                               |

*tab. 3.9 Odhadovaná hodnota parametru, chyba odhadu, předpoklad a statistická významnost pro září 1.1.1961 - 31.12.2019*

|        | <b>Odhadovaná hodnota parametru</b> | <b>Chyba odhadu</b> | <b>P(t-test)</b> | <b>Statistická významnost</b> |
|--------|-------------------------------------|---------------------|------------------|-------------------------------|
| nugget | 0,37035                             | 0,01723             | 1,11e-12         | ***                           |
| psill  | 0,48468                             | 0,59059             | 0,425            |                               |
| range  | 450,00000                           | 678,61375           | 0,517            |                               |
| shape  | 5,00000                             | 45,81199            | 0,915            |                               |

*tab. 3.10 Odhadovaná hodnota parametru, chyba odhadu, předpoklad a statistická významnost pro říjen 1.1.1961 - 31.12.2019*

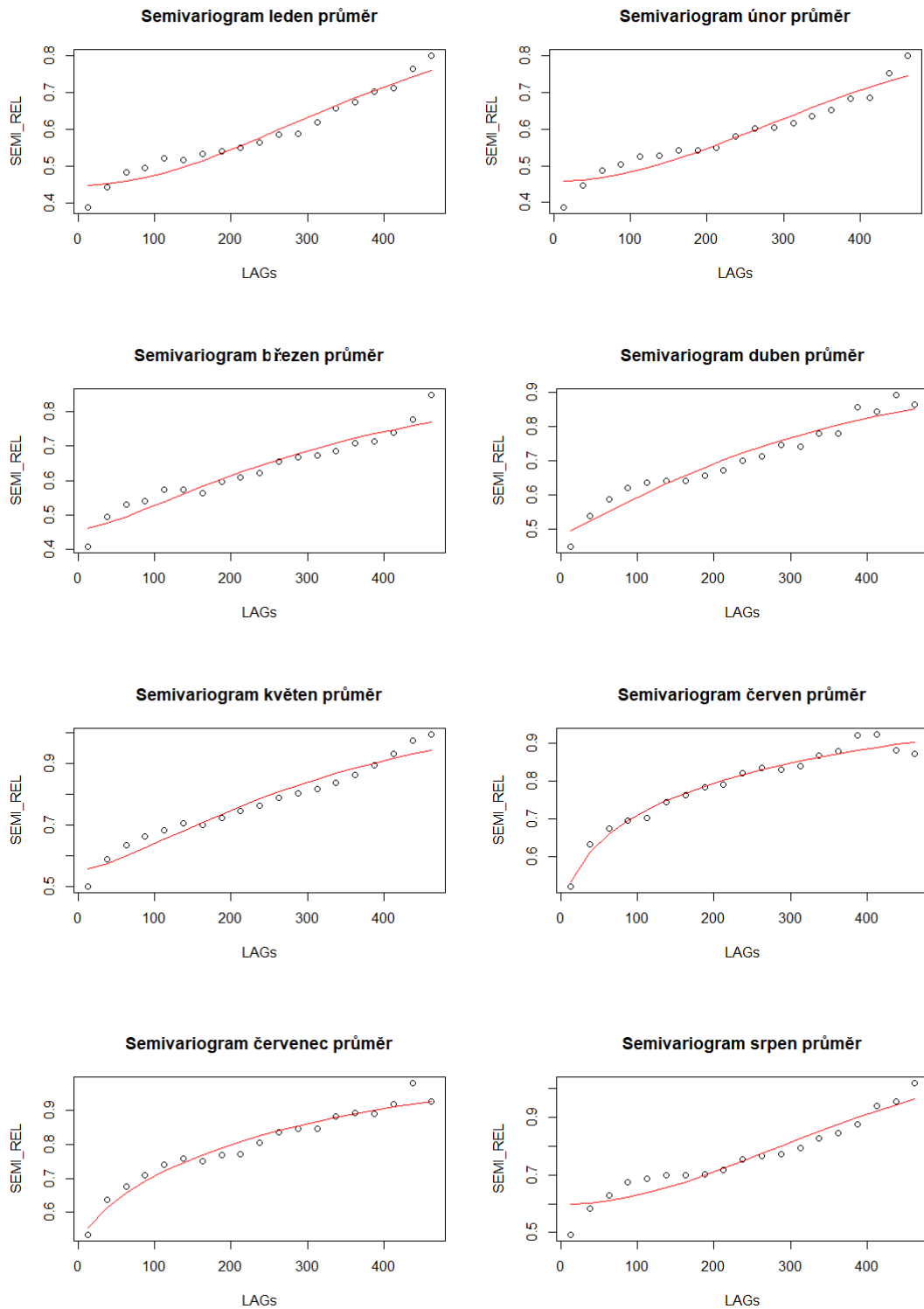
|               | <b>Odhadovaná hodnota parametru</b> | <b>Chyba odhadu</b> | <b>P(t-test)</b> | <b>Statistická významnost</b> |
|---------------|-------------------------------------|---------------------|------------------|-------------------------------|
| <b>nugget</b> | 3,941e-01                           | 3,048e-02           | 1,55e-09         | ***                           |
| <b>psill</b>  | 5,137e-01                           | 1,045e+00           | 0,630            |                               |
| <b>range</b>  | 4,500e+02                           | 1,133e+03           | 0,697            |                               |
| <b>shape</b>  | 5,000e+00                           | 7,647e+01           | 0,949            |                               |

*tab. 3.11 Odhadovaná hodnota parametru, chyba odhadu, předpoklad a statistická významnost pro listopad 1.1.1961 - 31.12.2019*

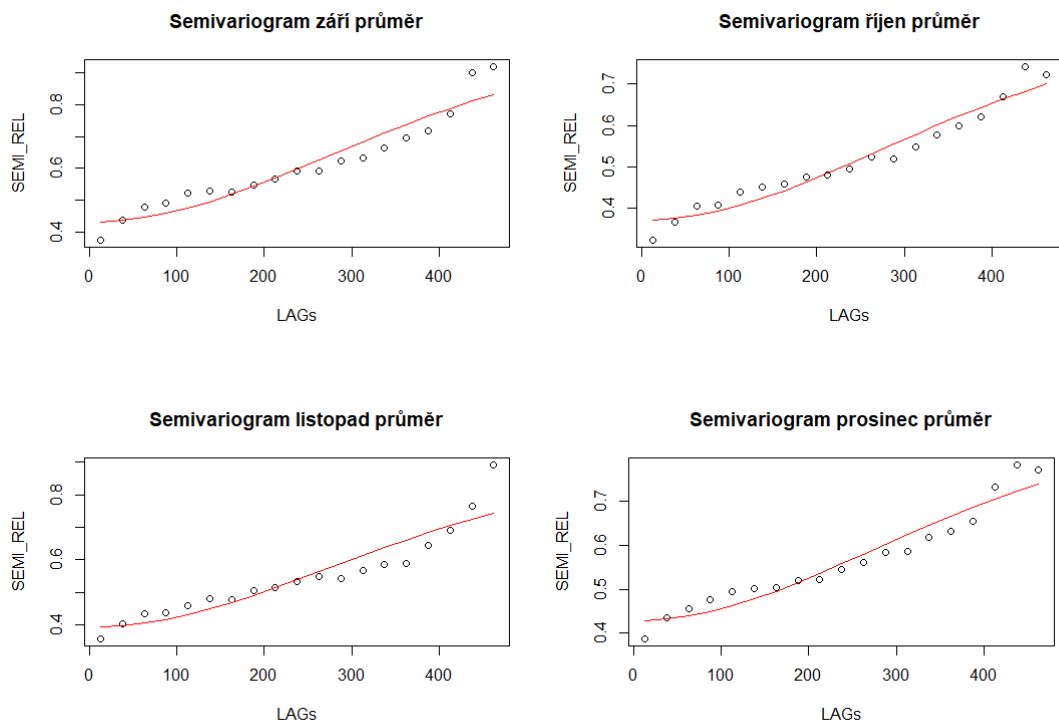
|               | <b>Odhadovaná hodnota parametru</b> | <b>Chyba odhadu</b> | <b>P(t-test)</b> | <b>Statistická významnost</b> |
|---------------|-------------------------------------|---------------------|------------------|-------------------------------|
| <b>nugget</b> | 0,42848                             | 0,01808             | 2,67e-13         | ***                           |
| <b>psill</b>  | 0,45614                             | 0,61983             | 0,473            |                               |
| <b>range</b>  | 450,00000                           | 756,76957           | 0,561            |                               |
| <b>shape</b>  | 5,00000                             | 51,08813            | 0,923            |                               |

*tab. 3.12 Odhadovaná hodnota parametru, chyba odhadu, předpoklad a statistická významnost pro prosinec 1.1.1961 - 31.12.2019*

Na následujícím obrázku 3.1 jsou vykresleny grafy jednotlivých semivariogramů pro měsíční časovou řadu. Nejlépe nafitovaným semivariogramem je křivka pro měsíc červen, která nejlépe odpovídá bodům semivariogramu.

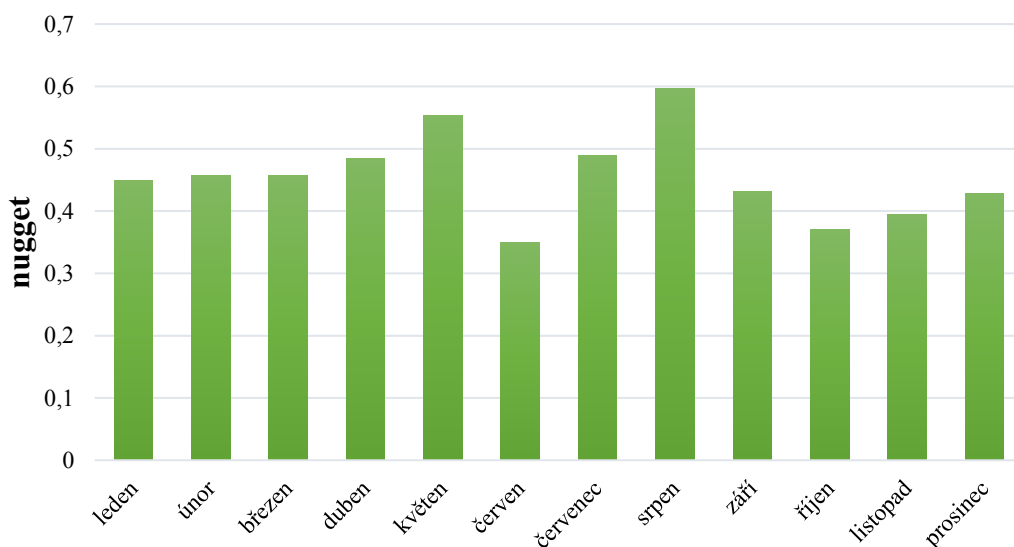






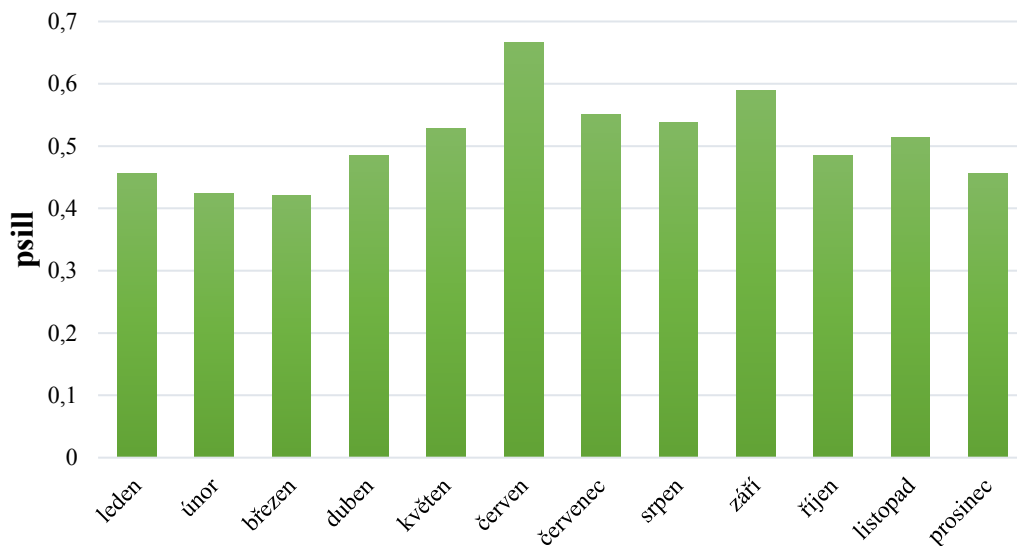
obr. 3.1 Semivariogramy jednotlivých měsíců pro období od 1.11961 do 31.12.2019

Nugget efekt má hodnotu statistické významnosti až na červen nejvyšší (\*\*\*)  
V červnu má zároveň nejnižší odhadovanou hodnotu parametru, a to 0,3491. Nejvyšší hodnoty naopak dosáhl v měsíci srpnu, 0,59704, viz obrázek 3.2, kde je graf parametru nugget v jednotlivých měsících.



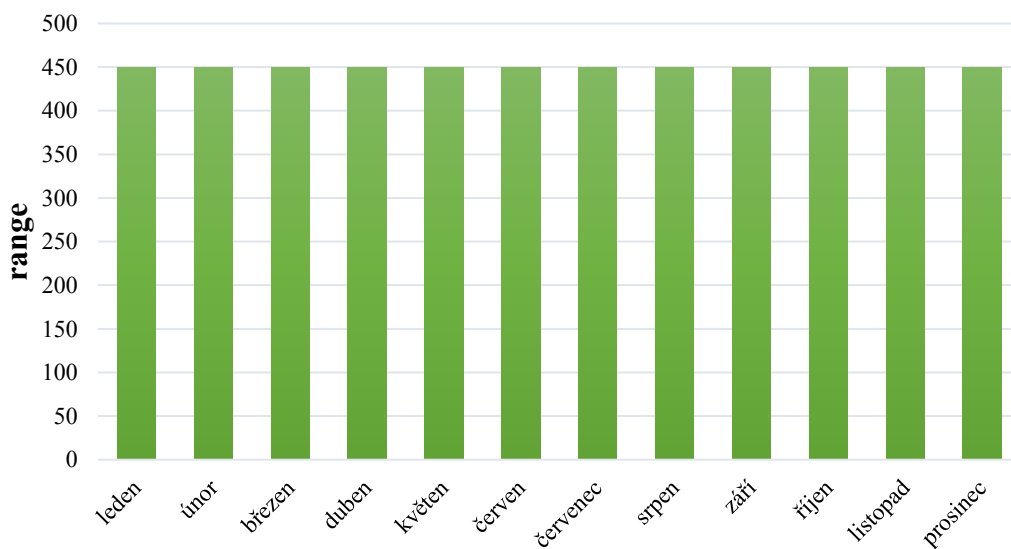
obr. 3.2 Graf odhadované hodnoty nugget parametru v jednotlivých měsících pro období od 1.1.1961 do 31.12.2019

Parametr psill, který je pro každý měsíc vykreslený na obrázku 3.3 má nejnižší odhadovanou hodnotu parametru v měsíci březnu, a to 0,4. Naopak největší hodnoty dosahuje v měsíci červnu, kde má 0,7.



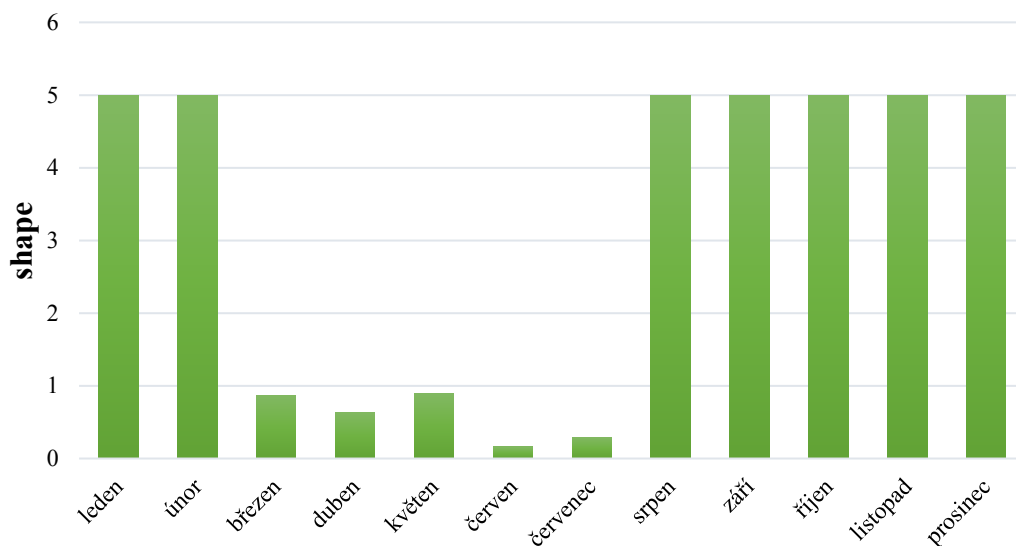
obr. 3.3 Graf odhadované hodnoty psill parametru v jednotlivých měsících pro období od 1.1.1961 do 31.12.2019

Co se týče parametru range, kterému je věnován obrázek 3.4, je jeho odhadovaná hodnota konstantní pro každý měsíc, a to 450.



obr. 3.4 Graf odhadované hodnoty range parametru v jednotlivých měsících pro období od 1.1.1961 do 31.12.2019

Obrázek 3.5 je věnovaný odhadované hodnotě shape parametru pro jednotlivé měsíce. Pro víc jak polovinu měsíců je hodnota parametru shape rovna 5, pro zbývající se pohybuje v úrovni pod hodnotou 1.



obr. 3.5 Graf odhadované hodnoty shape parametru v jednotlivých měsících pro období od 1.1.1961 do 31.12.2019

### 3.2 Sezónní data

V této kapitole jsou tabulky pro sezóny; zima, jaro, léto a podzim. V tabulkách je uvedena odhadovaná hodnota parametru, chyba odhadu, předpoklad a statistická významnost pro každý z parametrů, nugget, psill, range a shape.

V tabulkách 3.13, 3.15, 3.16 jsou odhadované hodnoty parametrů, hodnoty parametru, chyba odhadu a statistická významnost pro zimní, jarní a pozimní období parametrů nugget, psill, range a shape parametrů. Pro všechny platí, že parametr nugget dosahuje nejvyšší možné statistické významnosti (\*\*\*) . U parametrů range a shape lze zpozorovat velké hodnoty chyb odhadu.

|               | <b>Odhadovaná hodnota parametru</b> | <b>Chyba odhadu</b> | <b>P(t-test)</b> | <b>Statistická významnost</b> |
|---------------|-------------------------------------|---------------------|------------------|-------------------------------|
| <b>nugget</b> | 0,46463                             | 0,01735             | 4,43e-14         | ***                           |
| <b>psill</b>  | 0,41493                             | 0,59471             | 0,496            |                               |
| <b>range</b>  | 450,00000                           | 798,21975           | 0,581            |                               |
| <b>shape</b>  | 5,00000                             | 53,88635            | 0,927            |                               |

*tab. 3.13 Odhadovaná hodnota parametru, chyba odhadu, předpoklad a statistická významnost pro zimní období 1.1.1961 - 31.12.2019*

U parametrů pro jarní období, kterým je věnována tabulka 3.14, kde jsou uvedeny odhadované hodnoty parametrů, hodnoty parametru, chyba odhadu a statistická významnost pro jednotlivé parametry je možné říct, že stejně jako u ostatních období je statistická významnost odhadu hodnot nugget parametru nejvyšší možná (\*\*\*) . Parametr psill nabývá druhé nejnížší možné statistické významnosti (\*). Chyba odhadu parametru range a shape nešplhají do takových výšek jako je tomu u ostatních období.

|               | <b>Odhadovaná hodnota parametru</b> | <b>Chyba odhadu</b> | <b>P(t-test)</b> | <b>Statistická významnost</b> |
|---------------|-------------------------------------|---------------------|------------------|-------------------------------|
| <b>nugget</b> | 0,51424                             | 0,04601             | 1,13e-08         | ***                           |
| <b>psill</b>  | 0,49262                             | 0,19147             | 0,0212           | *                             |
| <b>range</b>  | 450,00000                           | 309,41537           | 0,1665           |                               |
| <b>shape</b>  | 0,52780                             | 0,36477             | 0,1685           |                               |

*tab. 3.14 Odhadovaná hodnota parametru, chyba odhadu, předpoklad a statistická významnost pro jarní období 1.1.1961 - 31.12.2019*

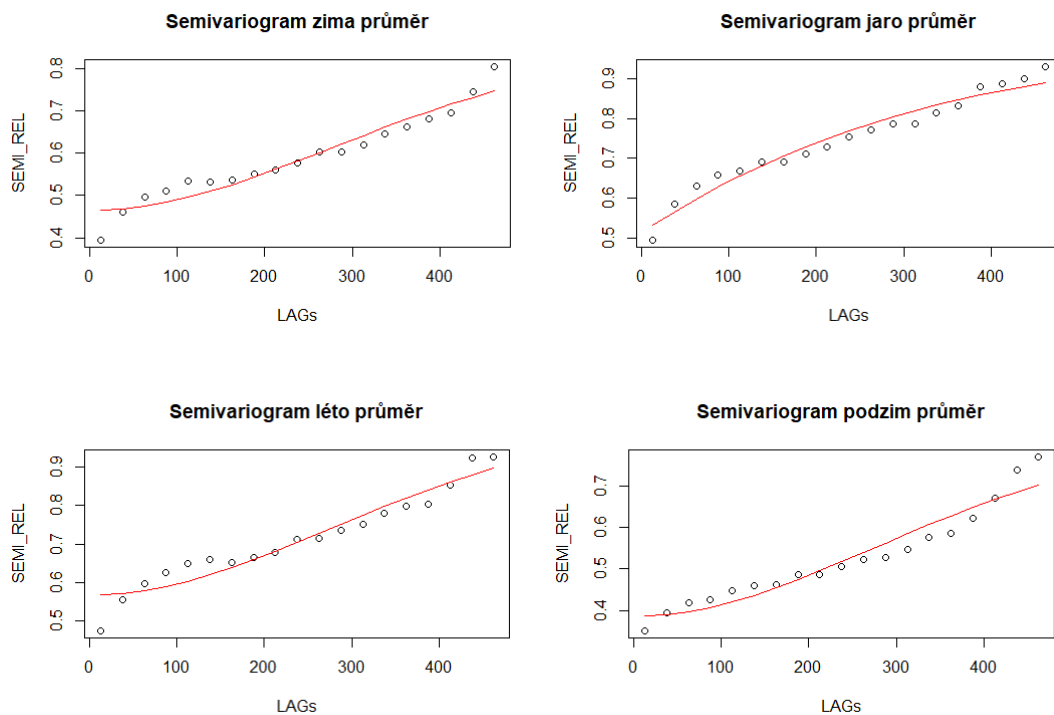
|               | <b>Odhadovaná hodnota parametru</b> | <b>Chyba odhadu</b> | <b>P(t-test)</b> | <b>Statistická významnost</b> |
|---------------|-------------------------------------|---------------------|------------------|-------------------------------|
| <b>nugget</b> | 0,56601                             | 0,02113             | 4,43e-14         | ***                           |
| <b>psill</b>  | 0,48776                             | 0,72453             | 0,511            |                               |
| <b>range</b>  | 450,00000                           | 827,24529           | 0,594            |                               |
| <b>shape</b>  | 5,00000                             | 55,84583            | 0,930            |                               |

*tab. 3.15 Odhadovaná hodnota parametru, chyba odhadu, předpoklad a statistická významnost pro letní období 1.1.1961 - 31.12.2019*

|               | <b>Odhadovaná hodnota parametru</b> | <b>Chyba odhadu</b> | <b>P(t-test)</b> | <b>Statistická významnost</b> |
|---------------|-------------------------------------|---------------------|------------------|-------------------------------|
| <b>nugget</b> | 0,38588                             | 0,01962             | 4,02e-12         | ***                           |
| <b>psill</b>  | 0,46471                             | 0,67256             | 0,500            |                               |
| <b>range</b>  | 450,00000                           | 805,99810           | 0,585            |                               |
| <b>shape</b>  | 5,00000                             | 54,41147            | 0,928            |                               |

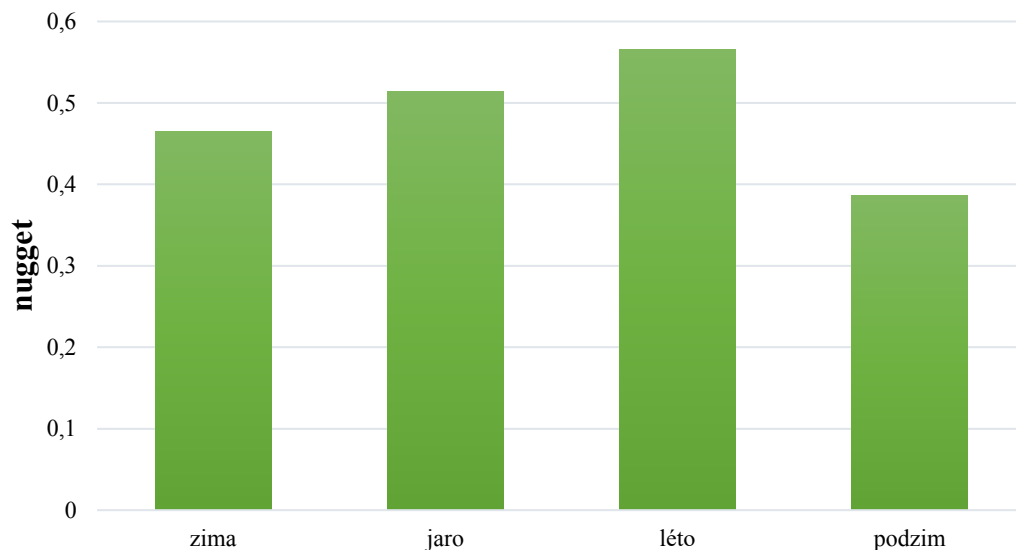
*tab. 3.16 Odhadovaná hodnota parametru, chyba odhadu, předpoklad a statistická významnost pro podzimní období 1.1.1961 - 31.12.2019*

Na následujícím obrázku 3.16 jsou vykresleny grafy jednotlivých semivariogramů pro zimní, jarní, letní a podzimní sezóny. Nejvíce odpovídající křivkou k bodům semivariogramu je zde křivka pro jarní období.



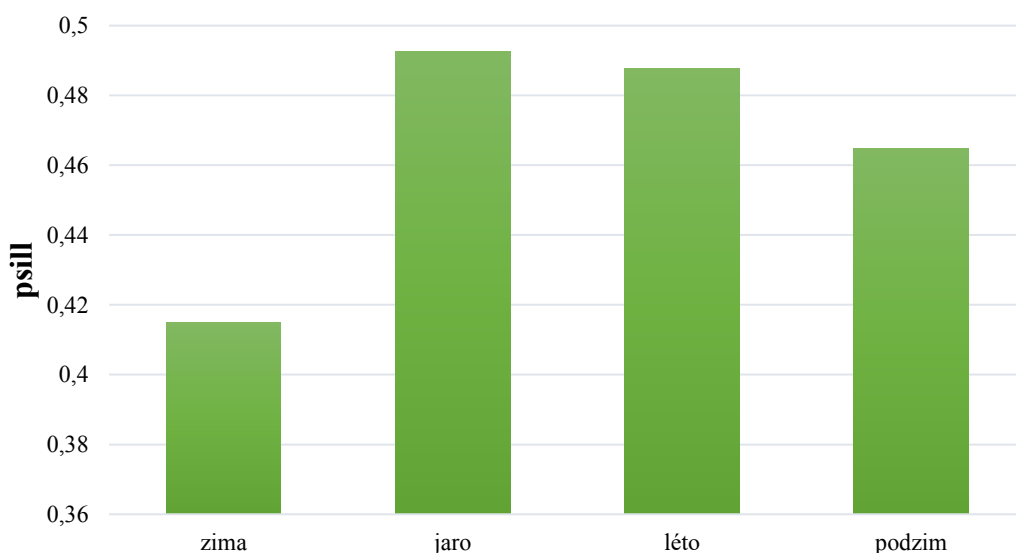
obr. 3.6 Semivariogramy jednotlivých sezón pro období od 1.1.1961 do 31.12.2019

Na obrázku 3.7 je vykreslen graf odhadované hodnoty nugget parametru pro jednotlivé sezóny. Stejně jako tomu bylo pro jednotlivé měsíce má i u sezónních dat nugget efekt nejvyšší možnou statistickou významnost. Nejnižší odhadovaná hodnota nugget parametru je na podzim, 0,4. Naopak nejvyšší odhadovaná hodnota nugget parametru je v létě, 0,6.



obr. 3.7 Graf odhadované hodnoty nugget parametru v jednotlivých sezónách pro období od 1.1.1961 do 31.12.2019

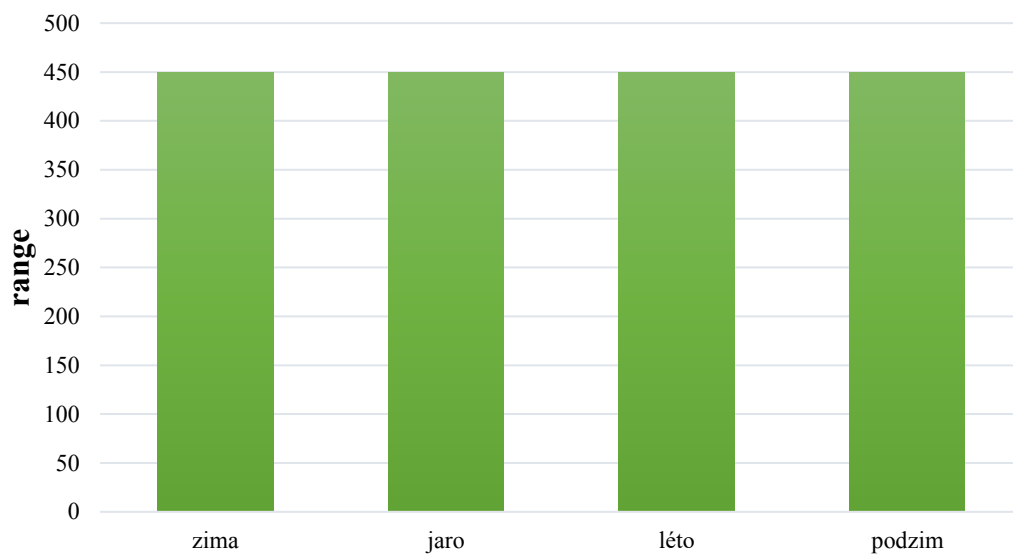
Průběh odhadovaný hodnot parametru psill pro jednotlivé sezóny je vykreslen na obrázku 3.8. Nejnižší odhadované hodnoty parametru dosahuje v zimní sezóně, 0,4. Naopak nejvyšší hodnoty dosahuje v jarní sezóně, a to konkrétně 0,5.



obr. 3.8 Graf odhadované hodnoty psill parametru v jednotlivých sezónách pro období od 1.1.1961 do 31.12.2019

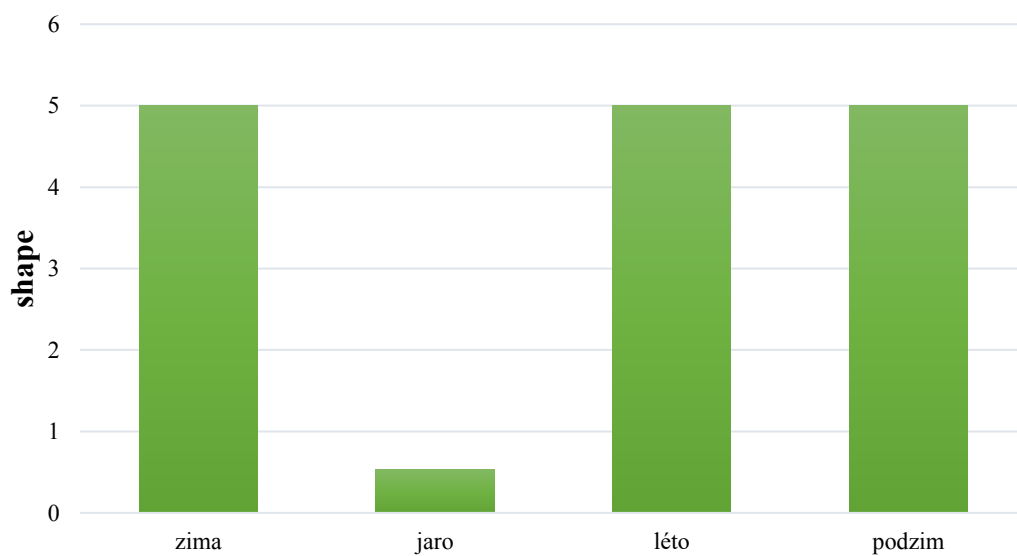


Na obrázku 3.9 je graf odhadované hodnoty range parametru, kde jako u měsíčních hodnot je hodnota ustálena na 450.



*obr. 3.9 Graf odhadované hodnoty range parametru v jednotlivých sezónách pro období od 1.1.1961 do 31.12.2019*

Odhadovaná hodnota parametru shape je vynesena do grafu na obrázku 3.10. Pro zimní, letní a podzimní období je jeho hodnota 5. Jediná jarní sezóna má pak hodnotu 0,5.



*obr. 3.10 Graf odhadované hodnoty shape parametru v jednotlivých sezónách pro období od 1.1.1961 do 31.12.2019*

### 3.3 Data pro 10letá období

V této kapitole byla časová řada rozdělena na jednotlivá desetiletí pro období 1.1.1961 až 31.12.2019. Tabulky níže uvedené obsahují vždy odhadovanou hodnotu parametru, chybu odhadu, předpoklad a statistickou významnost pro parametry nugget, psill, range a shape.

V tabulkách 3.17, 3.18 a 3.21 jsou uvedeny odhadované hodnoty parametrů, hodnoty parametru, chyba odhadu a statistická významnost parametrů nugget, psill, range a shape pro desetiletí 1.1.1961 - 31.12.1970, 1.1.1971 - 31.12.1980 a 1.1.2001 - 31.12.2010. Pro všechna desetiletí platí, že statistická významnost nugget parametru má druhou nejnižší možnou statistickou významnost (\*), stejně tak je tomu u významnosti parametru psill.

|               | <b>Odhadovaná hodnota parametru</b> | <b>Chyba odhadu</b> | <b>P(t-test)</b> | <b>Statistická významnost</b> |
|---------------|-------------------------------------|---------------------|------------------|-------------------------------|
| <b>nugget</b> | 0,3028                              | 0,1250              | 0,0285           | *                             |
| <b>psill</b>  | 0,5483                              | 0,2201              | 0,0250           | *                             |
| <b>range</b>  | 450,0000                            | 344,7137            | 0,2114           |                               |
| <b>shape</b>  | 0,1841                              | 0,1092              | 0,1126           |                               |

*tab. 3.17 Odhadovaná hodnota parametru, chyba odhadu, předpoklad a statistická významnost pro desetiletí 1.1.1961 - 31.12.1970*

|               | <b>Odhadovaná hodnota parametru</b> | <b>Chyba odhadu</b> | <b>P(t-test)</b> | <b>Statistická významnost</b> |
|---------------|-------------------------------------|---------------------|------------------|-------------------------------|
| <b>nugget</b> | 0,2979                              | 0,1178              | 0,0231           | *                             |
| <b>psill</b>  | 0,5765                              | 0,2231              | 0,0208           | *                             |
| <b>range</b>  | 450,0000                            | 337,0523            | 0,2018           |                               |
| <b>shape</b>  | 0,2048                              | 0,1185              | 0,1044           |                               |

*tab. 3.18 Odhadovaná hodnota parametru, chyba odhadu, předpoklad a statistická významnost pro desetiletí 1.1.1971 - 31.12.1980*

Pro desetiletí 1.1.1981 – 31.12.1990, jehož odhadované hodnoty parametrů, hodnoty parametru, chyba odhadu a statistická významnost parametrů nugget, psill, range a shape jsou uvedeny v tabulce 3.19, je statistická významnost parametru psill druhá nejnižší (\*).

|               | <b>Odhadovaná hodnota parametru</b> | <b>Chyba odhadu</b> | <b>P(t-test)</b> | <b>Statistická významnost</b> |
|---------------|-------------------------------------|---------------------|------------------|-------------------------------|
| <b>nugget</b> | 0,20464                             | 0,17577             | 0,2625           |                               |
| <b>psill</b>  | 0,65725                             | 0,28373             | 0,0351           | *                             |
| <b>range</b>  | 450,00000                           | 364,45024           | 0,2359           |                               |
| <b>shape</b>  | 0,15629                             | 0,09702             | 0,1280           |                               |

*tab. 3.19 Odhadovaná hodnota parametru, chyba odhadu, předpoklad a statistická významnost pro desetiletí 1.1.1981 - 31.12.1990*

V tabulce 3.20 naleznete odhadované hodnoty parametrů, hodnoty parametru, chyby odhadu a statistickou významnost parametrů nugget, psill, range a shape pro desetiletí 1.1.1991 - 31.12.2000. Od desetiletí 1.1.1961 - 31.12.1970, 1.1.1971 - 31.12.1980 a 1.1.2001 - 31.12.2010 se liší tím, že má nejnižší možnou hladinu statistické významnosti (.) pro parametr shape.

|               | <b>Odhadovaná hodnota parametru</b> | <b>Chyba odhadu</b> | <b>P(t-test)</b> | <b>Statistická významnost</b> |
|---------------|-------------------------------------|---------------------|------------------|-------------------------------|
| <b>nugget</b> | 0,2663                              | 0,1078              | 0,0260           | *                             |
| <b>psill</b>  | 0,6032                              | 0,2054              | 0,0102           | *                             |
| <b>range</b>  | 450,0000                            | 296,6763            | 0,1501           |                               |
| <b>shape</b>  | 0,2065                              | 0,1052              | 0,0685           | .                             |

*tab. 3.20 Odhadovaná hodnota parametru, chyba odhadu, předpoklad a statistická významnost pro desetiletí 1.1.1991 - 31.12.2000*

|               | <b>Odhadovaná hodnota parametru</b> | <b>Chyba odhadu</b> | <b>P(t-test)</b> | <b>Statistická významnost</b> |
|---------------|-------------------------------------|---------------------|------------------|-------------------------------|
| <b>nugget</b> | 0,2946                              | 0,1104              | 0,0176           | *                             |
| <b>psill</b>  | 0,6008                              | 0,2532              | 0,0315           | *                             |
| <b>range</b>  | 450,0000                            | 367,5959            | 0,2398           |                               |
| <b>shape</b>  | 0,2693                              | 0,1774              | 0,1498           |                               |

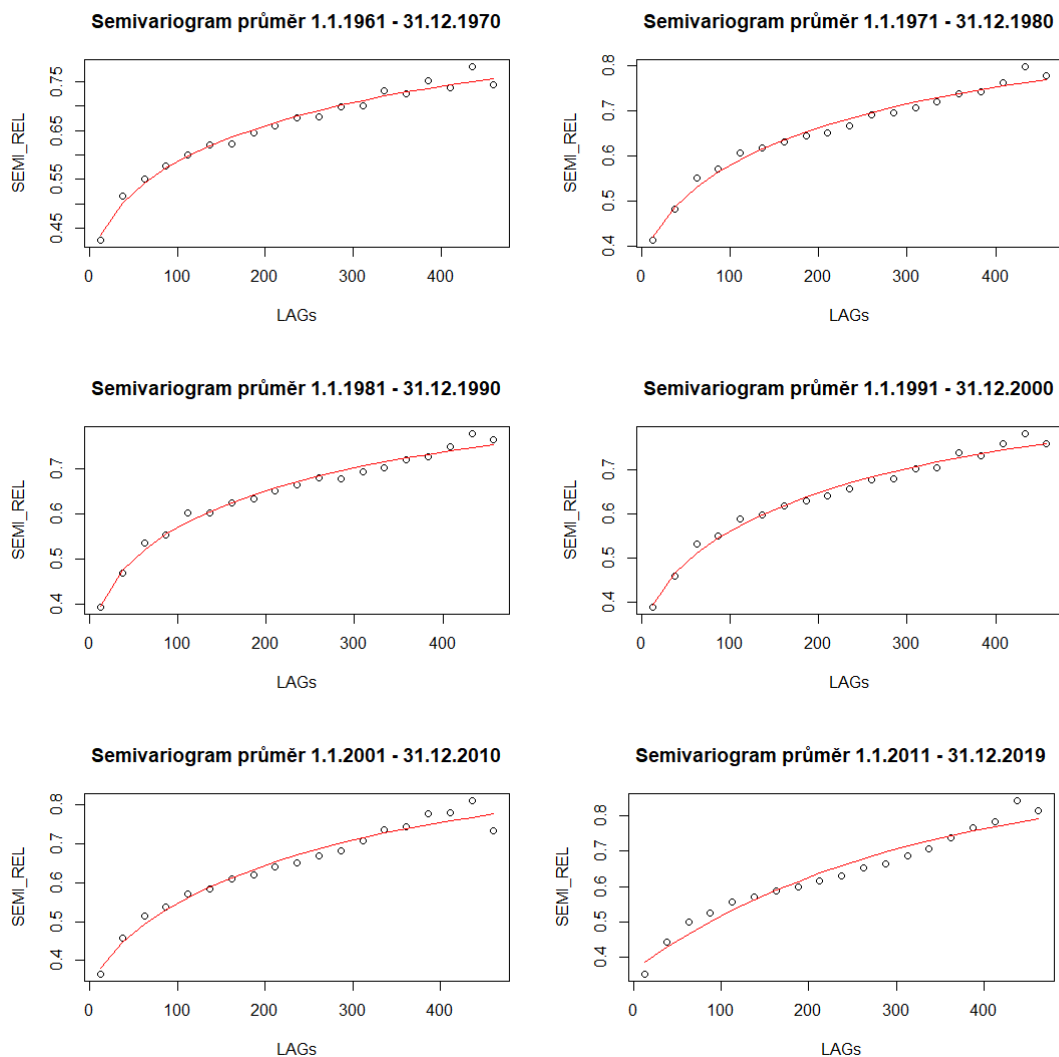
*tab. 3.21 Odhadovaná hodnota parametru, chyba odhadu, předpoklad a statistická významnost pro desetiletí 1.1.2001 - 31.12.2010*

V tabulce 3.22 jsou uvedeny odhadované hodnoty parametrů, hodnoty parametru, chyby odhadu a statistické významnosti parametrů nugget, psill, range a shape pro desetiletí 1.1.2011 – 31.12.2019. Statistická významnost parametru nugget je nejvyšší možná (\*\*\*). U parametru psill je statistická významnost druhá nejnižší (\*).

|               | <b>Odhadovaná hodnota parametru</b> | <b>Chyba odhadu</b> | <b>P(t-test)</b> | <b>Statistická významnost</b> |
|---------------|-------------------------------------|---------------------|------------------|-------------------------------|
| <b>nugget</b> | 0,36293                             | 0,05717             | 1,31e-05         | ***                           |
| <b>psill</b>  | 0,55792                             | 0,21989             | 0,0228           | *                             |
| <b>range</b>  | 450,00000                           | 319,37179           | 0,1792           |                               |
| <b>shape</b>  | 0,48560                             | 0,33343             | 0,1659           |                               |

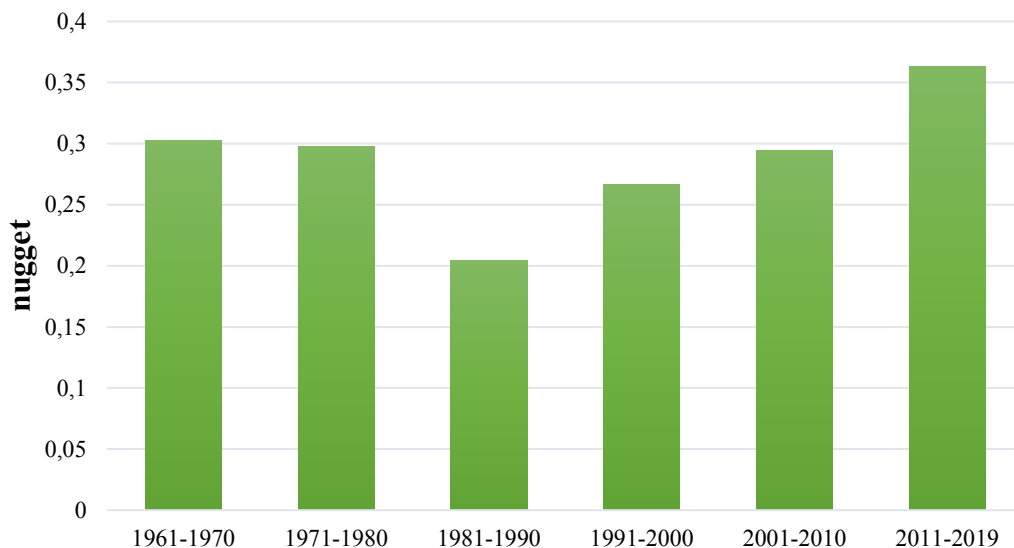
*tab. 3.22 Odhadovaná hodnota parametru, chyba odhadu, předpoklad a statistická významnost pro desetiletí 1.1.2011 - 31.12.2019*

Na následujícím obrázku jsou grafy jednotlivých semivariogramů pro jednotlivá desetiletí od 1.1.1961 do 31.12.2019.



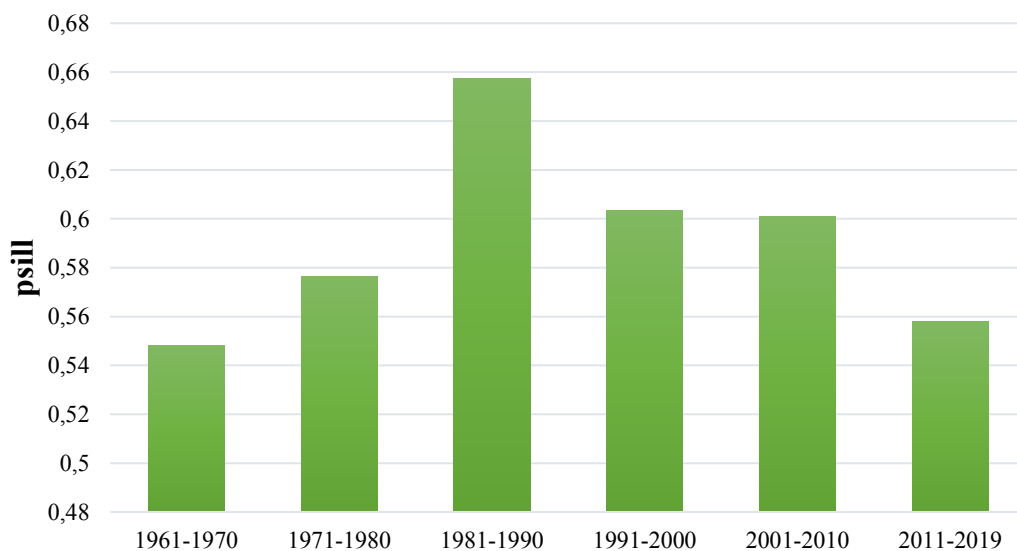
obr. 3.11 Semivariogramy jednotlivých desetiletí pro období od 1.11961 do 31.12.2019

Při rozdělení časové řady na jednotlivá desetiletí má nugget efekt ze všech parametrů největší statistická významnost. Nejnižší odhadovaná hodnota nugget parametru je v letech 1981 až 1990, a to 0,2. V letech 2011 až 2019 dosahuje nejvyšší hodnoty, 0,4. Což je uvedeno na obrázku 3.12, kde je vykreslený graf odhadované hodnoty nugget parametru pro každé desetiletí.



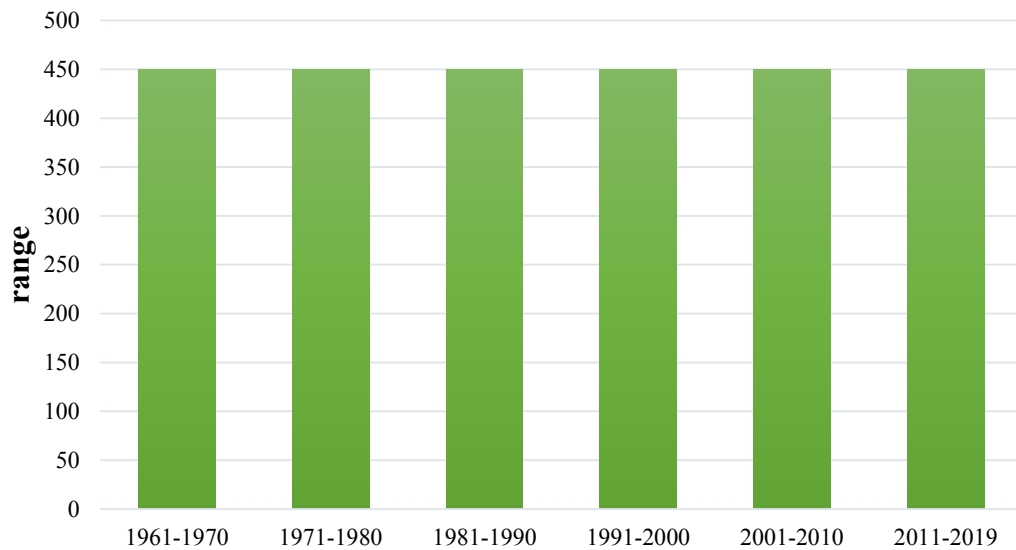
obr. 3.12 Graf odhadované hodnoty nugget parametru v jednotlivých desetiletí pro období od 1.1.1961 do 31.12.2019

Na obrázku 3.13 je graf odhadované hodnoty parametru psill pro jednotlivá desetiletí od 1.1.1961 do 31.12.2019. Nejnížší odhadovanou hodnotu parametru má desetiletí od roku 1961 do roku 1970, a to 0,5. Nejvyšší odhadovanou hodnotu parametru má desetiletí od roku 1981 do roku 1990, 0,7.



obr. 3.13 Graf odhadované hodnoty psill parametru v jednotlivých desetiletí pro období od 1.1.1961 do 31.12.2019

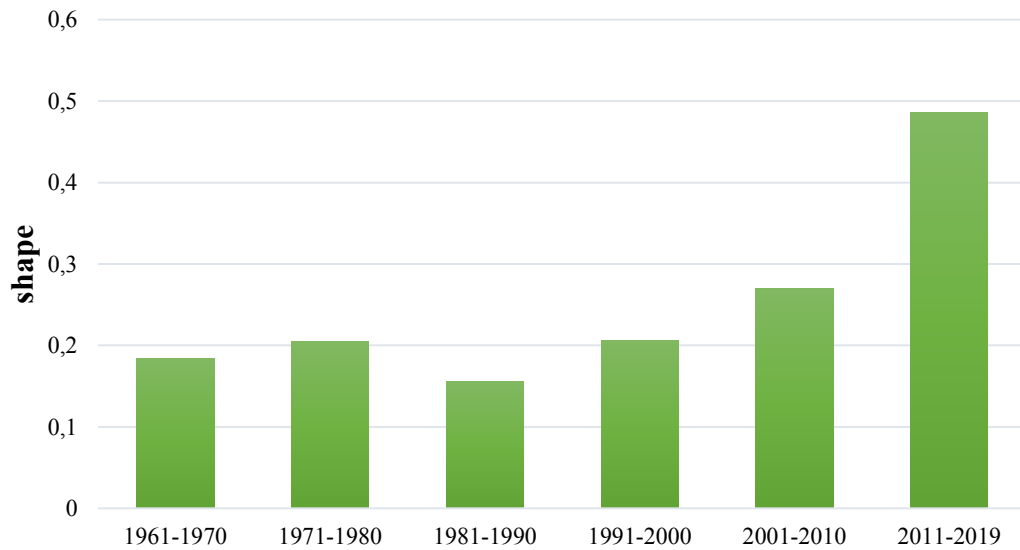
Stejně jako u předešlých časových řad je i u desetiletí konstantní odhadovaná hodnota parametru range, a to 450, jak si můžete všimnout z obrázku 3.14 na které jsou odhadované hodnoty range parametru vykresleny do grafu pro jednotlivá desetiletí.



*obr. 3.14 Graf odhadované hodnoty range parametru v jednotlivých desetiletí pro období od 1.1.1961 do 31.12.2019*



Na posledním obrázku 3.15 v této kapitole je vyhodnocen graf pro odhadované hodnoty parametru shape, pro každé desetiletí od roku 1961 do roku 2019. Nejnížší odhadovanou hodnotu parametru 0,2 zde má desetiletí 1.1.1981 – 31.12.1990. Nejvyšší odhadovanou hodnotu parametru má desetiletí 1.1.2011 – 31.12.2019, a to konkrétně 0,5.



*obr. 3.15 Graf odhadované hodnoty shape parametru v jednotlivých desetiletí pro období od 1.1.1961 do 31.12.2019*

## 4. Diskuse

Po stanovení měsíčních relativních teoretických semivariogramů (viz obr. 3.1) si lze všimnout, že křivky semivariogramu pro měsíc červen a měsíc červenec nejvíce odpovídají vykresleným bodům semivariogramu, v tabulce s parametry semivariogramu pro měsíc červen (viz tab. 3.6) předpoklady parametrů nemají žádnou významnost oproti měsíci červenci (viz tab. 3.7), kdy je statistická významnost nugget parametru nejvyšší (\*\*\*) a statistická významnost psill parametru je skoro nejnižší (\*). V měsíci srpnu byla odhadovaná hodnota parametru nejvyšší a to konkrétně 0,6. V těchto obdobích se srážková pole chovají jako náhodný proces s velkou hodnotou zbytkového rozptylu.

U semivariogramů stanovených pro sezónní časové řady (viz obr. 3.6), křivka, která nejvíce odpovídá bodům semivariogramu je křivka pro jarní období. Parametry pro jarní sezóny mají, co se týče celkového pohledu největší významnost předpokladu, a taky mají značně nejmenší chyby odhadu ze všech sezón. U zimního období je parametru nugget (viz tab. 3.13) největší možný (\*\*\*), je tomu tak jako u ostatních sezón, jako jediná má jarní sezóna význam psill parametru, a to druhou nejmenší možnou (\*). V letním období bylo naměřeno nejvíce srážek, a i odhadovaná hodnota nugget parametru je nejvyšší, stejně tak chyba odhadu (viz tab. 3.15).

U semivariogramů stanovených pro desetileté časové řady (viz obr. 3.11), je možné upozorovat, že nejlépe nafitované křivky semivariogramu odpovídající bodům semivariogramu jsou hned čtyři ze šesti semivariogramů, a to pro období 1961-1970, 1971-1980, 1981-1990 a pro období 1991-2000. Významnost nugget parametru (viz tab. 3.17, 3.18 a 3.20) se u těchto období neliší (\*) až na období 1981-1990 (viz tab. 3.19). Významnost psill parametru zůstává konstantní (\*) u všech desetiletí. Pro období 1991-2000 má význam parametru shape nejnižší významnost (.). Pro období 2011-2019 je významnost nugget parametru nejvyšší možná (\*\*\*), odhadovaná hodnota parametru je největší pro všechna desetiletí, a to, 0,36293.

Práce potvrdila, že odhad semivariogramu je netriviální úlohou, a že semivariogram je proměnlivý v čase.

## 5. Závěr

V této práci byly stanoveny relativní teoretické semivariogramy ze srážkoměrných dat z 1 300 stanic Českého hydrometeorologického ústavu v celé České republice. Data byla rozdělena do časových řad, a to na měsíční časové řady, sezónní časové řady a na desetileté časové řady. Pro každé z těchto rozdělení byl stanoven teoretický semivariogram, pro který bylo potřeba odvodit parametry nugget, psill, range a shape.

Pro přípravu dat pro stanovení semivariogramu byl použit programovací jazyk R. Stejně tak byl použit pro stanovení empirických semivariogramů a odvození parametrů teoretických semivariogramů.

Bakalářská práce potvrdila, že semivariogram je proměnlivý v čase. Hodnoty nugget efektu byly stanoveny pro celou Českou republiku, jeho hodnoty se vyskytují v intervalu (0,2, 0,6). Pro celou Českou republiku byly také stanoveny hodnoty parametru psill, které se vyskytují v intervalu (0,4, 0,7), a hodnoty parametru shape, které se vyskytují v intervalu (0,2, 5,0). Parametr range nebyl citlivý na fitování. Z hodnot parametrů nejvíce nabýval proměnlivých hodnot parametr shape. Výsledky práce poukázaly na nutnost testů dalších teoretických modelů semivariogramu.

## 6. Použitá literatura

- [1] METEOROLOGICKÁ TERMINOLOGIE. *Portál ČHMÚ* [online]. [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/predpovedi/predpovedi-pocasi/ceska-republika/meteorologicka-terminologie>
- [2] Michálek, Jaroslav. (2000). Dvě poznámky o metodě kriging. 189-197.
- [3] Peralvo, Manuel. (2004). Influence of DEM interpolation methods in Drainage Analysis.
- [4] ČHMÚ; Židek, Dušan; Lipina, Pavel. (2014). NÁVOD PRO POZOROVATELE SRÁŽKOMĚRNÝCH STANIC S AUTOMATICKÝM SRÁŽKOMĚREM. 4-1
- [5] Sobíšek B. za kolektiv. (1993). Meteorologický slovník a výkladový terminologický.
- [6] Spatial Analysis (Interpolation). *Documentation for QGIS 2.18* [online]. [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: [https://docs.qgis.org/2.18/en/docs/gentle\\_gis\\_introduction/spatial\\_analysis\\_interpolation.html](https://docs.qgis.org/2.18/en/docs/gentle_gis_introduction/spatial_analysis_interpolation.html)
- [7] Ježek, Josef. *Geostatistika a prostorová interpolace*. Charles University in Prague, Karolinum Press, 2016.
- [8] Hobza, Ladislav, and Václav Skala. "Rekonstrukce obrazu RBF interpolací s využitím GPU." (2011).
- [9] Koutková, Helena, and Pavel Špaček. "Kriging odhady úrovně hladiny podzemní vody."
- [10] Tuček, Mgr Pavel, and Robert Zůvala. "BAKALÁŘSKÁ PRÁCE Analýza sesuvu svahu pomocí metody kriging."
- [11] Understanding a semivariogram: The range, sill, and nugget. *ArcGIS Pro* [online]. [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/geostatistical-analyst/understanding-a-semivariogram-the-range-sill-and-nugget.htm>
- [12] Křikavová, Linda. "Interpolace bodových dat v GIS." Bakalářská práce, České vysoké učení technické v Praze (2009).

- [13] Lele, Subhash. "Estimating functions for semivariogram estimation." Lecture Notes-Monograph Series (1997): 381-396.
- [14] Lianheng, Zhao, Zhang Shuaihao, Huang Dongliang, Zuo Shi, and Li Dejian. "Quantitative characterization of joint roughness based on semivariogram parameters." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 109 (2018): 1-8.
- [15] Pardo-Iguzquiza, Eulogio, and Mario Chica-Olmo. "Geostatistics with the Matern semivariogram model: A library of computer programs for inference, kriging and simulation." *Computers & Geosciences* 34.9 (2008): 1073-1079.
- [16] Kovalová, Kristýna. "BAKALÁŘSKÁ PRÁCE Geostatistika pro kompoziční data."
- [17] Biswas, Asim, and Bing Cheng Si. "Model averaging for semivariogram model parameters." *Advances in Agrophysical Research* 4 (2013): 81-96.
- [18] Hanel, Martin, and Petr Máca. "Spatial variability and interdependence of rain event characteristics in the Czech Republic." *Hydrological Processes* 28.6 (2014): 2929-2944.
- [19] Olea, Ricardo A. "A six-step practical approach to semivariogram modeling." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 20.5 (2006): 307-318.
- [20] Kerry, Ruth, and Margaret A. Oliver. "Determining nugget: sill ratios of standardized variograms from aerial photographs to kriging sparse soil data." *Precision Agriculture* 9.1 (2008): 33-56.
- [21] Camana, F. A., and C. V. Deutsch. "The nugget effect." *Geostatistics Lessons*. Recuperado de <http://www.geostatisticslessons.com/lessons/nuggeteffect> (2019).
- [22] Goovaerts, Pierre. *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press on Demand, 1997.
- [23] Bohling, Geoff. "Introduction to geostatistics and variogram analysis." *Kansas geological survey* 1 (2005): 1-20.
- [24] Brooker, P. I. "A parametric study of robustness of kriging variance as a function of range and relative nugget effect for a spherical semivariogram." *Mathematical Geology* 18.5 (1986): 477-488.

- [25] Shapiro, Alexander, and Johan D. Botha. "Variogram fitting with a general class of conditionally nonnegative definite functions." *Computational Statistics & Data Analysis* 11.1 (1991): 87-96.
- [26] Jian, Xiaodong, Ricardo A. Olea, and Yun-Sheng Yu. "Semivariogram modeling by weighted least squares." *Computers & Geosciences* 22.4 (1996): 387-397.
- [27] Wang, Jun, Bojie Fu, Yang Qiu, Liding Chen, and Zhi Wang. "Geostatistical analysis of soil moisture variability on Da Nangou catchment of the loess plateau, China." *Environmental Geology* 41, no. 1 (2001): 113-120.
- [28] Van Groenigen, Jan Willem. "The influence of variogram parameters on optimal sampling schemes for mapping by kriging." *Geoderma* 97.3-4 (2000): 223-236.
- [29] Semi-Variogram: Nugget, Range and Sill. *GIS Geography* [online]. [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: <https://gisgeography.com/semi-variogram-nugget-range-sill/>
- [30] Gribov, Alexander, Konstantin Krivoruchko, and Jay M. Ver Hoef. "Modified weighted least squares semivariogram and covariance model fitting algorithm." *Stochastic Modeling & Geostatistics: Principles, Methods and Case Studies* 2 (2000).
- [31] Česká meteorologická společnost [online]: Elektronický meteorologický slovník (eMS) [cit 30.03.2022]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz>