

**Česká zemědělská univerzita v Praze**  
Fakulta lesnická a dřevařská  
Katedra hospodářské úpravy lesů

**Vliv vnějších faktorů na dynamiku růstu smrku ztepilého  
(*Picea abies* L. Karst) v rašelinných smrčinách**

Disertační práce

Autor: ing. et ing. Barbora Klempířová  
Školitel: doc. ing. Róbert Marušák, Ph.D

2014

Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma „Vliv vnějších faktorů na dynamiku růstu smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) v rašelinných smrčínách“ vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací a doporučení školitele. Souhlasím se zveřejněním disertační práce dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Božím Daru, dne 25.7.2014

.....

## **Poděkování**

Děkuji především doc. ing. Róbertu Marušákovi, PhD. za odborné vedení v průběhu zpracování práce a ing. Michalu Bošel'ovi, PhD. za podnětné připomínky k možnostem statistického zpracování získaných dat. Poděkování patří ing. Lukáši Dragounovi za pomoc při měření vzorků v laboratoři. Velký dík rovněž Tomáši Čáchovi za fyzické nasazení a trpělivost v terénu při vlastním sběru vzorků.

## **Vliv vnějších faktorů na dynamiku růstu smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) v rašelinných smrčínách**

Rašelinné smrčiny představují velmi cenné ekosystémy se značným významem pro ochranu přírody. Oblast Krušných hor, v západní části ČR, nabízí několik cenných komplexů rašelinišť obklopených podmáčenými smrčínami. Tato práce se zaměřuje na rekonstrukci vlivu vybraných vnějších faktorů na radiální přírůst smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) v rašelinných smrčínách. Dendrochronologický průzkum byl proveden v oblasti NPR Božídarské rašeliniště a NPR Rolavská vrchoviště. Byly vytvořeny letokruhové chronologie výzkumných ploch, standardizovány a statisticky vyhodnoceny výsledné letokruhové indexy. Konkrétní cíle byly: 1) vyhodnotit trendy průměrných měsíčních a ročních srážek, teplot a atmosférických koncentrací SO<sub>2</sub>; 2) analyzovat citlivost radiálních přírůstů na meziroční dynamiku počasí a vyhodnotit časové změny v trendu odezvy na klimatické proměnné; 3) analyzovat odezvu radiálních přírůstu na změny atmosférických koncentrací SO<sub>2</sub>; 4) ověřit hypotézu, zda odvodnění stanoviště ovlivňuje velikost tloušťkového přírůstu. Výsledky ukázaly, že tato stanoviště nejsou citlivá na meziroční změny počasí ani limitována srážkovými úhrny. Pozitivní vliv teplot na radiální přírůst zesiluje po roce 1980. Analýza vlivu změn trendu atmosférických koncentrací SO<sub>2</sub>, průměrných ročních teplot a ročních srážkových úhrnů za období 1980-2011 na radiální přírůst ukazuje kombinovaný pozitivní vliv snižování emisí SO<sub>2</sub> a nárůstu průměrných teplot. Na nárůst průměrných měsíčních teplot a změny koncentrací SO<sub>2</sub> byly mnohem citlivější odvodněné lokality. Odvodnění půdy neovlivnilo radiální přírůst staršího porostu.

**Klíčová slova:** dendrochronologie, dendroekologie, dendroklimatologie, letokruhové indexy, rašelinný les, smrk ztepilý, odvodnění, klimatická změna, znečištění SO<sub>2</sub>

## **Influence of external factors to growth dynamics of Norway spruce (*Picea abies* L. Karst) in peatland Norway spruce forests**

Peatland Norway spruce (*Picea abies* L.Karst) forests represent very valuable ecosystems with considerable importance for nature conservation. The area of the Ore Mountains (Krusné hory), in the western Czech Republic, offers several valuable peat complexes surrounded with wet mountain spruce forests. This study aims to reconstruct the impact of selected external factors to the radial growth of Norway spruce (*Picea abies* L.Karst) in peatland forests. Dendrochronological research was performed in the areas of the National Natural Reserve Božídarské rašeliniště peat bog and the National Natural Reserve Rolavská vrchoviště raised bogs. Mean-value functions of standardized tree-ring indices were created and statistically analyzed. The specific objectives were 1) evaluate trends of average monthly and annual precipitations, temperatures and atm. SO<sub>2</sub> concentrations; 2) analyze sensitivity of radial increment to inter-annual climate variability and evaluate time changes in response to climate variables; 3) analyze response of radial growth to changes of atm. SO<sub>2</sub> concentration; 4) verify hypothesis if drainage influence the growth of trees. Results show, that these stands are neither sensitive to inter-annual climate variation nor limited with precipitations amounts. A positive influence of temperatures to radial growth is getting stronger after 1980. The analysis of response to changes of atm. SO<sub>2</sub> concentration, average annual temperatures and annual amount of precipitations in the period 1980-2011 shows combined positive influence of decrease of SO<sub>2</sub> emissions and growth of temperatures. Drained stands were much more sensitive to the increase of monthly mean temperatures and to changes of atm. SO<sub>2</sub> concentration. Drainage has not influenced the radial growth of older stand.

**Keywords:** dendrochronology, dendroecology, dendroclimatology, tree-ring indices, peatland forest, Norway spruce, drainage, climate change, SO<sub>2</sub> air pollution

## Obsah

1	Úvod .....	7
2	Cíle práce .....	10
3	Rozbor problematiky .....	11
3.1	Dendrochronologie ve výzkumu dynamiky růstu lesních porostů.....	11
3.2	Rašelinné smrčiny .....	34
4	Metodika.....	52
4.1	Oblast a výzkumné plochy .....	52
4.2	Sběr dat.....	62
4.3	Zpracování dat.....	62
5	Výsledky.....	75
5.1	Trendy teplot, srážek a atmosférických koncentrací SO <sub>2</sub> .....	75
5.2	Odezva radiálního přírůstu na změny klimatu .....	78
5.3	Odezva radiálního přírůstu na změny trendu atmosférických koncentrací SO <sub>2</sub> a klimatu po roce 1980 .....	91
5.4	Vliv odvodnění půdy na radiální přírůst .....	93
6	Diskuze .....	98
7	Závěr a doporučení pro praxi .....	107
8	Seznam literatury a použitých zdrojů .....	111

## 1 Úvod

Ve střední Evropě je v současnosti smrk ztepilý (*Picea abies* L. Karst) hlavní hospodářskou dřevinou. Díky svému rychlému růstu a technickým vlastnostem dřeva byl z chladných horských oblastí uměle šířen převážně v 19. století i do nižších lesních vegetačních stupňů. Podmínkou úspěšného pěstování mimo jeho původní stanoviště je půda s dostatečným zásobováním vodou v podobě vysokých srážkových úhrnů nebo dosažitelnou hladinou proudící podzemní vody. Nedostatek vláhy je tedy limitujícím faktorem jeho růstu v nižších nadmořských výškách, naopak je schopen úspěšně přežít i v oblastech se stagnující vodou rašelinišť vyšších horských poloh. Náročnost na živiny v půdě je střední, jejich nedostatek však negativně ovlivňuje jeho produkci.

Smrk ztepilý (*Picea abies* L. Karst) je produkčně mimořádně labilní dřevinou, zejména v uměle založených monokulturách stejného věku. Na stanovištích mělkých půd s vysokou hladinou spodní vody má typický povrchový kořenový systém, který je v půdě slabě zakotven a působením větru často dochází k vývrátům. Smrk je hojně poškozován námrazou a sněhem, které způsobují vrcholové zlomy, častěji pokud byly stromy oslabeny škodami zvěří a následnou hnilobou v mladém věku. Rozsáhlé poškození smrkových způsobily i vysoké koncentrace škodlivých látek v ovzduší, zejména oxidu siřičitého. Poškození stejnověkových smrkových porostů abiotickými činiteli zakládá vhodné podmínky pro velkoplošné gradace hmyzích škůdců.

V horských oblastech střední Evropy rašelinné smrčiny představují velmi hodnotný původní ekosystém. Nacházejí se v montánních a subalpínských oblastech, zejména v pokleslinách na náhorních plošinách a velmi mírných svazích, většinou lemují živinově chudé okraje rašelinišť, kde hladina podzemní vody je blízko povrchu půdy.

V ČR lze nalézt nejrozsáhlejší rašelinné smrčiny v Krušných horách a na Šumavě, jsou přítomné i v Jizerských horách a Hrubém Jeseníku. V porovnání s ostatními soubory lesních typů tvoří rašelinné smrčiny (SLT 7R a 8R) jen nepatrnou část lesních porostů ČR - přibližně 9518 ha, tj. 0,35 % porostní plochy (Poleno et al. 2007) a mají tedy zanedbatelný produkční význam.

I přesto, že se rašelinné smrčiny rozkládají v chladných oblastech s velmi nepříznivými klimatickými podmínkami, mnoho těchto lesů bylo již v minulosti značně ovlivňováno antropogenními vlivy s cílem zvýšit produkci lesa nebo jinak tyto lokality využít. Proto bylo mnoho rašelinných lesů odvodňováno nebo využito k těžbě rašeliny, což vedlo k degradaci těchto stanovišť se zásadním vlivem na jejich přirozený ekosystém. Vzhledem k tomu, že tyto lesy plní téměř výhradně funkci lesa ochranného nebo zvláštního určení, je dnes naopak snaha tyto lokality revitalizovat a napomoci tak návratu jejich původních ekosystémů, jejichž charakteristickým rysem je přizpůsobení se a přežívání na stanovištích s vysokou hladinou spodní vody v klimaticky nepříznivých horských oblastech střední Evropy. Obnově původních porostů rašelinných smrčín napomáhá i snížení koncentrace škodlivých látek v ovzduší, které tyto porosty velmi silně poškozovaly zejména v období 1970-1985.

Dendrochronologické metody nabízejí velký potenciál ve výzkumu dynamiky přírůstu dřevin na rozličných stanovištích. Na velikost tloušťkového přírůstu působí věk, genetické dispozice dřeviny a vlivy okolního prostředí. Pomocí statistické analýzy dendrochronologických dat lze modelovat růstový proces dřeviny v dlouhodobém měřítku a tato data využít pro zhodnocení vlivů vnějších faktorů na růst dřeviny. Dendroklimatologie využívá datovaných letokruhů ke studiu vlivu klimatu na radiální přírůst dřevin, kdy za pomoci response a korelační funkce jako hlavních nástrojů dendroklimatické analýzy dat je možné vyhodnotit vliv průměrných měsíčních teplot a



srážek na dynamiku radiálního přírůstu. Dendrochronologické metody lze úspěšně využít i ve studiu ekologických problémů, k nimž patří různé antropogenní zásahy do lesního porostu, vlastností stanoviště nebo ovlivnění vnějšího prostředí škodlivými látkami.

## 2 Cíle práce

Širším záměrem disertační práce bylo provést průzkum vlivu vybraných vnějších faktorů na dynamiku růstu smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) v rašelinných smrčínách v oblasti Krušných hor.

Na dynamiku růstu dřevin působí charakteristika klimatických podmínek, úroveň emisí v oblasti a jejich změny v čase. Proto byly porovnány časové řady letokruhových indexů jednotlivých výzkumných lokalit s časovou řadou vývoje průměrných měsíčních teplot, srážek a atmosférických koncentrací SO<sub>2</sub> z blízké meteorologické a měřicí stanice.

Vzhledem k nadmořské výšce, nepříznivým klimatickým a stanovištním podmínkám se smrk ztepilý (*Picea abies* L. Karst) na stanovištích rašelinných smrčín nachází v produkčním pesimu. Proto byly tyto oblasti v minulosti často ovlivňovány zásahy do půdního vodního režimu s předpokladem pozitivního ovlivnění přírůstu a tedy zlepšení produkční schopnosti stanoviště. Cílem práce bylo porovnat lokality bez zásahu do vodního režimu a lokality v minulosti odvodněné.

Za využití dendrochronologických metod byla v této disertační práci tedy provedena analýza následujících dílčích úloh, jejichž výsledkům budou věnovány samostatné podkapitoly:

1. vyhodnocení trendů průměrných měsíčních a ročních teplot, srážkových úhrnů a vývoje ročních průměrných atmosférických koncentrací SO<sub>2</sub>;
2. odezva radiálního přírůstu na změny klimatu;
3. odezva radiálního přírůstu na změny trendu atmosférických koncentrací SO<sub>2</sub> a klimatu po roce 1980;
4. vliv odvodnění půdy radiální přírůst.

### **3 Rozbor problematiky**

#### **3.1 Dendrochronologie ve výzkumu dynamiky růstu lesních porostů**

Dendrochronologické metody byly nejprve používány pro datování historických událostí a rekonstrukci minulého klimatu; teprve nedávno byla letokruhov $\acute{a}$  analýza plně uznána jako cenný nástroj při odhalování změn životního prostředí, kdy se například měření letokruhů ukázalo jako kriticky důležité pro studie chřadnutí lesů v Severní Americe (Cook and Kairiukstis 1990). Dnes je dendrochronologie chápána jako mnohem širší obor než pouhé datování a studium letokruhů (Fritts 1976), zahrnující aplikace v různých oblastech výzkumu, jako rekonstrukce a studium klimatu, studium problémů životního prostředí, geomorfologických a hydrologických procesů. Přehled základních metod a aplikací dendrochronologie při studiu rozmanité problematiky uvádí zejména Fritts (1976), Cook a Kariukstis (1990) a Schweingruber (1983, 1988, 2007). Z důvodu komplexnosti zpracovávaných dat bylo vytvořeno i množství programů, které jsou zaměřeny na vlastní měření letokruhů a následnou analýzu dat, jejichž přehled uvádí Dendrochronology Program Library (Holmes et al. 1994) nebo webové stránky The Science of Tree Rings: <http://web.utk.edu/~grissino/index.htm> (Grissino-Mayer 1994).

Postup při dendrochronologické analýze lze charakterizovat následujícími kroky (Drápela and Zach 1995):

- formulace problému a stanovení strategie odběru vzorků;
- vlastní odběr vzorků v terénu, jejich popis a uložení;
- proměření šířek letokruhů;
- datování vzniku letokruhů (synchronizace);
- odstranění věkového trendu (standardizace) a výpočet letokruhových indexů;

- další statistické a matematické zpracování získaných dat podle povahy řešeného problému;
- zpracování výsledků letokruhové analýzy a jejich interpretace.

### Odběr vzorků pro dendrochronologickou analýzu

Hledání a výběr vhodných oblastí pro dendrochronologickou analýzu, jednotlivých výzkumných ploch, druhů dřevin a stromů má v dendrochronologických studiích zásadní význam. Obecně platí, že za nejvhodnější oblasti pro dendroklimatické výzkumy jsou považovány ty, kde stromy rostou na klimatické hranici svého rozšíření, i když lze často získat věrohodné klimatické informace z růstových odchylek stromů rostoucích v příznivějších podmínkách; naopak oblasti s optimálními růstovými podmínkami jsou vhodné pro rekonstrukci vlivu neklimatických faktorů, jako konkurence mezi druhy a jednotlivci, chřadnutí lesa, napadení škůdci atd. Při výběru oblasti je třeba vzít v úvahu dva základní principy (Cook and Kairiukstis 1990):

1. Homogenita stanoviště velkou měrou určuje kvalitu letokruhové chronologie; ta by měla být vytvořena ze stromů stejného typu stanoviště;
2. Vývoj porostu ovlivňuje aktivitu kambia; kdekoliv je to možné, chronologie by měla být vytvořena pouze se stromů stejného sociálního statusu. Tak je omezena variabilita způsobená konkurencí, i když nemůže být zcela odstraněna. Pokud však je naopak výzkum zaměřen na vývoj porostu, pak by měly být zkoumány stromy každého sociálního statusu.

Další zásadní otázkou je stanovení minimálního počtu stromů a počtu vývrťů z jednoho stromu tak, aby bylo možné s požadovanou pravděpodobností rozšířit závěry získané z odebraných vývrťů pro celou homogenní zkoumanou oblast. Fritts (1976), na základě zkušeností, doporučuje odebírat vývrty z 20 stromů, po dvou vývrtech

z každého stromu. Cook a Kairiukstis (1990) pro analýzu radiálního přírůstu doporučují vždy dva vývrty celkem z 20 stromů a pro výzkumy jednotlivých znaků jako frekvence poranění nebo náhlých změn růstu pak vzorky z více než 20 stromů; pokud je rozložení radiálního přírůstu po obvodu kmene stromu rovnoměrné v porovnání s rozdíly ročního přírůstu mezi jednotlivými stromy, pak je upřednostňován odběr jednoho vývrtu z více stromů; v případech roztroušeného porostu stromů na horní hranici rozšíření s vlajkovitými korunami a excentrickými letokruhy autoři doporučují se zaměřit při měření a datování letokruhů na tu stranu kmene, kde jsou letokruhy nejširší, tedy na závětrnou stranu kmene. Speer (2010) doporučuje jako obecné pravidlo minimální počet 10 vývrtů, při 20 vývrtech lze získat robustnější chronologii. Počet určuje podle měřítka běžné variability v letokruhové řadě, která závisí na hloubce vzorku (Expressed Population Signal – „EPS“).  $EPS=0,85$  je hranicí, pod kterou nedoporučuje provádět rekonstrukci klimatu, protože v tomto případě individuální signály stromů převládají nad běžným růstovým signálem. Pro dendroklimatické studie tedy upřednostňuje robustní hloubku vzorků – nejméně 30 stromů a 2 vývrty na každý strom.

Drápela a Zach (1995) doporučují využít matematicko-statistické metody, jmenovitě teorii náhodného výběru, a minimální potřebný rozsah výběru počítají dle požadované přesnosti výběru a variability tloušťkového přírůstu (Šmelko 1982), kterou je třeba buď odhadnout nebo převzít z předchozích měření nebo z literatury. Šmelko (1982) řeší i problematiku počtu vývrtů z každého stromu, kdy doporučuje, na základě rozsáhlých šetření v porostech smrku a buku na Slovensku, odebírat pouze jeden vývrt z každého stromu a místo jejich odběru náhodně měnit, aby se vyrovnaly případné systematické nepravidelnosti v ukládání tloušťkového přírůstu po obvodu kmene.

Možné strategie odběru vzorků lze shrnout do dvou metodik (Cook and Kairiukstis 1990):

1. Náhodný výběr z malých zkusných ploch (do 0.5 – 1.0 ha). Ačkoliv je v tomto případě dodržena podmínka homogenity stanoviště, není často možné najít dostatečný počet starých stromů vhodných pro dendroklimatickou analýzu. Proto je tento postup častěji využíván pro výzkum neklimatických faktorů, kde náhodnost může být rozhodující pro úspěch výzkumu.
2. Stromy jsou vybírány ze stejného typu stanoviště, ale z výrazně větší oblasti, jejíž velikost závisí na homogenitě oblasti a cíli výzkumu. Výzkumné plochy musí být klimaticky a geobotanicky homogenní. V tomto případě je možné vybrat dostatečný počet starých stromů a získat tak řadu letokruhových indexů o maximální délce. Tato metoda je tedy hlavně využívána pro dendroklimatické studie. Autoři uvádějí, že pro získání průměrné letokruhové chronologie je většinou používáno 20-30 stromů; v oblastech, kde růst závisí rozhodující měrou na jednom nebo jiném limitujícím faktoru, spolehlivá chronologie může být vytvořena již při použití 5-7 stromů.

#### Datování neboli synchronizace (cross-dating)

Datování je metoda, která na základě srovnání dvou nebo více letokruhových sérií přiřadí letokruhům rok jejich vzniku a je zároveň jedním z nejdůležitějších a nejproblematictějších kroků dendrochronologické analýzy (Drápela and Zach 1995). Při analýze vývrtů ze stojících stromů lze při znalosti data odběru vývrtu určit rok vzniku letokruhu nejbližší kůry a začít tedy s analýzou od kůry směrem ke dřeni, zrovna tak je možné postupovat i u kmenových kotoučů, pokud je znám rok zmýcení stromu; v opačném případě se doporučuje začít s datováním od středu (Speer 2010).

Základní metodou je vizuální porovnání letokruhových řad, kdy je nutné nalézt v letokruhové řadě extrémně úzké letokruhy, které značí vliv limitujícího faktoru

prostředí („pointer-years“ neboli signatury) a lze tedy vycházet z předpokladu, že tento limitující faktor ovlivnil i přírůst ostatních stromů dané oblasti ve stejných letech. Obvykle se k vizuálnímu porovnání vytváří letokruhovú křivka, kdy na ose x je časová řada let růstu a na ose y pak lineární nebo logaritmická hodnota šířky každého letokruhu; logaritmické měřítko je často používáno v evropských laboratořích a zvýrazňuje význam extrémně úzkých letokruhů (Cook and Kairiukstis 1990).

Pro datování letokruhů je výhodné využít srovnávací letokruhové křivky („master chronology“), které byly vytvořeny z více spolehlivě datovaných letokruhových křivek pro určitou oblast; pokud nejsou k dispozici, je vhodné si potřebnou lokální provizorní křivku vytvořit na základě letokruhových křivek z reprezentativních porostů a kvalitních vývrtů (Drápela and Zach 1995). Speer (2010) doporučuje při výzkumu nové oblasti si takovou lokální srovnávací křivku vytvořit na základě alespoň 10 vývrtů, což usnadní vizuální datování dalších vývrtů.

Z důvodu časové náročnosti vizuální synchronizace a jejího zatížení subjektivním hodnocením dendrochronologa byly vytvořeny pomocné matematické a statistické metody, které s využitím výpočetní techniky usnadňují datování a kontrolu spolehlivosti jeho výsledků. Jako jedna z prvních pomocných metod byl používán „skeleton plot“, který graficky znázorňuje hlavní signatury letokruhové křivky. Ze statistických metod lze uvést následující příklady (Cook and Kairiukstis 1990; Drápela and Zach 1995; Fritts 1976; Speer 2010):

- Vzájemná korelace („Series intercorrelation“) mezi letokruhovými křivkami slouží k porovnání lineární závislosti letokruhové křivky se srovnávací křivkou nebo vzájemnému porovnání dvou letokruhových křivek. Čím více se hodnota korelačního koeficientu blíží číslu 1, tím vyšší je lineární závislost obou křivek;

- Procento souběžnosti („Sign test“, „Gleichläufigkeit-Koeffizient“) je měřítkem podobnosti mezi dvěma letokruhovými křivkami. Časový interval dvou po sobě jdoucích hodnot letokruhové řady je testován na vzestupný nebo sestupný trend a je mu přiřazena hodnota z oboru  $[-\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2}]$ . Ze součtu jejich hodnot pro obě křivky pro jednotlivé intervaly je pak vypočítán průměr a to je hodnota procenta souběžnosti. Čím je procento souběžnosti vyšší, tím je jejich podobnost také vyšší;
- Trend intervalu se používá pro orientační posouzení více letokruhových křivek a porovnává, kolik letokruhových křivek má v daném intervalu shodný vzestupný nebo sestupný trend. Princip výpočtu je podobný jako u procenta souběžnosti. Je vhodné procentuální hodnoty poté zanást do grafu a hodnoty menší než 10% a vyšší než 90% identifikovat jako roky významné pro datování vzhledem k tomu, že se charakter jejich letokruhových křivek významně shoduje;
- Průměrná citlivost („Mean sensitivity“) porovnává roční změny v šířce letokruhu v intervalu hodnot (0,1) - pokud jsou oba letokruhy stejně široké, přiřazuje hodnotu 0 a pokud by chyběl následující letokruh pak hodnotu 1. Výslednou průměrnou hodnotu letokruhové série do 0,2 lze považovat jako dostatečně citlivou a tedy vhodnou k rekonstrukci klimatu. Nedávná analýza vhodnosti využití průměrné citlivosti jako statistického ukazatele vlastností časové řady však ukázala, že je ekvivalentní se standardní odchylkou časové řady v případech bez vysoké autokorelace, ale je neúčinným odhadem variačního koeficientu (Bunn et al. 2013). Proto k vystižení variací růstu autoři navrhují komplexnější nástroje (smíšené modely časové řady ARMA nebo GARCH - generalized autoregressive conditional heteroscedasticity models, atd.).



Získané údaje při datování je vhodné ověřit prostřednictvím programu COFECHA (Holmes 1983), jenž byl vytvořen k datování a zejména jeho kvalitativní kontrole. COFECHA pracuje se statistickou shodou mezi segmenty každého datovaného vývrtnu a jejich shodou se srovnávací letokruhovou křivkou („master chronology“), která je v tomto programu vytvořena z vložených dat. Novějším nástrojem pro kontrolu datování jsou funkce knihovny dplR (Bunn 2007, 2008, 2010) pro volně šiřitelné „open source“ statistické prostředí „R“ (R Development Core Team 2007).

### Standardizace

V dendrochronologických studiích je zásadní získat z letokruhové analýzy informace relevantní k řešení daného problému (signál) a potlačit informace, které pro řešení daného problému nejsou relevantní (šum); letokruhová série je tedy agregací různých signálů, které se stanou signálem nebo šumem pouze v kontextu specifické hypotézy nebo jejího využití. Pro zjednodušení dalších úvah o jednotlivých signálech obsažených v každé letokruhové řadě byl vytvořen jejich lineární agregátní model (Cook and Kairiukstis 1990):

$$R_t = A_t + C_t + \delta D1_t + \delta D2_t + E_t \quad (1)$$

kde je

$R_t$ - zjištěná šířka letokruhu

$A_t$ -věkový trend letokruhové řady

$C_t$ - klimatický signál obsažený v letokruhu

$\delta D1_t$ - endogenní faktor, způsobující odchylky oproti očekávaným hodnotám, které se projevují jen v dané letokruhové sérii

$\delta D2_t$ - exogenní faktor, způsobující odchylky oproti očekávaným hodnotám, které se projevují shodně u více zkoumaných letokruhových sérií

$\delta$  -binární indikátor přítomnosti ( $\delta = 1$ ) nebo nepřítomnosti ( $\delta = 0$ ) příslušného faktoru v informaci určitého letokruhu

$E_t$ - náhodná odchylka (tj. informace, která je nevysvětlená předchozími členy modelu)

Věkový trend  $A$  je nestacionární, tedy časově závislý proces, který odráží změny tloušťkového přírůstu v závislosti na věku stromu. Odhad a odstranění věkového trendu z letokruhové série je tradičním postupem v dendrochronologii známým jako standardizace. Standardizace tedy transformuje nestacionární šířky letokruhů do nové řady stacionárních, relativních letokruhových indexů, které mají definovanou střední hodnotu 1,0 a relativně konstantní odchylku:

$$I_t = R_t \div G_t \quad (2)$$

kde je

$I_t$ - relativní letokruhový index, jejichž řada tvoří letokruhovou chronologii

$R_t$ - zjištěná šířka letokruhu

$G_t$ - očekávaná modelová hodnota letokruhu

Odhad růstového trendu může být definován jako deterministický nebo stochastický proces, kde odhadovaný růstový trend může být obecně vyjádřen funkcí:

$$G_t = f(A_t, \delta D1_t, \delta D2_t) \quad (3)$$

- odhadovaný růstový trend  $G_t$  je tedy funkcí čistého komponentu věkového trendu  $A_t$  a jeho stochastických narušení exogenního a endogenního charakteru  $\delta D1_t, \delta D2_t$ .

Deterministické metody využívají a priori definovaný matematický model radiálního přírůstu, kdy nejvhodnější je vybírán pomocí korelační a regresní analýzy a parametry jsou pak počítány metodou nejmenších čtverců. V těchto metodách se tedy předpokládá, že  $G_t = f(A_t)$  a ostatní vlivy jsou buď zanedbatelné, nebo nepůsobí. Stochastické metody se více přizpůsobují datům a často jsou vybírány prostřednictvím a

posteriori stanovených výběrových kritérií, jako příklad nejvíce používaných lze uvést digitální filtry, nízkofrekvenční filtr (low-pass filter), metodu exponenciálního vyhlazení a spline funkce (Drápela and Zach 1995). Tyto metody umožňují uvažovat i náhodné exogenní a endogenní vlivy na růstový trend tak, jak je vyjádřeno funkcí odhadovaného růstového trendu (3). Cook a Kariustis (1990) k výše uvedené teorii uvádějí, že obecně lze upřednostnit stochastické metody před deterministickými, z důvodu svobody, kterou dávají při zohlednění chování šířek letokruhů tak, jak jsou pozorovány, nikoliv jak by se teoreticky měly chovat. Na druhou stranu vysoká flexibilita stochastických modelů může přinést v některých typech studií přílišné komplikace při volbě vhodného modelu, a proto např. Drápela a Zach (1995) doporučují jejich užití v dendroklimatických studiích při detekci klimaticky podmíněných cyklů, naopak v biometrických studiích, zejména když je k dispozici kompletní letokruhovná řada, doporučují využít jednodušší metody deterministické. Tito autoři (Zach and Drápela 1991) rovněž přezkoušeli vhodnost použití některých přírůstových funkcí k vyjádření trendu letokruhových sérií s následujícími výsledky:

- Korfova funkce velmi dobře vyrovnává letokruhovú sériú smrku, borovice a modřínu u stromů ve věku 70-80 let:

$$Y = A \cdot e^{\frac{k}{(1-n) \cdot t^{n-1}}} \cdot \frac{k}{t^n} \quad (4)$$

- Hugerhoffova funkce velmi dobře vyrovnává letokruhovú sériú u mladých stromů smrku, borovice a modřínu:

$$Y = a \cdot t^b \cdot e^{c \cdot t} \quad (5)$$

- Lomená funkce se ukázala vhodnou pro delší letokruhovú sériú smrku, borovice a modřínu:

$$Y = a + \frac{b}{t} + \frac{c}{t^2} \quad (6)$$

V případové studii založené na letokruhových datech smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) z transektů zahrnujících stanoviště v různých nadmořských výškách na Oravě, v severozápadní části Slovenska, byla testována vhodnost několika regresních rovnic vyrovnat letokruhové série ve skupinách stromů, u kterých byl identifikován podobný růstový trend (Bošľa et al. 2011). Výsledky ukázaly, že nejuniverzálnější a vhodné pro vyrovnání všech letokruhových sérií byly tyto funkce:

- spline funkce:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{f}(x_i))^2 + \lambda^3 \int \hat{f}(x^2) dx \quad (7)$$

- polynomická rovnice 5. stupně:

$$y(t) = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + a_3 \cdot t^3 + a_4 \cdot t^4 + a_5 \cdot t^5 \quad (8)$$

- funkce Šmelko-Burgan:

$$y(t) = a_0(1 + \exp(a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + a_3 \cdot t^3 + a_4 \cdot t^4)) \quad (9)$$

kde je

*y*- radiální přírůst; *t*- věk kambia; *a*, *b*, *c*, *d* –parametry funkce; *x* – proměnná použitá pro předpověď přírůstu např. věk;  $\lambda$  – parametr vyhlazení.

Exponenciální (10) a Korfova funkce (4) byly vyhodnoceny jako nejméně vhodné pro vyrovnání trendu letokruhové série zejména v případech, kdy letokruhová série měla více než jedno maximum, což je častým důsledkem hospodářských zásahů v lesním porostu. Hugerhoffova funkce (5) se ukázala vhodná pro křivky s pouze jedním lokálním maximem, kdy dobře vyrovnává data u dřeně, ale neosvědčila se v zapojených porostech, které byly zatíženy konkurencí nebo jiným narušením a měly ve svém vývoji více než jedno maximum přírůstu způsobeného neklimatickými faktory.

Dnes ve výzkumných dendrochronologických pracích převažuje využití spline funkcí (7), jejichž výhodou je vysoká flexibilita standardizačních technik, které mohou být přizpůsobeny potřebám výzkumu (Cook and Peters 1981). Spline funkce tím, že

rozdělí letokruhovou řadu na několik úseků a trend je odhadován samostatně pro jednotlivé úseky, poskytuje přirozenější vystižení celkového trendu letokruhové série a je považována autory jako zvláště vhodná pro zapojené porosty, kde je růst ovlivňován zejména neklimatickými faktory. Pokud se však jednalo o nezapojené porosty v semiaridních oblastech, kde jsou stromy blízko nebo na hranici svého rozšíření, nejsou ovlivňovány konkurencí nebo jiným narušením a jejich roční radiální přírůst se po juvenilním růstu celkem pravidelně snižuje na relativně stacionární průměrnou úroveň, byly ke standardizaci využívány jednoduchá lineární regrese a modifikovaná negativní exponenciální křivka (Fritts 1976; Fritts et al. 1969):

$$G_t = a \cdot \exp^{-b \cdot t} + k \quad (10)$$

kde jsou

*a, b, k - koeficienty této nelineární regresní funkce, a jsou funkcí času t.*

Jako alternativa k často používané modifikované negativní exponenciální funkci byla navržena C-metoda (Biondi and Qeadan 2008). Je založena na předpokladu, že konstantní růst je vyjádřen konstantním růstem kruhové základny rozloženém po rostoucím povrchu. C-metoda byla matematicky odvozena a lze ji charakterizovat tím, že nevyžaduje vyrovnání křivky růstovými funkcemi za použití nelineární regrese. Zároveň ve vzorovém porovnání s metodou aplikace regionálních růstových křivek dávala přesnější výsledky.

Pro proces standardizace byl vyvinut speciální program ARSTAN (Cook and Krusic 2005). Ten nabízí možnost volby optimální metody prostřednictvím výběru z několika standardizačních funkcí včetně vizualizace výsledné letokruhové křivky a umožňuje tak maximalizovat signál zájmu a odstranit šum z finální letokruhové chronologie. Rovněž odstraňuje komponent autokorelace v časových řadách.

Novějším nástrojem pro standardní zpracování analýzy letokruhových dat ve všech krocích je ve statistickém prostředí „R“ (R Development Core Team 2007) knihovna dplR (Bunn 2007, 2008) a knihovna detrendeR (Campelo et al. 2012); ta je grafickým uživatelským rozhraním pro standardní letokruhovou analýzu. Knihovna dplR umožňuje standardizaci časové řady letokruhů jak po jednotlivých letokruhových sériích tak i skupinově, kdy uživatel může volit ze tří standardních metod odstranění věkového trendu z časové řady – modifikované negativní exponenciální křivky (10), kubické vyhlazující spline funkce (7), nebo lineární funkce (Cook and Kairiukstis 1990; Fritts 1976). Parametry vyhlazující spline funkce jsou implicitně nastaveny na frekvenční odezvu  $f = 0,5$  a vlnovou délku jako  $2/3$  délky letokruhové řady, tyto parametry lze však individuálně změnit v zadání funkce. Vhodnost volby standardizační funkce a jejích parametrů lze vizuálně porovnat v grafech, které jsou implicitně pro každou standardizační metodu generovány.

#### Odhad průměrné časové řady letokruhových indexů

Získané časové řady letokruhových indexů procesem standardizace je možné považovat za stacionární a stochastické procesy; jsou tedy souborem dat obsahujícím jak společný signál ve formě  $C_t$  (a snad  $D2_t$ ) Cookova lineárního agregátního modelu (1) a individuální signály jedinečné pro každou letokruhovou sérii ( $D1_t$  a  $E_t$ ). Pro výpočet průměrné časové řady letokruhových indexů byly navrženy tři způsoby (Cook and Kairiukstis 1990): aritmetický průměr, robustní průměr („biweight robust mean“) a průměr založený na testování směsi normálních rozdělení ve vzorku.

Klasickou metodu výpočtu aritmetického průměru indexů je vhodné nahradit metodou některého robustního průměru, např. „biweight robust mean“ (Mosteller and Tukey 1977), pokud se dají očekávat extrémní hodnoty indexů v některých

letokruhových řadách. Použití robustního průměru tedy připouští pravděpodobnost kontaminace dat vlivem endogenního narušení a jinými zdroji „šumu“, které mají dlouhodobý charakter a nemají normální rozdělení – jsou tedy náhodnými vlivy v prostoru a čase. Pokud je však vzorek indexů zcela bez extrémních hodnot a blíží se normálnímu rozdělení, rozptyl robustního průměru bude větší než u aritmetického průměru a proto je méně účinným odhadem společného signálu, pokud předpoklad existence extrémů je nesprávný. V případě správnosti předpokladu má robustní průměr menší rozptyl a je tedy účinnějším odhadem společného signálu pro soubory s počtem vzorků větším než 10, kdy jeho účinnost přesahuje 90% aritmetického průměru. Jeho použití se ukázalo vhodným zejména v zapojených porostech, kde je větší pravděpodobnost existence endogenního narušení a extrémních hodnot (Cook and Kairiukstis 1990).

Předpokladem pro analýzu časových řad je nekorelovatelnost (vzájemná nezávislost) členů příslušné časové řady, v letokruhových sériích však byla prokázána častá korelace mezi sousedními letokruhy, kdy klima v předchozím roce ovlivňuje růst v roce následujícím. Ověření autokorelace je důležité pro volbu způsobu analýzy letokruhových dat. Některé metody uvádí Drápela a Zach (1995) nebo Zvára (2008b).

V případě vysoké autokorelace je vhodné využít statisticky účinnějších odhadů průměrných hodnot letokruhových indexů, což je možné například procesem odstranění nežádoucí korelace z časové řady („prewhitening“) nebo modelováním časových řad (Cook and Kairiukstis 1990). K tomu lze využít modelu autoregresního procesu AR(p) nebo smíšeného procesu ARMA (p,q) (Box and Jenkins 1970; Guiot 1986) před vlastním výpočtem průměrné časové řady letokruhových indexů, přičemž řád procesu může být určen pomocí Akaike Information Criterion (Akaike 1974).

Výpočet se všemi výše uvedenými teoretickými předpoklady lze opět provést interaktivně v knihovně dplR (Bunn 2007, 2008). Příslušná funkce spočítá průměrnou hodnotu letokruhového indexu jako aritmetického průměru nebo robustního průměru („Tukey’s biweight robust mean“) a zároveň je možné před výpočtem průměru odstranit autokorelaci z každé časové řady.

### Klouzavé průměry

Dle lineárního agregátního Cookova modelu (1) působí na roční radiální přírůst stromu vedle věkového trendu, vlivu klimatu a exogenních faktorů, rovněž endogenní vlivy. Ty se mohou v letokruhové křivce projevit neočekávaným pulzem, který se neobjeví u většiny ostatních časových řad. Důvodem mohou být například výchovné zásahy, lokální změny ve výživě stromu, přičemž jejich separace je extrémně obtížná, protože prakticky nikdy neznáme příčinu, která působila v určitém čase na určitý strom nebo malou skupinku stromů (Drápela and Zach 1995).

Pro jednodušší odhalování trendu časové řady lze tyto vlivy částečně eliminovat použitím klouzavých průměrů, které křivku vyhladí a zvýrazní její dlouhodobější trend. Počítají se jako průměr stejného počtu za sebou jdoucích období, přičemž jejich délku je třeba vhodně zvolit dle povahy řešeného problému.

### Dendroekologie: vliv neklimatických faktorů na radiální přírůst

Dendroekologie, jako podobor dendrochronologie, využívá dendrochronologické metody ke studiu ekologických problémů (Drápela and Zach 1995). Termín dendroekologie byl poprvé užit v pracích B. Vinše (Vinš 1961, 1962, 1963), který se zasloužil o rozšíření dendrochronologie a dendroklimatologie do oblasti lesnické ekologie; ve svých výzkumech se věnoval zejména vlivu kouřových škod na růst



lesních porostů v imisních oblastech. Důležité ekologické problémy, pro které je vhodné využít dendrochronologické metody, zahrnují rozsáhlá přemnožení býložravého hmyzu v lesích, chřadnutí stromů pozorované ve střední a severní Evropě a v některých částech USA a potenciální environmentální změny z důvodu zvyšování koncentrace atmosférického oxidu uhličitého a dalších plynů (Fritts and Swetnam 1989). Dendrochronologické metody lze s úspěchem využít i ke kvalitativnímu vyhodnocení minulých environmentálních změn, jako například interakce růstu stromů a vlivu povodní, dynamiky sukcese lesních porostů, fluktuace ledovců, zemětřesení nebo pádu velkých meteoritů (Cook and Kairiukstis 1990; Schweingruber 2007; Speer 2010).

Dendroekologie používá ke studiu ekologických problémů standardní dendrochronologické metody a postupy (výběr lokality, stanovení strategie odběru vzorků, letokruhovou analýzu, datování, standardizaci a statistické vyhodnocení získaných dat). Velkou výhodou dendroekologie je možnost využití porovnání letokruhových sérií z míst ovlivněných zkoumaným faktorem a míst neovlivněných. Je však nutné, aby výběr lokalit byl velmi pečlivý; buď lze tedy vybrat lokality, u kterých je známo, že jsou mimo dosah zkoumaného vlivu nebo které představují nějaký konkrétní stupeň zasažení zkoumaným vlivem. Pro získání objektivních výsledků je však nutné opět předem odstranit věkový trend a další informace z letokruhové řady, které nejsou relevantní k řešení daného problému (Cook and Kairiukstis 1990; Schweingruber 2007; Speer 2010)

#### Dendroklimatologie: vliv klimatických proměnných na radiální přírůst

Dendroklimatologie je jednou z nepopulárnějších a nejméně propracovaných podoborů dendrochronologie (Drápela and Zach 1995). Využívá datovaných letokruhů k rekonstrukci a studiu současného klimatu i klimatu v minulosti. Klima je

pravděpodobně jeden z hlavních faktorů, které ovlivňují meziroční variabilitu radiálního přírůstu stromu, kdy na jeho růst působí teplota, srážky, sucho, půdní vláhota, délka vegetačního období, délka trvání a výška sněhové pokrývky, vzdušná vlhkost, délka slunečního svitu apod. Proto klimatické změny a fenomén klimatu mohou být rekonstruovány z letokruhů z důvodu existence specifického klimatického signálu v každém letokruhu (Speer 2010). Časové změny v růstu stromu, jak je vidět v letokruhových sériích, lze tedy běžně připsat meziročním změnám v klimatických podmínkách, vedle trendu souvisejícího s věkem a vlivu různých typů disturbancí (Andreassen et al. 2006).

#### Odběr vzorků pro dendroklimatologickou analýzu

Výběru oblasti pro odběr vzorků je třeba v dendroklimatologických studiích věnovat velkou pozornost. Nejvhodnějšími jsou ty oblasti, kde klimatické faktory značně ovlivňují proměnlivost letokruhů, což je většinou v oblasti klimatické hranice rozšíření konkrétní dřeviny; naopak, oblasti, kde jsou optimální podmínky pro danou dřevinu, jsou vhodné pro studium neklimatických faktorů. V případě studia vlivu srážek je vhodné odebírat vzorky z aridních oblastí, naopak v případě analýzy vlivu teplot z oblastí, kde není limitován přísun vody. Pro dendroklimatologické studie hraje při výběru vhodné lokality velkou roli i rozmístění klimatických stanic a tedy dostupnost relevantních klimatických dat (Fritts 1976).

Při výběru konkrétních jedinců je vhodné minimalizovat vliv konkurence mezi stromy a směřovat výběr jedinců do otevřeného lesa, na roztroušené stromy nebo do porostů bez zásahů. Je vhodné neodebírat vývrty z podúrovňových, poraněných nebo mladých stromů, protože nelze očekávat, že budou obsahovat pro danou lokalitu charakteristickou letokruhovou řadu (Speer 2010). Nejdůvěryhodnější klimatickou

informaci lze většinou nalézt v letokruhových sériích dominantních stromů, které odrážejí růstovou dynamiku stanoviště nejpřesněji; tyto stromy se často vyznačují řídkou korunou, masivním a nepravidelně se zeštíhlujícím kmenem, malým počtem větví s velkým objemem – takoví jedinci jsou nejlepší pro dendroklimatickou analýzu (Cook and Kairiukstis 1990; Fritts 1976). Speer (2010) ale upozorňuje, že staré stromy mají sice nejdelší letokruhovou řadu, ale mohou mít stářím zeslabený klimatický signál – proto doporučuje naopak vybírat stromy různého věku, nikoliv ale mladé.

Rozhodující je rovněž druh dřeviny. Například ve výzkumné práci růstové odpovědi stromů na klimatické vlivy u třech hlavních druhů jehličnanů v Rumunských Karpatech (Bouriaud and Popa 2009) bylo zjištěno, že borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) byla nejcitlivější na množství srážek, smrk ztepilý (*Picea abies* L. Karst.) na teplotu a deficit půdní vláhly a jedle bělokorá (*Abies alba* Mill.) byla nejméně citlivou dřevinou na klimatické vlivy v tomto porovnání.

Při výběru vhodné lokality pro dendroklimatologický výzkum smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) ve střední Evropě lze vycházet z výzkumné práce v jižním Německu, která ukázala, že v nízkých nadmořských výškách je hlavním limitujícím faktorem přírůstu smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) dostupnost vody, ve středních nadmořských výškách je vztah růstu a klimatu slabý nebo nejednoznačný a ve vysokých nadmořských výškách existuje silná korelace mezi teplotou vzduchu a šířkou letokruhu (Dittmar et al. 2012).

### Metody dendroklimatologické analýzy

Postup modelující vztah radiálního přírůstu a klimatických vlivů na něj působících se nazývá kalibrace. Je to proces hledání statistického modelu, který je schopen pomocí jednoho nebo více prediktorů (vstupní nezávislá proměnná) modelovat minulý průběh

jednoho nebo více prediktantů (závislá, modelovaná proměnná). V případě, že je klima prediktorem a šířka letokruhů je prediktant, pak je rovnice označována jako response funkce. Pokud na základě šířek letokruhů modelujeme klimatické charakteristiky, pak se jedná o transfer funkci (Fritts 1976).

Response funkce je tedy metoda založená na technice mnohonásobné lineární regrese s užitím hlavních komponent měsíčních klimatických dat (průměrných měsíčních teplot a srážek) jako prediktorů, umožňující odhad standardizovaných hodnot šířek letokruhů (Fritts and Wu 1986).

Obecný postup kalibrace probíhá v jednotlivých krocích (Drápela and Zach 1995): stanovení předpokládaného modelu (zpravidla lineární vícenásobná regrese), výběr prediktorů, testování všech proměnných na základní předpoklady výběrů (v tomto případě zejména na normalitu souborů a nezávislost proměnných) a jejich případná transformace, transformace všech proměnných do standardizovaného tvaru. Pro další postup je důležité zjistit, zda prediktory jsou vzájemně korelovány. V tomto případě se postupuje analýzou hlavních komponent. K určení sady statisticky významných prediktorů lze využít rovněž i krokovou regresi. Na závěr je vypočtena vlastní response funkce.

Ve fázi verifikace se ověřuje správnost regresní rovnice navržené v procesu kalibrace srovnáním vypočtených hodnot závisle proměnné a nezávislého souboru naměřených dat této veličiny. Cílem je tedy vytvořit takový model, který je možné využít pro všechna časová období, kdy se dá předpokládat, že podmínky byly obdobné. Metody verifikace tedy statisticky ověřující shodu závislého souboru (hodnoty, ze kterých byly vypočítány koeficienty regresní rovnice) a nezávislého souboru (naměřené hodnoty, které nebyly použity pro výpočet regresních koeficientů). Mezi tyto statistiky patří nejběžněji používaná parametrická statistika – korelační koeficient, která má však

jako taková omezení v nutnosti splnění předpokladů normality dat. Z neparametrických statistik lze využít například jednoduchý znaménkový test („sign test“), Product Means (PM) test a snížení chyby („reduction of error“-RE).

Postupy a metody kalibrace a verifikace jsou podrobně rozpracovány v odborné literatuře (Cook and Kairiukstis 1990). Další možné postupy uvádějí jiní autoři (Biondi et al. 2005; Biondi et al. 2008; Caprio et al. 2003; Kirdyanov et al. 2007; Schweingruber 2007; Tolwinski-Ward et al. 2011).

### Analýza hlavních komponent („Principal Component Analysis“ – PCA)

PCA lze využít zejména v případech, kdy jsou prediktory korelovány nebo je jich velký počet. Ve vlastní regresi se zpravidla předpokládá, že regresní matice  $X$  má lineárně nezávislé sloupce. V případě, že jsou tyto sloupce v nějakém smyslu téměř lineárně závislé, hovoříme o multikolinearitě (Zvára 2008a, b), jejíž existenci můžeme ověřit například pomocí inflačního faktoru („Variance Inflation Factor“- VIF).

Původní prediktory jsou pomocí PCA transformovány na novou sadu ortogonálních (vzájemně nekorelovaných) prediktorů – hlavních komponent (eigenvektorů), které jsou seřazeny podle své významnosti (eigenvalues). Tato jejich významnost je dána tím, jakou část celkového rozptylu vysvětlují a jejich velikost je tedy proporcionální k velikosti rozptylu redukovanému příslušnou hlavní komponentou (Drápela and Zach 1995).

Pro přesnost následného výpočtu regresních koeficientů je důležitý počet vybraných hlavních komponent. Příliš malé významnosti hlavních komponent (eigenvalues) totiž mohou způsobit velké standardní chyby při odhadu regresních koeficientů. Počet hlavních komponent lze stanovit například jednou z následujících metod (Cook and Kairiukstis 1990):

- počet hlavních komponent vysvětlujících více než určité procento celkové variability – 90% je považováno za rozumnou hranici;
- počet hlavních komponent s významností (eigenvalue)  $>1$ , tedy větší než průměrná hodnota eigenvalue získaná z korelační matice;
- pomocí PVP kritéria (Guiot 1991), které je bodem, kdy kumulativní součin eigenvalues klesne právě pod 1 a je roven determinantu korelační matice nekorelovaných proměnných;
- další kritérium může být založeno na Monte Carlo analýze, kdy je z původního souboru dat generováno 100 náhodných souborů stejného rozsahu. Z těchto náhodných korelačních matic je vypočteno 100 sad náhodných eigenvalues, vypočten jejich průměr a standardní odchylka. Jsou vybrány hlavní komponenty s významností, která překračuje průměrnou náhodnou eigenvalue více než dvěma standardními odchylkami. Toto kritérium je velmi přísné, používá pro analýzu pouze velmi významné hlavní komponenty a proto najde uplatnění tam, kde je důležitá pouze interpretace dat.

### Kroková lineární regrese

Další alternativou v procesu výpočtu response funkce je kroková lineární regrese. Kroková regrese se snaží snížit korelaci mezi prediktory výběrem podmnožiny takových z nich, které jsou dobře korelovány s predikanty, ale ne mezi sebou. Tato metoda umožňuje automatický výběr regresorů z množiny všech možných regresorů kombinací sestupného a vzestupného výběru. Při sestupném výběru se spočítá nejbohatší model a v každém kroku se vylučuje proměnná, která nejméně přispívá k vysvětlení modelu, při vzestupném výběru se vyjde z prázdné množiny regresorů a přidává se v každém kroku ta z ještě nezařazených nezávislých proměnných, která

v tomto kroku co možná nejlépe zlepšit vysvětlení závisle proměnné; v krokové regresi je tedy vzestupný výběr v každém kroku kombinován pokusem o zjednodušení modelu pomocí sestupného výběru (Zvára 2008b). V krokové volbě modelu lze vyhledat i nejvhodnější množinu regresorů pomocí funkce založené na logaritmu odhadu rozptylu zvětšeném o penalizaci počtu odhadovaných nezávislých parametrů - Akaikeho informační kritérium (Akaike 1974; Anděl 2007; Zvára 2008b).

Výše uvedené postupy progresivně zlepšují regresní rovnici

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\epsilon} \quad (11)$$

přidáváním nebo odstraňováním proměnných dle jejich schopnosti snížit residuální součet čtverců dané klimatické proměnné. Významnost snížení se většinou testuje předdefinovaným F-kritériem pro jednotlivé vstupující hodnoty. Protože výběr nejlepších prediktorů závisí na předdefinovaném kritériu a protože si nikdy nejsme jistí, že to je to nejlepší, tak se doporučuje vyzkoušet za pomoci výpočetní techniky všechny množné podmnožiny, kterých je  $2^m$ , kde  $m$  je počet možných prediktorů (Cook and Kairiukstis 1990).

### Speciální programy pro dendroklimatologickou analýzu

Pro dendroklimatologickou analýzu byly vytvořeny speciální programy, mezi nejpoužívanější patří PRECON (Fritts 1996), DENDROCLIM2002 (Biondi and Waikul 2004) a knihovna bootRES pro volně stažitelný statistický software R (Zang and Biondi 2013).

PRECON je program, který přečte jakoukoliv letokruhovou chronologii ve formátu ITRDB (Grissino-Mayer and Fritts 1997), poté provede celou škálu statistických analýz (např. korelace a response funkce) proti měsíčním klimatickým datům. Program dovoluje jednoduchou manipulaci s daty za účelem testování hypotéz o

rozhodujících environmentálních faktorech, klimatických změnách a dalších vlivech na přírůst stromu přisuzovaný znečištění životního prostředí.

Druhý rozšířený program – Dendroclim2002 (Biondi and Waikul 2004) a nedávno vytvořená knihovna bootRES pro statistické prostředí R (Zang and Biondi 2013), používají obdobnou metodiku výpočtu korelačních a response funkcí. Interpretace těchto funkcí vyžaduje správné vyhodnocení statistické významnosti získaných koeficientů. U response funkcí totiž větší počet významných koeficientů může vést k nepřesné interpretaci normální hladiny významnosti (Villalba et al. 1994), protože odhady chyb jsou podhodnoceny, zatímco některé koeficienty mohou chybně projít testem významnosti (Biondi and Waikul 2004). Nepřesnosti v odhadech chyb jsou řešeny metodou „bootstrapping“ (Efron and Tibshirani 1986; Guiot 1991), která je jednou z tzv. resamplingových procedur, tedy „předvýběrů“ z již vybraného výběrového souboru jako náhodných výběrů s opakováním. Tato metoda umožňuje se vyrovnat s problémem vzájemné korelace klimatických dat, tedy multikolinearitou (Cropper 1984). Lineární regresní model (11) je totiž založen na podmínce, že prediktory jsou na sobě nezávislé; vysoká multikolinearita porušuje tuto podmínku a vede k nepřesným a nestabilním odhadům regresních koeficientů a jejich statistické významnosti (Fritts 1976). Řešením je převedení proměnných  $\mathbf{X}$  lineárního regresního modelu (11) ortogonalizací na model

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\mathbf{V}\mathbf{V}^T\mathbf{b} + \boldsymbol{\epsilon} = \mathbf{Z}\mathbf{a} + \boldsymbol{\epsilon} \quad (12)$$

kde

$\mathbf{V}$  -  $k \times k$  matice normalizovaných eigenvektorů (hlavních komponent) z  $\mathbf{X}$

$\mathbf{Z}$  -  $n \times k$  matice hlavních komponent  $\mathbf{X}\mathbf{V}$  z  $\mathbf{X}$

$k \times 1$  vektor  $\mathbf{a} = \mathbf{V}'\mathbf{b}$  – lineární transformace původních regresních koeficientů  $\mathbf{b}$

(Zang and Biondi 2013).



Co se týče výběru eigenvektorů (hlavních komponent), jak program Dendroclim2002 tak knihovna bootRES používají PVP kritérium (Guiot 1991), kdy eigenvektory jsou vybírány podle klesajících eigenvalues (významností eigenvektorů) a  $r$  je pak počet eigenvektorů, jejichž eigenvalues mají kumulativní výsledek větší než 1. Odhady response funkce jsou získány pomocí aplikace metody nejmenších čtverců na modifikovaný model, který byl zjednodušen odstraněním nevýznamných komponent  $Z_2$ , tedy

$$\mathbf{y} = \mathbf{Z}_1 \mathbf{a}_1 + \boldsymbol{\epsilon}^* \quad (13)$$

přičemž

$$\boldsymbol{\epsilon}^* = \mathbf{Z}_2 \mathbf{a}_2 + \boldsymbol{\epsilon} \quad (14)$$

Knihovna bootRES využívá ke kalkulaci koeficientů response funkce metody „bootstrap“ (Efron and Tibshirani 1986) na 1000 náhodných výběrech s opakováním ze souboru kalibračních dat. Střední hodnota koeficientů je posouzena jako významná na hladině  $p = 0,05$ , když jejich absolutní hodnoty překročí polovinu rozdílu mezi 97,5% kvantilem a 2,5% kvantilem (Biondi and Waikul 2004).

Kalkulace korelační funkce počítá vzájemný vztah mezi letokruhy a každým klimatickým prediktorem pomocí Pearsonova korelačního koeficientu. I v tomto případě je metoda „bootstrap“ použita s cílem obdržet robustní odhad významnosti korelačního koeficientu s využitím metody percentilů jako u response funkce, protože i zde může docházet k nepřesnostem v testování statistické významnosti korelačních koeficientů (Biondi 1997).

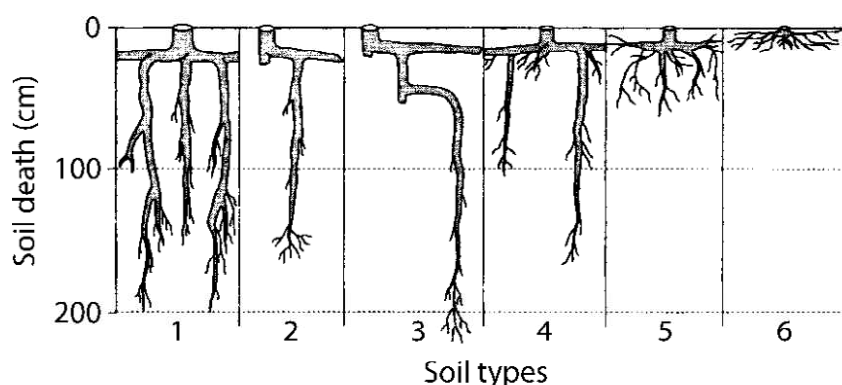
### 3.2 Rašelinné smrčiny

Rašelinné lesy se ve velké míře rozkládají v perihumidních polárních a subpolárních oblastech a v menším měřítku v horských oblastech s obdobnými přírodními podmínkami. V situaci, kdy převládají srážky nad výparem, a je ztížen odtok vody z oblasti díky ploché konfiguraci terénu, dochází na těchto plochách ke vzniku ložisek rašeliny za působení oligotrofních rostlinných společenstev. Vysoká hladina podzemní vody a nedostatek půdního vzduchu současně s nepříznivými klimatickými podmínkami výrazně omezují možnosti růstu dřevin v těchto podmínkách.

V dřevinné skladbě převažují dřeviny, které jsou dobře přizpůsobeny živinově chudým půdám, jako borovice blatka (bažinná) (*Pinus rotundata* Link), borovice kleč (*Pinus mugo* Turra), smrk ztepilý (*Picea abies* L. Karst), bříza pýřitá (*Betula pubescens* Ehrh.), bříza trpasličí (*Betula nana* L.), jeřáb ptačí (*Sorbus aucuparia* L.) a borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.), které mají schopnost přežívat desetiletí s minimálním výškovým a tloušťkovým přírůstem; jejich letokruhy obsahují velký podíl letního a tlakového dřeva, zrovna tak jako periodicky se opakující excentrický tloušťkový přírůst, jako reakci na zatížení sněhem a nestabilní podloží (Schweingruber 2007). Růst rašeliny vytváří pro strom relativně sušší prostředí, ale ve vyšším věku se strom boří vlastní vahou do rašeliny, jeho kořenový systém se tak ocitá v prostředí zbaveném kyslíku a strom odumírá (Míchal and Petříček 1999). I díky tomu jsou tyto porosty ve vyšších věkových stádiích přirozeně mezernaté.

Stromy na podmáčených stanovištích mají z důvodu stojící vody značně omezený kořenový prostor (Schweingruber 2007). Ačkoliv je charakteristika kořenového systému geneticky podmíněna, stromy musejí svůj kořenový systém přizpůsobit daným půdním a ostatním stanovištním podmínkám (Polomski and Kuhn 2001); například kořenový systém smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) dosahuje na stanovišti s hlubokou,

optimální půdou hloubky až 2m (Obr. 1), naproti tomu na podmáčených stanovištích sotva dosahuje hloubky 30 cm (Polomski et al. 1998). Z porovnání kořenových systémů smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) na dobře odvodněných a neodvodněných lokalitách vyplynulo, že na neodvodněných stanovištích jsou kořenové systémy dvakrát mělké a o třetinu širší než na odvodněných stanovištích (Konôpka 2002).



**Obr. 1:** Kořenový systém smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst), Evropa, Rusko, v půdách s odlišným vodním režimem: 1 propustná, hlinitopísčité; 2 slabý podzol pod lučinou; 3 písčité půda; 4 šedá lesní půda; 5 hnědá lesní půda; 6, 7 organická půda na rašeliništích (Kalinin 1983, in Polomski and Kuhn 1998).

Ve střední Evropě se rašelinné a vrchovištní smrčiny nacházejí v montánních a subalpínských oblastech, v pokleslinách na náhorních plošinách a velmi mírných svazích, většinou lemují okraje rašelinišť, která zde začala vznikat s ústupem ledovce při oteplování na konci posledního glaciálu (Dohnal 1965). V ČR se nacházejí zejména v Krušných horách, na Šumavě, v Jizerských horách a Hrubém Jeseníku, převážně v nadmořských výškách 700-1.300m (Průša 2001). V porovnání s ostatními soubory lesních typů tvoří jen nepatrnou část lesních porostů ČR - přibližně 9.518 ha (SLT 7R a 8R), tj. 0,35 % porostní plochy (Poleno et al. 2007a). Jsou situovány v oblastech se ztíženým odtokem vody z rašelinného ložiska, kdy hladina podzemní vody je blízko povrchu půdy, většinou 15-30 cm pod povrchem. Půdním typem je fibrická organozem (kyselá), rašelinný horizont je silně kyselý a živinami extrémně chudý (Průša 2001).

V oblastech jejich výskytu v ČR v přirozené dřevinné skladbě zcela převládá smrk ztepilý (*Picea abies* L. Karst), který ojediněle doplňuje v původních porostech borovice blatka (bažinná) (*Pinus rotundata* Link), borovice rašelinná (*Pinus x pseudopumilio* [Wilk.] Beck), borovice kleč (*Pinus mugo* Turra), bříza pýřitá (*Betula pubescens* Ehrh.) a jeřáb ptačí (*Sorbus aucuparia* L.). V bylinném patře převažuje *Sphagnum sp.*, *Vaccinium myrtillus*, *Eriophorum vaginatum*, *Calamagrostis villosa* a *Oxalis acetosella* (Viewegh 2003).

Porostní výstavba je rozvolněná, porosty trpí větrem, zamokřením, mrazem a sněhem (Míchal and Petříček 1999). Produkce je na těchto stanovištích podprůměrná a les tedy plní převážně vodohospodářskou ochrannou funkci. Není to jejich význam při zadržení vody při jarním tání, kdy je povrch rašelinišť ještě promrzlý a voda po něm volně stéká, ani zadržení vody při deštích vzhledem k tomu, že povrchová vrstva, pokud je vůbec vysušená, je poměrně rychle napojena a není schopna další vodu přijímat; rašeliništní stanoviště jsou důležitým regulátorem zejména stavu podzemních vodních nádrží a proto je nutné je chránit před odvodňováním a narušováním jejich vegetační vrstvy (Dohnal 1965).

Dendrochronologických a dendroekologických studií stromů rostoucích na rašeliništích v Evropě není mnoho (Badorek et al. 2011; Cedro and Lamentowicz 2008, 2011; Hokka et al. 2012) a většinou jsou zaměřeny na jiné dřeviny než smrk ztepilý (*Picea abies* L. Karst).

Obecně jsou však k dispozici mnohé výzkumy zabývající se růstovými charakteristikami smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst), a to z různých výškových gradientů a zeměpisných šířek. V ČR byly provedeny početné výzkumy jeho růstových charakteristik na různých stanovištích včetně vlivů vnějších faktorů, které jej mohou ovlivnit. Jako příklad lze uvést některé novější práce: dendrochronologický průzkum

růstových charakteristik smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) v oblasti Středočeské pahorkatiny (Karnet 2008), dendroekologické výzkumy z horských smrčín v oblasti Šumavy (Svoboda et al. 2010; Svoboda et al. 2012; Čejková and Kolář 2009), byl studován vliv dusíku (Vejpustková 2008), imisí a ozonu na změny v jeho přírůstu (Hůnová et al. 2014; Hůnová et al. 2010; Lomský et al. 2012; Šrámek et al. 2008; Šrámek et al. 2007; Šrámek et al. 2012), vliv imisí na zdravotní stav smrku ztepilého a jeho vegetativní reprodukce v Krkonoších (Vacek et al. 2013; Vacek et al. 2012), vliv chemických vlastností půdy na růst smrku ztepilého postiženého žloutnutím v Českém lese (Vacek et al. 2009).

Mnoho výzkumných prací na téma dynamiky růstu smrku ztepilého je rovněž k dispozici v evropských zemích, kde je smrk ztepilý (*Picea abies* L. Karst) hlavní hospodářskou dřevinou (Německo, Rakousko, Švýcarsko, Slovensko). V jižním Německu byl proveden dendrochronologický průzkum růstových charakteristik smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) a jedle bělokoré (*Abies alba* Mill.) na základě letokruhových sérií 2100 stromů z lokalit mezi 200-1710 m n.m (Dittmar et al. 2012). Bylo zjištěno, že střední šířka letokruhu je závislá na jeho výškové provenienci a ukazuje zvyšování přírůstů směrem z vysokých nadmořských výšek k nižším polohám.

Početné dendrochronologické průzkumy růstových charakteristik smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) jsou k dispozici z oblasti Fennoskandinávie, kde je rovněž smrk ztepilý jednou z ekonomicky a ekologicky nejdůležitějších druhů dřevin (Jyske et al. 2010). Dendrochronologický průzkum byl například využit ve výzkumné práci v boreální oblasti Švédska, jejímž cílem bylo zjistit, do jaké míry ovlivňuje schéma dlouhodobých disturbancí růst stromů, jejich mortalitu, stanovištní strukturu a složení starých porostů s dominancí smrku ztepilého (Fraver et al. 2008; Jonsson et al. 2009).

### Odvodnění a jeho vliv na růst rašelinné smrčiny

Vysoká hladina podzemní vody má negativní vliv na produktivitu stanoviště. Odvodňování jako prostředek zlepšení stanovištních podmínek pro růst stromů byl extenzivně využíván s pozitivními výsledky zejména ve Fennoskandinávii (Paavilainen and Päivänen 1995), kde lesy na podmačených stanovištích představují významnou část lesních porostů. Například ve Finsku z původních 10 milionů ha nedotčených rašelinných stanovišť bylo 5,5 milionů ha odvodněno pro lesnické účely, většinou během posledních šedesáti let (Hokka and Ojansuu 2004).

Většina poznatků o zlepšení produkce lesa na rašeliništích odvodněním je tedy založena na výsledcích výzkumů ze severských zemí a Ruska (Gustavsen et al. 1998). Vzhledem k tomu, že v dřevinné skladbě na rašelinných půdách v těchto oblastech často převažuje borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.), výzkumné práce jsou většinou zaměřeny na tuto dřevinu. Výzkumné práce zaměřené na růstový proces smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) v neodvodněných rašelinných smrčinách jsou ojedinělé.

Ve výzkumných pracích ve Fennoskandinávii je řešen rovněž management lesních porostů na těchto uměle odvodněných stanovištích v souvislosti s velkou rozlohou odvodněných rašelinných lesních půd a jejich značným hospodářským významem. Konkrétně ve Finsku, kde rašelinná stanoviště tvoří 24% z celkové plochy zalesněných oblastí (Hokka 1997) a odvodněné rašelinné lesy jsou důležitým zdrojem dřeva (Minkkinen et al. 2001), jsou mnohé výzkumné práce věnovány praktickému lesnímu managementu těchto specifických stanovišť. Na základě dat z trvalých zkusných ploch po celém Finsku byly vytvořeny výškovno-tloušťkové křivky k predikci produkce stromů borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.), smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) a břízy pýřité (*Betula pubescent* Ehrh.) pro několik typů stanovišť na odvodněných rašelinných půdách (Hokka 1997). Další práce byla zaměřena na

dynamiku produkce borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) a smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) na odvodněných rašelinných stanovištích na základě dat z trvalých výzkumných ploch. Byl pozorován značný nárůst v produkci dřeva po odvodnění, který byl největší v průběhu dvaceti let po odvodnění a pokračoval až do 40 let poté (Hokka and Penttila 1999). Na 329 zkusných plochách v jižním Finsku byla sbírána data po dobu 70 let a na jejich základě byla vytvořena lineární regresní funkce pro předpověď nárůstu objemu a výnosu porostů na odvodněných stanovištích (Gustavsen et al. 1998). Produkční schopnost stanoviště byla klasifikována čtyřmi stupni a pro tyto typy stanovišť byly odvozeny růstové a výnosové funkce. Objem porostu, počet kmenů, věk od odvodnění, suma efektivních teplot, mocnost rašeliny a rozestup odvodňovacích příkopů byly využity jako indikátory v růstové a výnosové funkci.

V přirozeně zalesněných rašelinných a podmáčených stanovištích je růst stromu obvykle závislý na hydrologických změnách a vysoká hladina podzemní vody růst stromu značně limituje (Macdonald and Yin 1999). Umělá změna vodního režimu způsobuje snížení hladiny spodní vody, změnu mezi evapotranspirací a výparem a další postupné změny, jako například rozšíření kořenové zóny, zvýšenou intercepci atd. (Iritz et al. 1994). Zvýšení přírůstu však nemusí nastat okamžitě. V desetileté studii růstu a produkce smrku černého (*Picea mariana* Mill.) v zalesněném rašeliništi v Ontariu, oblasti Wally Creak, odezva na odvodnění trvala pět až sedm let (McLaren and Jeglum 1998). Odvodnění provzdušní část rašeliny a dojde tak k rychlejšímu rozkladu rostlinných zbytků, což představuje větší zdroj živin a minerálů, které mohou dřeviny využít (Moilanen et al. 2012). Snížení hladiny spodní vody v rašeliništi umožní rovněž invazi stromů díky zlepšení podmínek pro klíčení na sušším povrchu rašeliny (Frelechoux et al. 2000a).

Avšak, odvodnění pro lesnické účely má současně negativní vliv na původní ekosystém. Odvodnění snižuje hladinu spodní vody, zvyšuje teplotu půdy (Lieffers and Rothwell 1987), mění kvalitu vody a zvyšuje hodnotu pH půdy (Prévost et al. 1999). Zvýšená frekvence a množství odtokových maxim zvyšuje erozi a transport uložených sedimentů z odvodněných oblastí (Marttila and Klove 2010; Marttila et al. 2010). Hydrologické výzkumy vlivů odvodnění naznačily, že dosavadní maxima odtoku mohou být dále zvýšena odvodněním v případě intenzivních srážek v povodích s již vysokou (blízko povrchu půdy) hladinou spodní vody (Iritz et al. 1994). Výzkum vlivu odvodnění na hydrofyzikální vlastnosti rašeliny (Sherwood et al. 2013) poukázal na rychlejší dekompozici rašeliny na odvodněných stanovištích, ztuhnutí rašelinného profilu a díky nižší hladině spodní vody i nárůst kořenových systémů dřevin; zatímco nebyl zjištěn významný rozdíl v hydraulické vodivosti na odvodněném a neodvodněném stanovišti, k významným změnám došlo ve schopnosti zadržet půdní vláhu v horních vrstvách rašelinného profilu v neprospěch odvodněných stanovišť. Odvodnění tedy všeobecně způsobuje markantní ztrátu povrchové vrstvy rašeliny (Pitkanen et al. 2013).

Rašelině s převládajícími porosty rašeliníku *Sphagnum sp.* jsou považovány za významný uhlíkový sink, kdy základní podmínkou účinné akumulace uhlíku je aktivní rašelinotvorný proces (Badorek et al. 2011; Cedro and Lamentowicz 2011). Výzkumná práce ve Finsku poukázala na trvale vyšší množství zásoby uhlíku na neodvodněných stanovištích v porovnání s odvodněnými (Minkkinen et al. 2001). Antropogenní zásahy do vodního režimu rašeliníšť mají tedy současně i negativní vliv na bohatá společenstva mikroorganismů na těchto stanovištích, která se skládají z organismů plně přizpůsobených charakteristickým podmínkám rašeliníšť (Andersen et al. 2013). Odvodnění má i dlouhodobý vliv na produkci metanu ( $\text{CH}_4$ ), na niž působí teplota i pH půdy, ale nejvíce



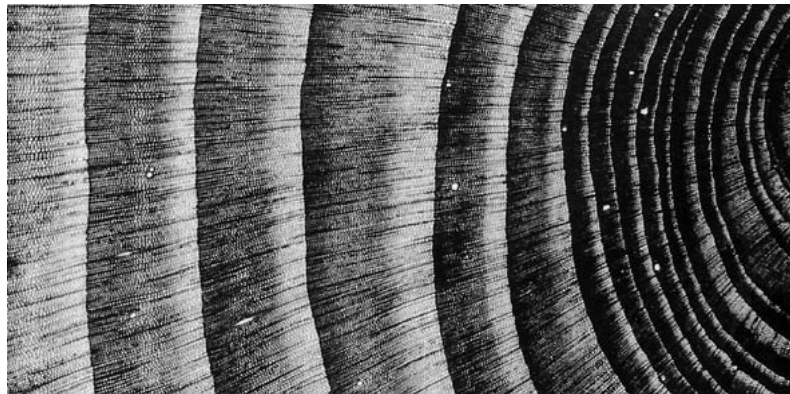
ji ovlivňuje vodní režim a s ním související skladba rostlinného společenstva. Touto problematikou se zabývá výzkumná práce z oblasti Šumavy, která porovnává tyto charakteristiky na původních, odvodněných a znovuobnovených rašeliništích a slatinách (Urbanová et al. 2013).

V Polsku byl proveden výzkum věkové struktury stromů rostoucích na Baltských rašeliništích, antropogenních vlivů na hladinu vody v rašeliništi a vlivu klimatických faktorů na růst borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.). Dendroklimatologická analýza neprokázala statisticky významný vliv klimatických charakteristik na přírůst stromů, naopak z výzkumu vyplývá ovlivnění přírůstu změnami vodní hladiny, související s antropogenními zásahy. Povrch rašeliniště byl kolonizován borovicí lesní právě po snížení hladiny spodní vody z důvodu předpokládané těžby rašeliny, což autory vedlo k úvaze, že borovice lesní rostoucí na tomto stanovišti není konečným sukcesním stadiem, ale spíše důkazem narušeného hydrologického režimu a indikátorem narušeného ekosystému rašeliniště (Cedro and Lamentowicz 2008, 2011).

V pohoří Jura (Švýcarsko, Francie) byl prováděn výzkum růstových charakteristik borovice blatky (*Pinus uncinata* var. *rotundata*) a smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) rostoucích na rašeliništích ovlivněných antropogenními zásahy - odvodnění, holoseč (Frelechoux et al. 2000a; Frelechoux et al. 2003; Frelechoux et al. 2000b, 2004). Bylo zjištěno, že například u borovice blatky výška a tloušťka stromů je silně ovlivněna hydrologickým gradientem a v nepříznivých podmínkách může přežívat desetiletí s velmi omezeným přírůstem. Zvýšený přírůst byl zaznamenán po snížení hladiny spodní vody odvodněním z důvodu plánované těžby rašeliny. Co se týče dřevinné skladby na tomto stanovišti, smrk ztepilý se nacházel v okrajových částech rašeliniště se sníženou hladinou spodní vody, zatímco směrem do středu rašeliniště se

zvyšoval podíl borovice blatky, která zcela dominovala na místech s vysokou hladinou spodní vody.

Většina rašelinišť střední Evropy byla odvodněna a rašelina vytěžena. Později, z důvodu ochrany přírody, v některých izolovaných oblastech byla uměle zvýšena hladina spodní vody. Na základě poznatků z těchto lokalit (Schweingruber 2007) během tohoto procesu, kdy bylo mnoho stromů již přizpůsobeno nižší hladině spodní vody, se najednou po jejím zvýšení stromy ocitly na jejich fyziologické hranici přežití. Po zvýšení hladiny spodní vody v pozdní zimě velké smrky v zaplavené oblasti podlehly stresu, shodily velkou část jehličí a uhynuly během následujícího léta. Na druhé straně, smrky na mírně zvýšeném stanovišti (0,5 -1 m nad hladinou spodní vody) nereagovaly na zvýšenou hladinu spodní vody vůbec. Co se týče anatomie dřeva, jedinci s kořeny výhradně v podmáčené oblasti vytvořily jedinou řadu buněk jarního dřeva za vegetační období; ty co rostly v méně kritické oblasti, stále dokázaly vytvořit úzký, ale kompletní letokruh.



**Obr. 2:** Náhlý přírůst zakrslého smrku, rostoucího na okraji rašeliniště, reagujícího na umělé odvodnění stanoviště (Schweingruber 2007).

Stromy na podmáčených stanovištích mají omezený kořenový prostor z důvodu stojící vody. Pokud je po odvodnění strom schopen využít hlubší půdní vrstvy, jeho růst

se zvýší (Obr.2); avšak pokud kořenový systém nedokáže využít velmi vlhkou půdu, jeho růst bude snížený (Schweingruber 2007).

Limitujícím faktorem pozitivní reakce na odvodnění může být věk stromu v okamžiku odvodnění. Některé starší studie provedené v Rusku (Piawczenko and Sabo 1962 in Socha 2012) naznačily, že smrk ztepilý (*Picea abies* L. Karst) může stále reagovat na odvodnění ve věku přes 100 let. Ve studii růstu smrku černého (*Picea mariana* Mill.) se odezva vyskytla zejména u stromů, které byly mladého až středního věku v době odvodnění (Macdonald and Yin 1999). V případě borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.), bylo zjištěno, že asymptota výškového růstu je funkcí věku porostu a času odvodnění (Hokka and Ojansuu 2004). Na základě studie zaměřené na dlouhodobé účinky vysoušení mokřadů na produkci borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) v Polsku bylo zjištěno, že vliv odvodnění záležel primárně na věku porostu v době odvodnění; pozitivní růstová odezva (tj. výškový přírůst) byl pozorován v porostech mladších než 45-50 let v době odvodnění, kdy mladší porosty reagovaly ještě silněji; porosty starší než 50 let v době odvodnění se zdály neovlivněné (Socha 2012).

Výzkum provedený v Bystřických horách na jihu Polska (Obidzinski et al. 2009) byl zaměřen na dynamiku rašeliništní vegetace s ohledem na možnost její spontánní regenerace. Výsledky ukázaly, že současný roztroušený porost stromů se začal vyvíjet před 250 lety, nicméně posledních 50 let došlo k obratu v dosavadním vývojovém trendu, kdy porosty začaly ustupovat vrchovišti. Tento fenomén se zdá, že souvisí s počátkem odvodňování rašeliniště, následovaném postupným zarůstáním odvodňovacích příkopů a s tím spojeným zvýšením vodní hladiny vrchoviště.

Podmáčená lesní stanoviště jsou známá svojí citlivostí na narušení. Proto by environmentální vliv zásahů do jejich vodního režimu měl být vždy předem pečlivě zvážen, aby jejich velké rozšíření pro lesnické účely nezpůsobilo velkoplošné poškození

těchto ekosystémů (Prévost et al. 1999). Ve střední Evropě jsou zbylá zachovalá rašeliniště a je obklopující rašelinné a podmáčené lesy předmětem ochrany na národní nebo nadnárodní úrovni v rámci NATURA 2000. Navíc jsou v některých přírodně cenných lokalitách rašeliniště poškozená odvodněním nebo těžbou systematicky obnovována budováním přehrádek na odvodňovacích příkopech. Toto opatření napomáhá rychlému zvýšení hladiny spodní vody a původní ekosystém má tak možnost spontánní a poměrně rychlé regenerace.

#### Vliv teplot a srážek na dynamiku růstu rašelinné smrčiny

Velké množství dendroklimatologických prací je k dispozici z oblasti Fennoskandinávie, kde má tento výzkum dlouhou tradici. Jsou často z podmáčených nebo rašelinných stanovišť, která jsou zde velmi rozšířená, avšak zaměřeny povětšinou na borovici lesní (*Pinus sylvestris* L.).

K dispozici jsou velmi komplexní práce (Briffa et al. 2004; Briffa et al. 2002a, b; Briffa et al. 2008), které se zabývají variabilitou v trendu ročního přírůstu v různých lokalitách ve vysokých zeměpisných šířkách Eurasie a porovnávají údaje letokruhových sérií vytvořených ze stojících a odumřelých stromů borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) na severní hranici jejího rozšíření za období více než 2000 let. Rekonstrukce reakce přírůstu stromů na změnu teplot ukázala jasně ochlazující vliv velkých vulkanických explozí a skutečnost, že ochlazení v 15.-16. století zde bylo výraznější než bylo doposud odvozováno z jiných dat. Naopak, nebyl pozorován očekávaný zvýšený přírůst v souvislosti s oteplováním ke konci 20. století.

Dendroklimatologická studie zaměřená na dlouhodobý vývoj letních teplot v období posledních 900 let a změn vlhkosti od roku 5000 př. n. l. byla provedena na základě dendrochronologických dat rovněž v porostech borovice lesní (*Pinus sylvestris*

L.) i ve Švédsku (Gunnarson et al. 2003; Gunnarson et al. 2011; Linderholm and Gunnarson 2005).

Nedávná výzkumná práce analyzovala růst stromů a vývoj letních teplot na severní hranici rozšíření borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) v rozsáhlé oblasti od západního pobřeží Norska po poloostrov Kola na severozápadě Ruska za posledních 1200 let. Letokruhové série vykazaly silnou závislost přírůstu na průměru letních teplot (červen-srpen) v tomto regionu. Výsledky naznačují, že 20. století bylo nejteplejším za posledních 1200 let, ale nebylo významně odlišné od 11.století, naopak nejchladnější bylo 17. století (McCarroll et al. 2013).

V severním Finsku byl studován vliv minimálních, maximálních a průměrných srážek na radiální přírůst borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) za severní hranicí souvislého rozšíření lesa. Hustota letního dřeva, šířka letokruhu a šířka jarního dřeva byly ovlivněny klimatickými proměnnými silněji než šířka letního dřeva nebo hustota jarního dřeva. Šířka jarního dřeva byla ovlivněna srážkami v červnu, teplotami uprostřed zimy (prosinec/leden) a v březnu. Nízké průměrné teploty v dubnu, dostatek srážek v květnu a teplý červenec znamenaly široké letokruhy. Dlouhé a teplé vegetační období zapříčinilo vysokou hustotu letního dřeva, kdy největší závislost byla prokázána na srážkách a teplotách v červenci a srpnu (Tuovinen et al. 2009).

Práce, které se zaměřují na vliv teplot a srážek na dynamiku růstu smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) v hlavních oblastech jeho rozšíření, povětšinou ukázaly, že v nižších zeměpisných šířkách s teplým a suchým létem je růst omezován množstvím letních srážek a naopak ve vyšších zeměpisných šířkách s vlhkým a chladným klimatem nízkými letními teplotami (Makinen et al. 2002; Makinen et al. 2001). V těchto výzkumných pracích byl analyzován roční radiální přírůst smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) na minerálních půdách a rašelinách a jeho závislost na teplotách a srážkách.

Ve zdravých porostech vysoké květnové teploty zvýšily radiální přírůst. To však nebylo pozorováno v porostech poškozených neobjasněným chřadnutím stromů, kde byla letní teplota záporně korelována s přírůstem. Navíc, vysoká teplota během předchozího léta snížila růst stromu v následujícím létě. Letokruhové indexy poškozených porostů ukázaly silnou kladnou korelaci se srážkami v červnu. Ve zdravých porostech korelace mezi červnovými srážkami a růstem byla mnohem slabší. Tyto výsledky ukázaly, že poškození bylo spojeno se suchem a pravděpodobně se objevovalo na vysýchavých stanovištích. V dalším výzkumu Makinen et al. (2002) porovnávají regionální a časové odlišnosti v růstu smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) a jeho závislost na teplotách vzduchu a srážkách napříč transekty s různou zeměpisnou šířkou a nadmořskou výškou v jihozápadním a jižním Německu, Norsku a Finsku.

V jižním Finsku byla provedena studie reakce výškového a radiálního přírůstu smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) na uměle vytvořený nedostatek vláhy (Jyske et al. 2010). Studie byla provedena na dlouhodobých výzkumných plochách zaměřených na výzkum vlivu hnojení dusíkem. Vždy byly porovnávány plochy kontrolní a plochy s uměle vyvolaným nedostatkem vláhy. Menší množství vláhy během vegetačního období snížilo radiální a výškový přírůst, ale mělo malý vliv na vlastnosti tracheid a hustotu dřeva. Po ukončení uměle navozeného stavu sucha stromy rychle zregenerovaly ze stresu suchem. V souladu s výsledky této studie vážné sucho předpovídané v souvislosti se změnou klimatu může snížit přírůst smrku ztepilého, ale není pravděpodobné, že by došlo k velkým změnám ve vlastnostech dřeva.

V odvodněných porostech na rašelinných půdách ve Finsku byl ověřován vliv teplot a srážek na roční tloušťkový přírůst borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) (Hokka et al. 2012). Hodnoty přírůstu byly porovnávány s přírůsty v porostech na přilehlých minerálních půdách. Změny v přírůstech na rašelinné a minerální půdě ukázaly

rozdílnou závislost na klimatických faktorech. Stromy na rašelinné půdě ve vzdálenosti do 5 m od odvodňovacího příkopu vykazaly rozdílnou klimatickou odezvu v porovnání s těmi, co byly umístěny ve větší vzdálenosti. Srážky v červenci byly negativně korelovány s tloušťkovým přírůstem stromu, ale nebyla zde prokázána korelace s teplotami. Růst stromů na minerální půdě byl kladně korelován s březnovými a dubnovými průměrnými teplotami a průměrnými srážkami v květnu a červnu. Reziiduální růstové indexy vykazovaly převážně obdobné schéma na rašelinném podkladu i na stanovišti s minerální půdou (Hokka et al. 2012).

Další práce se zabývají lokálním porovnáním přírůstů s klimatickými charakteristikami. K dispozici je výzkumná práce ze západních Alp (údolí Rhony, kanton Valis, Švýcarsko), analyzující přírůsty smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst), borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.), modřínu opadavého (*Larix decidua* Mill.) a jedle bělokoré (*Abies alba* Mill.) v různých nadmořských výškách s vývojem teplot a srážek (Affolter et al. 2010).

Reakce růstu smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) byla podrobně vyšetřována v 588 lokalitách rozmístěných po celém území Norska (Andreassen et al. 2006). Korelací byla porovnána data letokruhových sérií a měsíční klimatické proměnné za období 1900–1998, kdy se ukázalo, že největší vliv na přírůst má počasí v červenci.

Vliv změny měsíčních průměrů teplot a srážek a změny obsahu dusíku v jehličí na přírůst borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) a smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) porovnává práce na lokalitách v Německu, Rakousku a Finsku (Mellert et al. 2008). Regresní analýza dat ukázala, že například u smrku ztepilého byl v Německu přírůst nejvíce ovlivněn lepším zásobením dusíkem.

Výzkum vlivu klimatických proměnných na radiální přírůst smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) byl proveden v Sasku (východní Německo) na základě

letokruhové analýzy a řady měsíčních průměrů teplot a srážek. Výzkum byl prováděn na 72 zkusných plochách v celé východo-západní šíři Saska (Erzgebirge, Zittauer Gebirge), s ohledem na výskyt smrku ztepilého v odlišných nadmořských výškách v tomto regionu. Proměnné vztahující se k radiálnímu přírůstu byly určeny korelační analýzou. Teploty pozdní zimy (únor-březen) měly významný pozitivní vliv bez ohledu na nadmořskou výšku a geografickou lokalitu. Od května do července se vliv teploty zvyšuje s nadmořskou výškou, zatímco vliv srážek se snižuje. V tomto období je však vliv srážek vyšší než vliv teplot. Červnové srážky mají v průměru největší vliv na přírůst. V případě srážkového deficitu přírůst s nadmořskou výškou klesá. Dubnové teploty neměly na přírůst významný vliv, přestože jsou podle autorů úzce spojeny s rašením v květnu. (Neumann and Rohle 2001).

Dlouhodobá časová řada porovávající vliv srážek na radiální přírůst smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) a jedle bělokoré (*Abies alba* Mill.) je k dispozici z Bavorského lesa v jižním Německu. Tento výzkum poukázal na skutečnost, že od poloviny 60. let u jedle bělokoré a od poloviny 70.let u smrku ztepilého byl do té doby evidentní klimatický signál zeslaben vlivem emisí SO<sub>2</sub> z lokálních zdrojů (Wilson and Elling 2004).

V ČR byl proveden výzkum ve vybraných porostech smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) ve Slezských Beskydech v nadmořských výškách od 403 m n.m. do 794 m n.m. Regionální standardizované letokruhové časové řady ukazují zřejmý pokles v radiálním přírůstu počínaje rokem 1970 do poloviny 90. let. Postupný nárůst radiálního přírůstu, který následoval v druhé polovině 90. let, byl přerušen v roce 2000, 2003 a 2006. Radiální přírůst vykázal statisticky významnou závislost na srážkách v červenci a září předchozího roku, srážkách v červnu aktuálního roku a srážkách během vegetačního období. Navíc byl růst smrku statisticky významně ovlivněn



teplotami v říjnu minulého roku a březnu aktuálního roku. Podobný výzkum byl proveden i v jihovýchodní části Českomoravské vrchoviny (Rybníček et al. 2012; Rybníček et al. 2010).

V Rakousku byl rovněž proveden rozsáhlý výzkum vlivu klimatu na růst dominantního smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) za období 1961-1990 (Hasenauer et al. 1999). Porovnána byla data z dvaceti klimatických stanic (teploty, srážky, délka vegetačního období) a 654 lokalit odběru vzorků. Výsledky ukázaly, že nedošlo v tomto období ke změně množství srážek, naopak došlo ke statisticky významnému zvýšení průměrné roční teploty o  $+0.72^{\circ}\text{C}$ , průměrné minimální roční teploty ( $+0.80^{\circ}\text{C}$ ), průměrné teploty v zimě ( $+2.36^{\circ}\text{C}$ ) a rovněž k prodloužení vegetační doby o 11 dnů, což způsobilo významné zvýšení průměrného přírůstu smrku ztepilého. Velmi rozsáhlá řada letokruhových sérií je k dispozici z dat sebraných na 100 lokalitách v rakouských východních Alpách, sestávající z pěti druhů nejčastěji se vyskytujících jehličnatých dřevin v rakouských Alpách: *Abies alba* Mill., *Picea abies* (L.) Karst., *Larix decidua* Mill., *Pinus cembra* L., *Pinus nigra* Arn. Variabilita růstu stromů na těchto stanovištích byla objasněna nadmořskou výškou a druhovými rozdíly, které zmírňovaly vliv ročních klimatických charakteristik. Nově získaná, dvě století dlouhá klimatická data pro velký alpský region byla využita k vyhodnocení vztahu mezi klimatem a růstem stromu. V nízkých nadmořských výškách byl růst stromu ovlivněn zejména dostatkem vláhy v průběhu jara a léta. Ve vysokých nadmořských výškách již nejsou srážky limitujícím faktorem a růst je většinou určován letními teplotami. Ve středních nadmořských výškách nebyl nalezen žádný přímý vztah mezi růstem a klimatickými proměnnými (Leal et al. 2007).

V Polsku poblíž pobřeží Baltského moře proběhl na stálých výzkumných plochách dendroklimatický výzkum *Picea abies* (L.) Karst., *Pinus sylvestris* L.,

*Pseudotsuga menziesii* (Mirb). Franco, *Picea sitchensis* (Bong.) Carr. a *Abies alba* Mill. Byly porovnávány letokruhové série z období 1925-2005 s klimatickými daty (teploty, srážky). Bylo zjištěno, že srážky a teploty vegetačního období a předcházejících měsíců ovlivnily roční tloušťkový přírůst všech zkoumaných druhů dřevin. Zima aktuálního roku a teploty časného jara zrovna tak jako srážky v únoru a srpnu měly obdobný vliv na variabilitu tloušťkového přírůstu. Velmi negativní vliv na tloušťkový přírůst byl zaznamenán v případě mrazů v zimě a časném létě. Smrk ztepilý (*Picea abies* L. Karst) se ukázal jako druh nejvíce odolný nízkým teplotám, ale snadno podléhal nedostatku půdní vláhy během jara a léta (Feliksik and Wilczynski 2009). Cílem další výzkumné práce smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) ve východním Polsku (Koprowski and Zielski 2006) byla analýza vztahu klima-růst a rozlišení oblastí s podobnými růstovými schémata s ohledem na geografickou oblast rozšíření smrku ztepilého, která z ne zcela jasných příčin nepokrývá centrální část Polska. Růst smrku ztepilého na stanovištích v severním Polsku je kladně korelován se srážkami od května do července. Šířka letokruhů na jižních stanovištích je více korelována s teplotami v březnu. Stromy z centrální části Polska (kde je výskyt smrku ztepilého jen ojediněle přirozený) mají obdobný vztah klima-růst jako stromy z jižních oblastí, což naznačuje, že zde existují obdobné přírodní podmínky a klima tedy zde nebylo limitujícím faktorem. Dendroklimatologická studie smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) je k dispozici rovněž z polských Tater. Byla vytvořena na základě dat z deseti výzkumných lokalit v nadmořských výškách od 839 do 1468 m n.m. Byla zjištěna statisticky významná závislost mezi radiálním přírůstem běžného roku a průměrnými teplotami v březnu, dubnu, červnu a červenci, ale se zvyšující se nadmořskou výškou se síla této korelace snižovala pro teploty březen-duben a zvyšovala pro teploty červen-červenec. Průměrné měsíční teploty v říjnu předchozího roku pozitivně ovlivnily radiální přírůst stromu na

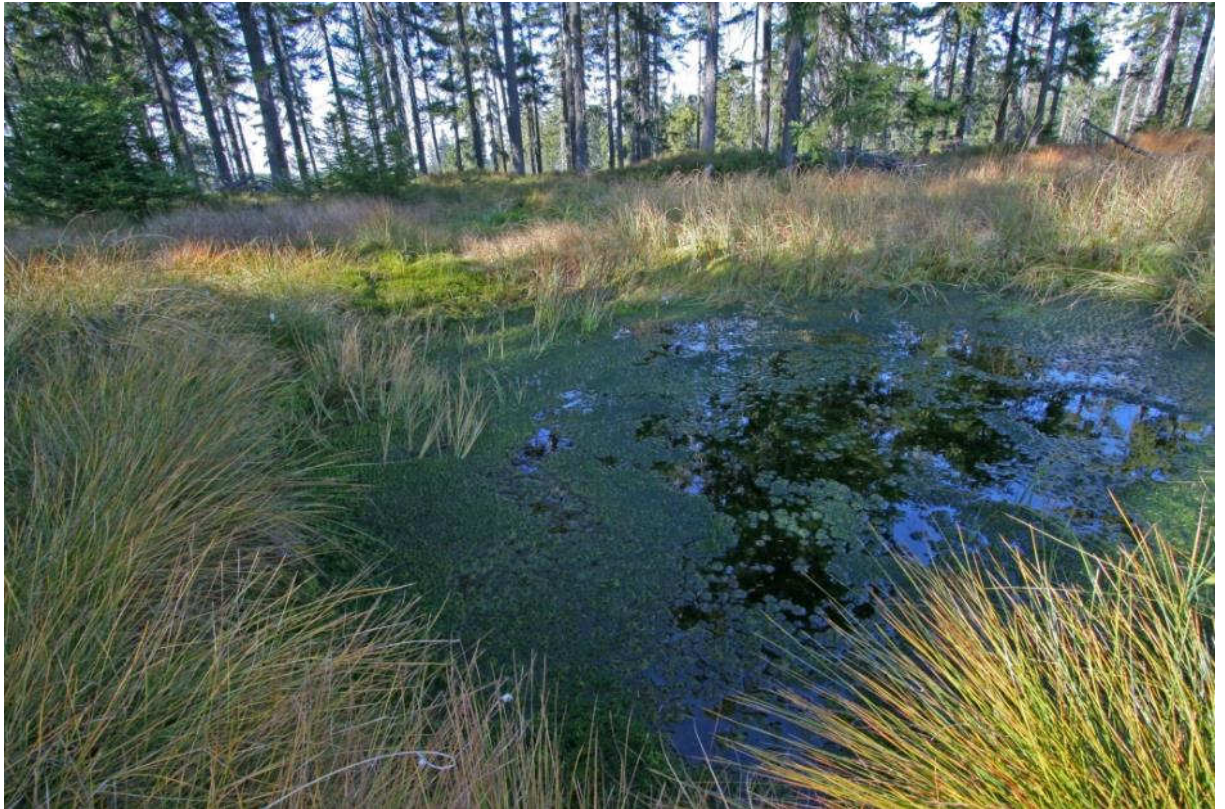
všech lokalitách. Nízké průměrné teploty v lednu negativně ovlivnily růst stromů ve vysokých nadmořských výškách. Celkově ze studie vyplynul výraznější vliv teplot na růst stromů ve vyšších nadmořských výškách, takže je pravděpodobné, že tato stanoviště mohou být zvláště senzitivní na možné účinky změny průměrných teplot (Savva et al. 2006).

Na Slovensku v Západních Karpatech byl ve čtyřech regionech proveden výzkum příčin nedávného rychlého zvýšení radiálního přírůstu jedle bělokoré (*Abies Alba* Mill.) (Bošela et al. 2014). Byl zjištěn významný nárůst radiálních přírůstů od období 1970-1980 a jako pravděpodobné příčiny byly identifikovány redukce emisí SO<sub>2</sub> a NO<sub>3</sub> spolu s významným zvýšením průměrných teplot v dubnu, červnu a červenci.

Množství výzkumných dendroklimatologických prací je k dispozici z Ruska, zejména z boreální oblasti Sibiře, kde se nacházejí lesní porosty na severní hranici svého rozšíření. (Naurzbaev et al. 2004; Naurzbaev et al. 2002; Savva et al. 2002; Shiyatov et al. 1996; Vaganov et al. 2000; Vaganov et al. 1999). Výzkum v oblasti severozápadního Ruska zaměřený na borovici lesní (*Pinus sylvestris* L.) a smrk sibiřský (*Picea obovata* Ledeb.) ukázal jasný dlouhodobý trend zvyšujících se teplot a srážek. Za posledních 20 let všechny meteorologické stanice zaznamenaly nárůst teplot, a před 40 lety se začaly zvyšovat i srážky. To se projevilo i v radiálním přírůstu výše uvedených dřevin. Takže klimatická změna mohla z části vysvětlit zvýšenou produkci lesa. Celkový rozdíl objasněný vlivem teploty se pohyboval od 22% do 41% a srážek od 19% do 38% (Lopatin et al. 2008).

## 4 Metodika

### 4.1 Oblast a výzkumné plochy



**Obr. 3:** Rašelinná smrčina, lokalita „Pod Špičákem“, NPR Božídarské rašeliniště.

V ČR jsou Krušné hory, společně se Šumavou, rozlohou nejbohatším územím na rašeliniště, která jsou zde hojná díky chladnému a vlhkému klimatu. Rašeliniště v Krušných horách lze rozdělit podle soustředěnějších výskytů ložisek na několik územních celků, od západu k východu jsou to celek rolavský, božídarský, šebestiánský a cínovecký (Dohnal 1965).

Záměrem disertační práce bylo podrobit výzkumu božídarský a rolavský celek, ve kterých jsou situována rozlohou největší a nejzachovalejší rašeliniště. Jejich obvod lemují hodnotná přírodní lesní stanoviště, zejména acidofilní a rašelinné smrčiny, jež však byly často z hospodářských důvodů v minulosti intenzivně odvodňovány.

Všechny výzkumné lokality se nacházejí v EVL Krušnohorské plató, která představuje rozsáhlé území cenných rašelinných komplexů obklopených horskými smrkovými lesy a loukami s řadou kriticky ohrožených druhů rostlin a živočichů. Jádrem východní části EVL tvoří NPR Božídarské rašeliniště a v centru západní části se nachází NPR Rolavská vrchoviště.

Dle lesních hospodářských plánů byly výzkumné plochy umísťovány do porostů se stejnými ekologickými podmínkami a stejným věkem, aby byl zachován princip homogenity stanoviště, který značnou měrou určuje kvalitu letokruhové chronologie (Cook and Kairiukstis 1990). Výzkum tedy byl zaměřen pouze na rašelinné smrčiny (*Sphagno-Piceetum*), konkrétně na soubor lesních typů 8R – vrchovištní smrčina (*Piceetum turfosum montanum*) (Chytrý et al. 2001; Plíva and Průša 1969).

**Tab. 1.** Zjištěné stanovištní charakteristiky výzkumných lokalit.

<i>Lokalita</i>	<i>nadm. výška (m)</i>	<i>sklon (°)</i>	<i>orientace</i>	<i>věk</i>	<i>počet vývrtů</i>	<i>prům. výčetní tloušťka (cm)</i>
<i>Jelení</i>	890	3	SV	103	26	37
<i>Na Vrakách</i>	980	2	J	128	24	26
<i>Pod Špičákem</i>	993	5	S	115	26	23
<i>V rezervaci</i>	1020	0	-	130	25	24
<i>Velká Kleč</i>	1025	0	-	123	25	30
<i>Velký Močál</i>	910	0	-	131	25	30

Nadmořská výška výzkumných lokalit se pohybuje kolem 900-1000 m n.m (Tab.1). Průměrná teplota oblasti výzkumných lokalit se pohybuje kolem 4°C, nacházejí se v nejvlhčí části Krušných hor s ročním průměrným úhrnem srážek 1100-1200 mm. Průměrná délka vegetační doby je 110 dnů, počet dní se sněhovou pokrývkou je kolem 140 dnů, počet dnů se sněžením je 100, průměrné sezónní maximum sněhové pokrývky 80 cm, počet dní bez mrazu je jen kolem 200 a tedy noční mrazy se vyskytují v průběhu celého roku. Oblast se vyznačuje vysokou hodnotou průměrné roční oblačnosti (70%),

vysokou relativní vlhkostí vzduchu (roční průměr 85%) a velmi častými mlhami – počet dní s mlhou je 150 za rok (ČHMÚ 2007).

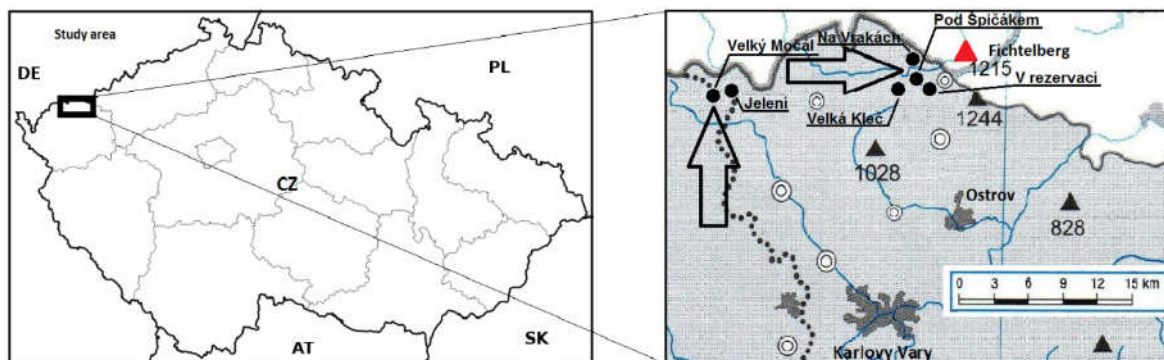


**Obr. 4:** Lokalita „Velká Kleč“, NPR Božídarské rašeliniště.

#### Božídarský celek

Podloží božídarského celku je tvořeno žulami, fylitickými a terciárními čedičovými horninami. Rašeliniště vznikala na vývěrech podzemních vod na tektonických poruchách a vývěrech suťových vod s mělkým režimem, sváděných do sedel zvětralinovým pláštěm (Dohnal 1965). Již v roce 1965 zde byla zřízena státní přírodní rezervace, v roce 1987 pak vyhlášena NPR Božídarské rašeliniště na ploše 1156 ha s cílem zachování komplexu rašelinišť, vrchovišť a rašelinných lesů. Již v 19. století bylo prováděno odvodňování rozsáhlých zamokřených ploch, od 60. let 20. století se začíná projevovat imisní poškození porostů -území NPR ze dvou třetin spadá

do pásma A ohrožení imisemi, z jedné třetiny do pásma ohrožení B. I přes pozitivní vývoj z hlediska působení imisí na lesní porosty je nezbytné stále počítat s důsledky silného zasažení imisemi v minulosti (MŽP 2013).



**Obr. 5:** Mapa výzkumných lokalit v oblasti NPR Božídarské rašeliniště a NPR Rolavská vrchoviště. ▲ Meteorologická a měřicí stanice Fichtelberg.

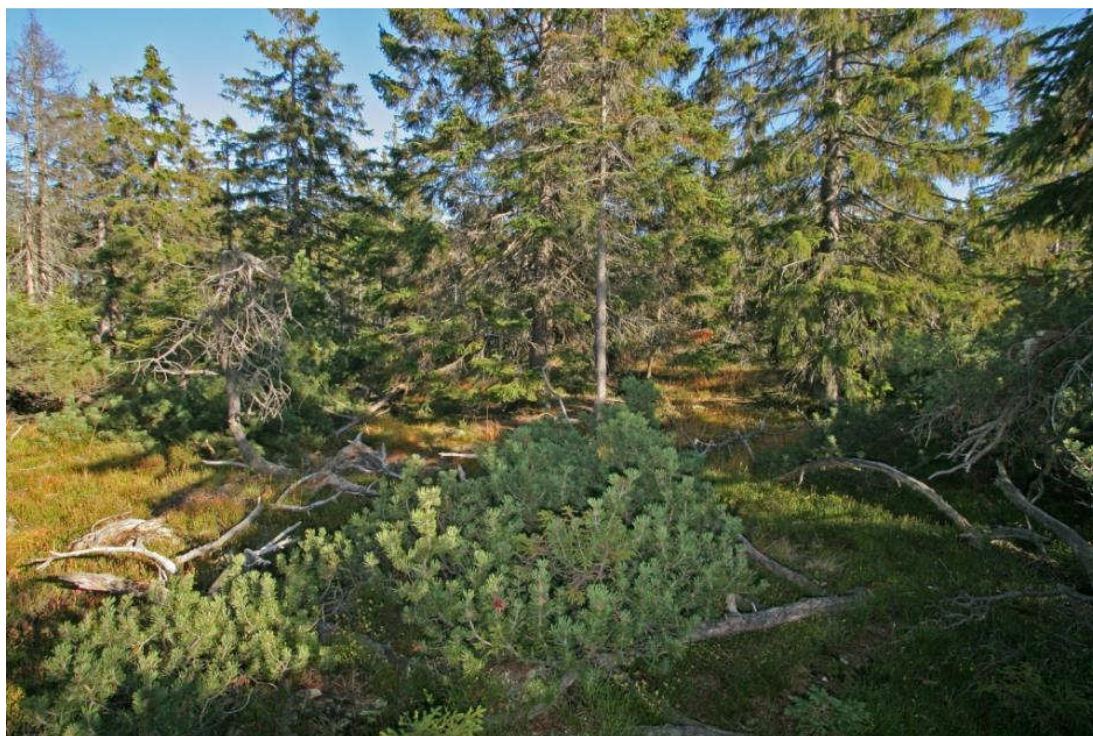
V tomto komplexu byly umístěny celkem 4 výzkumné lokality (Tab.1, Obr.5), ze kterých byly odebrány vzorky pro dendrochronologickou analýzu:

1. **Pod Špičákem** (50°24'39.0"N 12°53'40.3"E) – porost se nachází přímo v NPR Božídarské rašeliniště, na okraji svahového vrchoviště „Na Blatenském příkopu“, na úpatí Božídarského Špičáku (1115,8 m). Výzkumná lokalita je situována v nadmořské výšce 993 m, ve velmi mírném svahu se sklonem do 5° se severní expozicí (Obr.3, Obr.7). Porost je tvořen výhradně smrkem ztepilým (*Picea abies* L. Karst), v bylinném patře zjevně převažuje *Sphagnum sp.*, *Vaccinium myrtillus* a *Eriophorum vaginatum*. Dle dostupných údajů a pozorování na místě v tomto porostu nebyl minimálně v posledních 50-ti letech budován žádný systém odvodnění. Porost ve věku 130 let, typologicky 8R1-*Eriophorum vaginatum* (LHProjekt 2012) je zakrslý, s plochami přirozeného bezlesí, mezernatý, strádá silným zamokřením, kdy se starší stromy boří vlastní vahou hlouběji do rašeliny, ocitají se tak v prostředí s nedostatkem půdního vzduchu a následkem toho odumírají.

2. **Na Vrakách** (50°25'08.7"N 12°53'31,4"E) – porost se nachází poblíž hranice NPR Božídarské rašeliniště, na okraji komplexu svahového vrchoviště „Na Vrakách“. Výzkumná lokalita je situována v nadmořské výšce 980 m, ve velmi mírném svahu se sklonem 2° s jižní expozicí. Porost je tvořen smrkem ztepilým (*Picea abies* L. Karst). V roce 1992 byl porost odvodněn obnovením a prohloubením systému již zanesených starých odvodňovacích příkopů, které byly původně vybudovány pravděpodobně na počátku 20. století. Porost ve věku 130 let, typologicky 8R1-*Eriophorum vaginatum* (LHProjekt 2012) je viditelně lépe prosperující než typická vrchovištní smrčina, netrpí silným zamokřením, zejména poblíž odvodňovacích příkopů. Odlišné stanovištní podmínky odráží i stav fytocenózy, kde převažuje *Vaccinium myrtillus*, naopak *Sphagnum* sp. zde není v tak výrazné převaze jako v neodvodněných lokalitách, dominuje pouze na okrajích porostu, ve větší vzdálenosti od odvodňovacích příkopů.
3. **V rezervaci** (50°23'57.1"N 12°54'29.6"E) – porost se nachází v NPR Božídarské rašeliniště, na okraji rozvodnicového vrchoviště „V rezervaci“, na východním svahu Božídarského Špičáku (1115,8 m). Výzkumná lokalita je situována v nadmořské výšce 1020 m, na náhorní rovině. Porostu dominuje smrk ztepilý (*Picea abies* L. Karst), který ojediněle doplňuje borovice rašelinná (*Pinus x pseudopumilio* [Wilk.] Beck) a bříza pýřitá (*Betula pubescens* Ehrh.). V bylinném patře převažuje *Sphagnum* sp., a *Eriophorum vaginatum*. Dle dostupných údajů a pozorování na místě zde nebyl v minulosti vybudován žádný systém odvodnění. Původní starý porost ve věku 140 let, typologicky 8R1- *Eriophorum vaginatum* (Zahradníček 2008) je mezernatý, s plochami přirozeného bezlesí a strádá silným zamokřením.



4. **Velká Kleč** (50°23'58.3"N 12°52'40,9"E) – porost se nachází v NPR Božídarské rašeliniště, přímo na okraji komplexu rozvodnicového vrchoviště „Mrtvý rybník“. Výzkumná lokalita je situována ve výšce 1025 m n.m., na náhorní plošině rozvodí (Obr.4, Obr.6). Porostu dominuje smrk ztepilý (*Picea abies* L. Karst), který doplňuje borovice rašelinná (*Pinus x pseudopumilio* [Wilk.] Beck), jenž na okraji přechází v souvislý porost SLT 9R-vrchovištní kleč (Plíva and Průša 1969). Porost byl v minulosti odvodněn vybudováním systému odvodňovacích příkopů. V roce 2012 naopak došlo k obnově vodního režimu stanoviště – na starých odvodňovacích kanálech byly vybudovány přehrádky bránící odtoku vody. Porost ve věku 120 let, typologicky 8R1-*Eriophorum vaginatum*, (Zahradníček 2008), v bezprostřední blízkosti hlubokých odvodňovacích příkopů jsou viditelně lépe prosperující stromy a půda bez známek trvalého zamokření, v bylinném patře chybí *Shagnum* sp. a *Eriophorum vaginatum*, převažuje *Vaccinium myrtillus*.



**Obr. 6:** Na rozhraní rašelinné smrčiny (8R) a vrchovištní kleče (9R), NPR Božídarské rašeliniště, lokalita „Velká Kleč“.



**Obr. 7:** Lokalita „Pod Špičákem“, NPR Božídarské rašeliniště.

### Rolavský celek

V rolavském celku podloží tvoří žuly, jejich zvětralinový plášť přivádí podzemní vodu s mělkým režimem z okolních svahů, rašeliniště vznikla na vývěrech podzemní vody za vydatného přispění klimatu (Dohnal 1965). Některé větší lokality jsou velmi

dobře zachovány (Velké jeřábí jezero, Velký močál, Volárna), proto zde byla vyhlášena v roce 2012 NPR Rolavská vrchoviště na rozloze 752 ha, kde předmětem ochrany jsou velmi zachovalé komplexy vrchovišť, přechodových rašelinišť a podmáčených smrčín s jejich typickou flórou a faunou. Díky značnému zamokření až zrašelinění podkladu a tedy i špatné dostupnosti porostů byla v dávnější minulosti intenzita vlivů hospodaření v porostech malá, proto můžeme porosty s borovicí rašelinnou (*Pinus x pseudopumilio* [Wilk.] Beck) a řadu smrkových porostů především na SLT rašelinné řady považovat za původní a přirozené (MŽP 2012). V 70. a 80. letech minulého století v oblasti docházelo ke vzniku imisních holin, kdy k jejich zalesnění bylo využíváno buldozerové přípravy půdy, byly budovány odvodňovací příkopy a došlo k velkoplošnému vápnění porostů, včetně centrálních částí vrchovišť. V současné době je většina starých odvodňovacích kanálů již nefunkčních, avšak v letech před vyhlášením NPR byla na některých místech vybudována i odvodnění nová nebo prohrnuta staré odvodnění.

V tomto komplexu byly odebrány vzorky pro dendrochronologickou analýzu z těchto lokalit (Tab.1, Obr.5):

1. **Velký Močál** (50°23'26"N 12°39'00"E) – porost se nachází přímo v NPR Rolavská vrchoviště, poblíž rozvodnicového vrchoviště „Velký močál“. Výzkumná lokalita je situována v nadmořské výšce 910 m, na náhorní plošině (Obr.8). Porost je tvořen smrkem ztepilým (*Picea abies* L. Karst), pomístně doplněným borovicí rašelinnou (*Pinus x pseudopumilio* [Wilk.] Beck). Porost ve věku 130 let se zakmeněním 5, typologicky 8R1-Eriophorum *vaginatum* (LHProjekt 2012), je typickou původní starou rozpadající se vrchovištní smrčínou s četnými ředinami a pomístně nastupujícím přirozeným zmlazením smrku ztepilého. V bylinném patře převažuje *Sphagnum* sp., *Vaccinium myrtillus* a *Eriophorum vaginatum*.

2. **Jelení** (50°23'28"N 12°39'53"E) – porost se nachází 1 km od hranice NPR Rolavská vrchoviště. Výzkumná lokalita je situována v nadmořské výšce 890 m, v mírném svahu se sklonem 3° a severovýchodní expozicí (Obr.9). Porost je tvořen smrkem ztepilým (*Picea abies* L. Karst). V lokalitě bylo identifikováno několik odvodňovacích příkopů. Porost ve věku 130 let, se zakmeněním 7-8, výzkumná lokalita byla umístěna do jeho východní části, kde je typologicky 8R1-*Eriophorum vaginatum* (LHProjekt 2012). Porost je viditelně lépe prosperující než typická původní vrchovištní smrčina, netrpí silným zamokřením, zejména poblíž odvodňovacích příkopů. Odlišné stanovištní podmínky odráží i stav fytoceózy, kde převažuje *Vaccinium myrtillus*, naopak *Sphagnum sp.* zde není v tak výrazné převaze jako v neodvodněných lokalitách, dominuje pouze na okrajích porostu, ve větší vzdálenosti od odvodňovacích příkopů.



**Obr. 8:** Lokalita “Velký Močál”, NPR Rolavská vrchoviště.



**Obr. 9:** Lokalita “Jelení”, nedaleko hranice NPR Rolavská vrchoviště.

## 4.2 Sběr dat

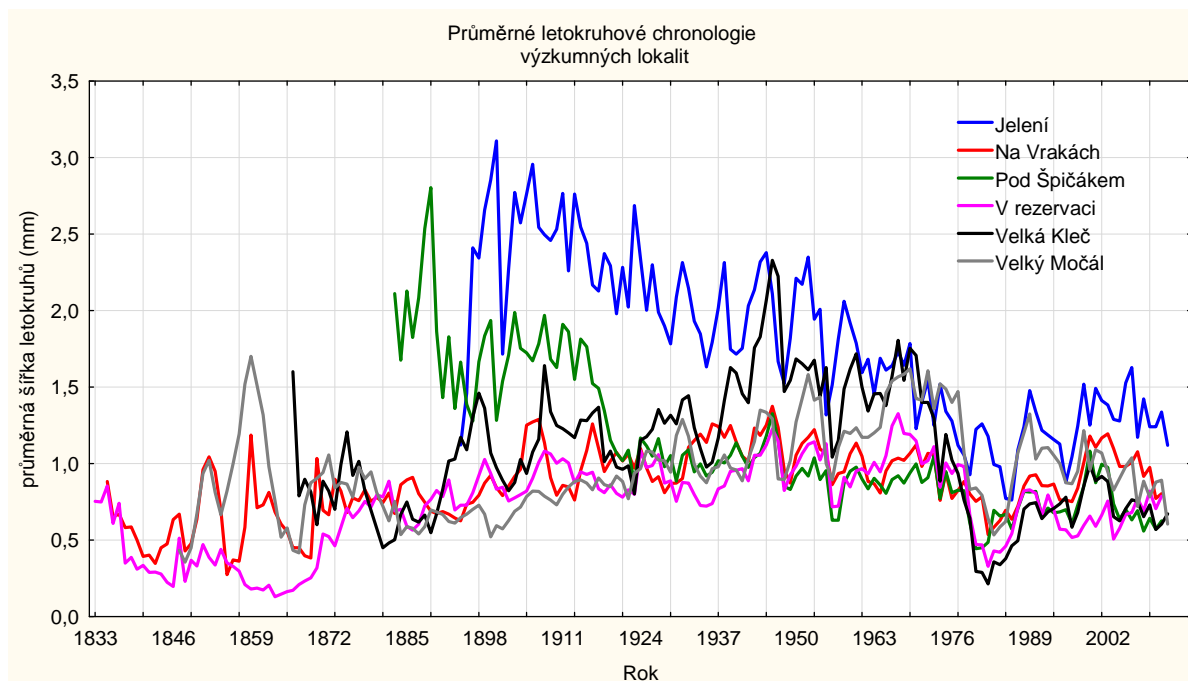
Vývrty byly odebírány v několika fázích v letech 2012-2013. Do mapy vybraného porostu byly, na základě typologické mapy, porostní mapy a leteckých snímků, předem náhodně umístěny výzkumné lokality prostřednictvím GPS souřadnic. V terénu pak bylo z této lokality náhodně odebráno celkem 25 vývrtů v plošném čtvercovém designu. Pokud byl strom viditelně poškozen, vzorek byl odebrán z dalšího nejbližšího stromu. Rovněž, pokud se jednalo o strom z podúrovně, byl vybrán nejbližší vhodný exemplář, aby byla snížena variabilita dat z důvodu konkurence mezi stromy (Cook and Kairiukstis 1990). Vzhledem k tomu, že se však jedná o přirozeně mezernaté porosty se zakmeněním kolem hodnoty 6, které většinou samy řídnou působením sněhu (Průša 2001), nejsou tyto případy časté, protože stromy jsou jen zřídka ve starším věku výrazněji ovlivněny v růstu okolními stromy. Vývrty byly odebírány ve výčetní tloušťce 1,3 m od paty kmene, u každého vzorníku byla průměrkou změřena výčetní tloušťka a ošetřena rána po vývrtnu, aby nedošlo k jeho poškození. Odebrané vývrty byly uloženy do plastických trubiček, označeny číslem lokality a vzorníku.

## 4.3 Zpracování dat

### Letokruhová data

V laboratoři byly vývrty z ochranných obalů vyjmuty a zkontrolována jejich kvalita. Z dalšího zpracování byly vyřazeny vývrty shnilé nebo poškozené - pokud je vývrt rozlámaný na několik částí nebo pokud je jeho část shnilá, je zpravidla nepoužitelný (Drápela and Zach 1995). Vývrty byly přemístěny do vyfrézovaných drážek na podkladových prknech, každý vývrt byl očíslován pořadovým číslem a pomocí kotoučové brusky se jejich povrch vyhladil. V tomto stavu byly vývrty naskenovány na nejvyšší dostupné rozlišení 6400 dpi a šířka letokruhů proměřena

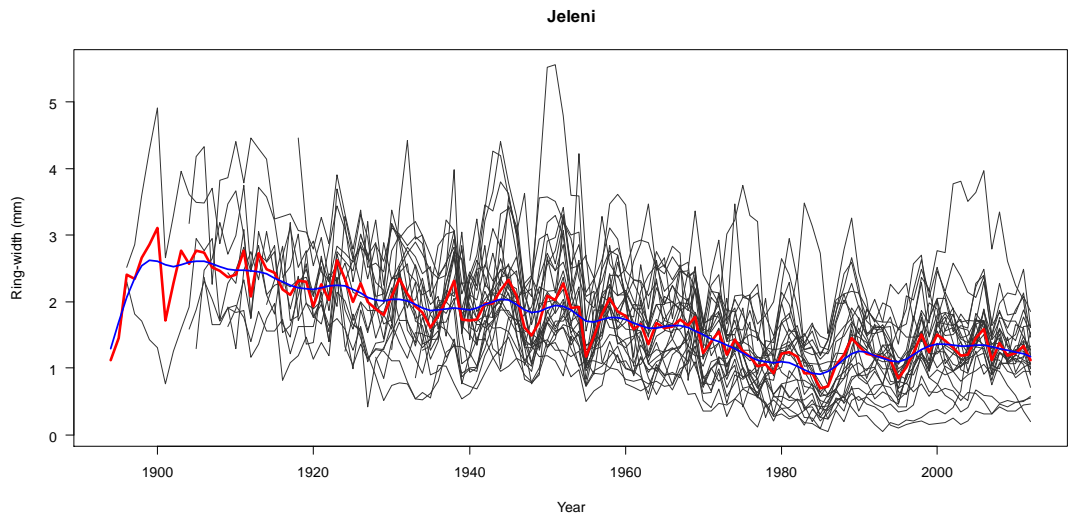
s přesností 0,01 mm pomocí programu WinDENDRO (Regent Instruments Canada, Inc. 2009), včetně rozlišení šířky jarního a letního dřeva.



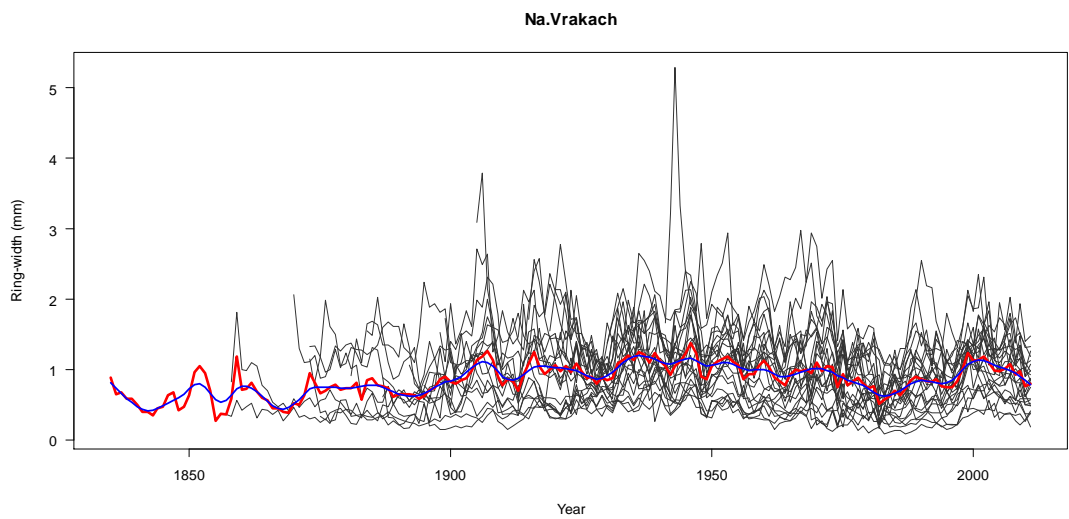
**Graf 1:** Vývoj radiálních přírůstů smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) na výzkumných lokalitách (průměrná šířka letokruhů vzorníků na lokalitě).

Datování bylo provedeno na základě znalosti data odběru vývrtnu a tedy i roku, kdy byl vytvořen poslední letokruh. V tomto případě, kdy je vývrt správně odebrán (tj. kolmo na letokruhy a do dřeně) a v letokruhové řadě nejsou poruchy ve vývoji letokruhů, lze prostým odečtením od roku vzniku posledního letokruhu u kůry snadno určit rok vzniku každého letokruhu (Drápela and Zach 1995).

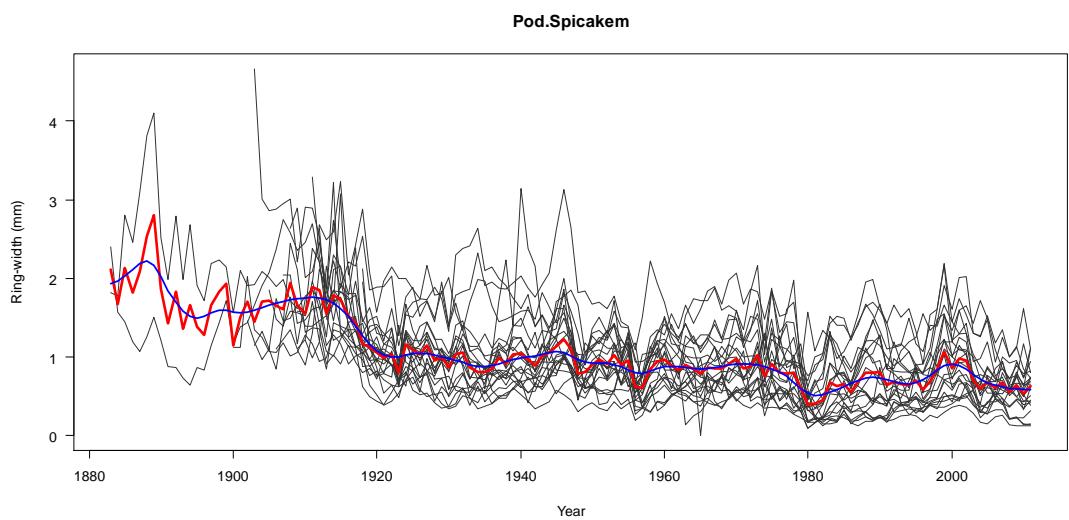
Datování letokruhů bylo ověřeno vizuální identifikací markantních bodů s mimořádně nízkými hodnotami tloušťkového přírůstu s využitím porovnání skeletonového grafu každého vývrtnu s vytvořenou srovnávací křivkou průměrných hodnot jednotlivých lokalit v programu WinDENDRO (Regent Instruments Canada, Inc. 2009), jelikož nízké hodnoty přírůstu odráží limitující faktory prostředí (Speer 2010; Yamaguchi 1991).



**Graf 2: Jelení:** letokruh. chronologie jednotlivých stromů a jejich průměrná hodnota (červeně).

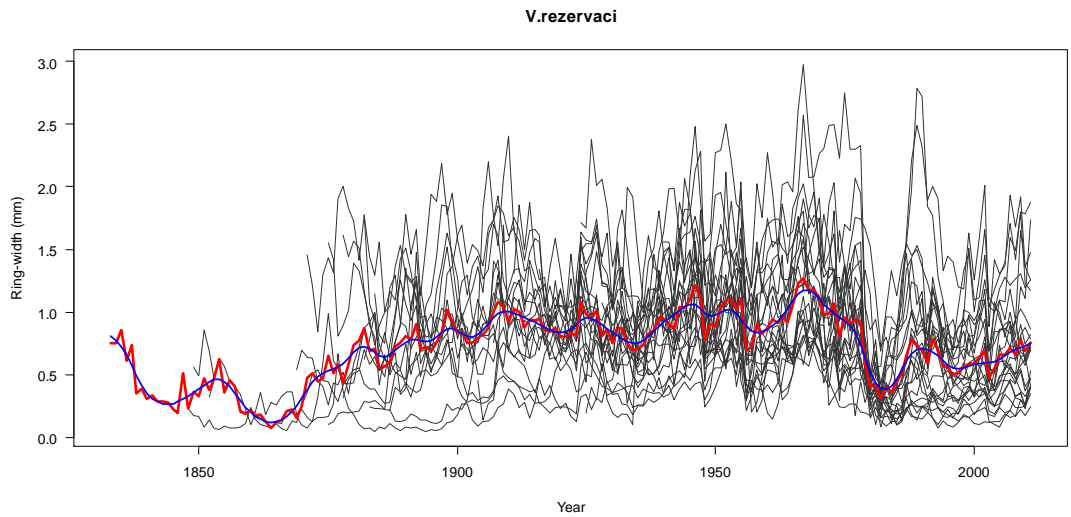


**Graf 3: Na Vrakách:** letokruh. chronologie jednotlivých stromů a průměrná hodnota (červeně).

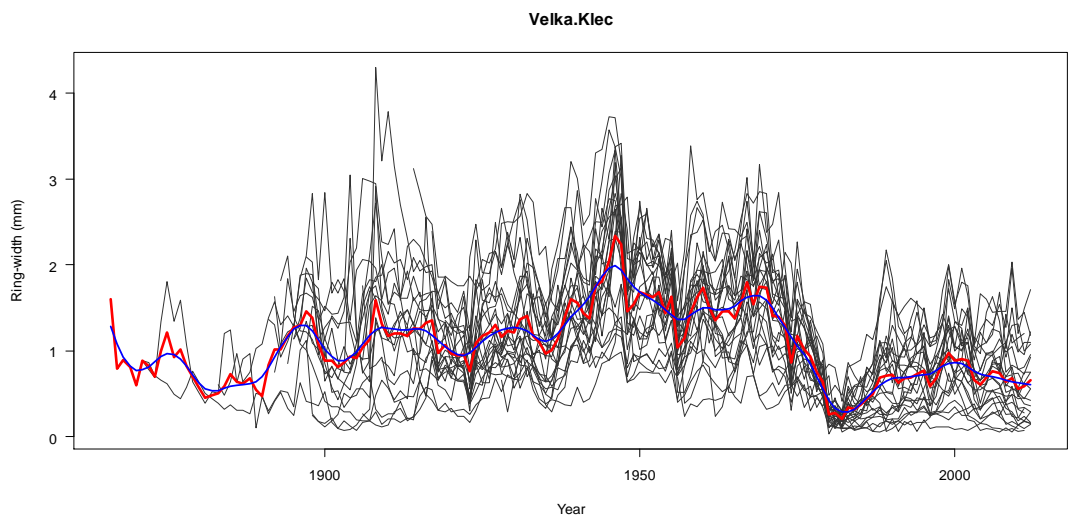


**Graf 4: Pod Špičákem:** letokruh. chronologie jednotlivých stromů a prům.. hodnota (červeně).

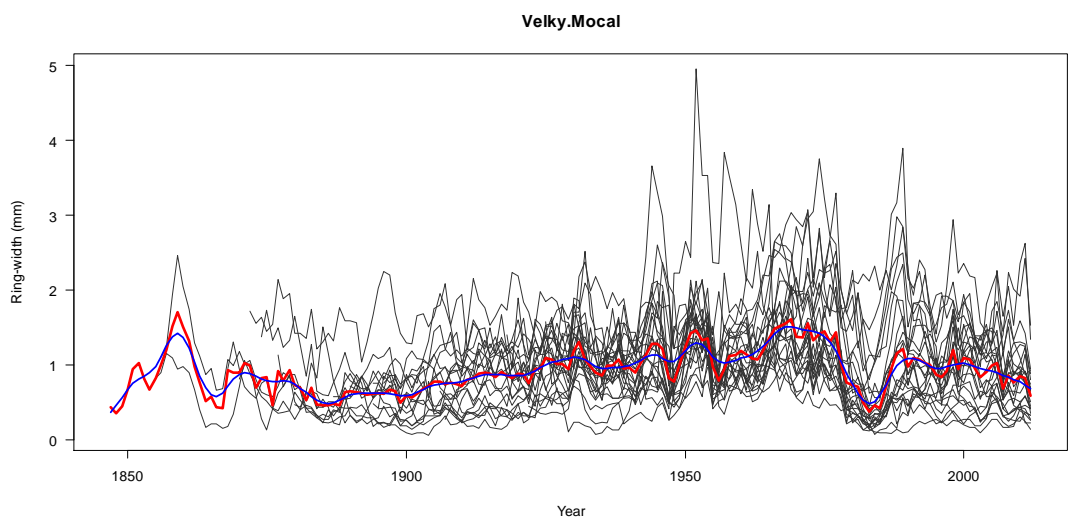




**Graf 5: V rezervaci:** letokruh. chronologie jednotlivých stromů a průměrná hodnota (červeně).



**Graf 6: Velká Kleč:** letokruh. chronologie jednotlivých stromů a průměrná hodnota (červeně).

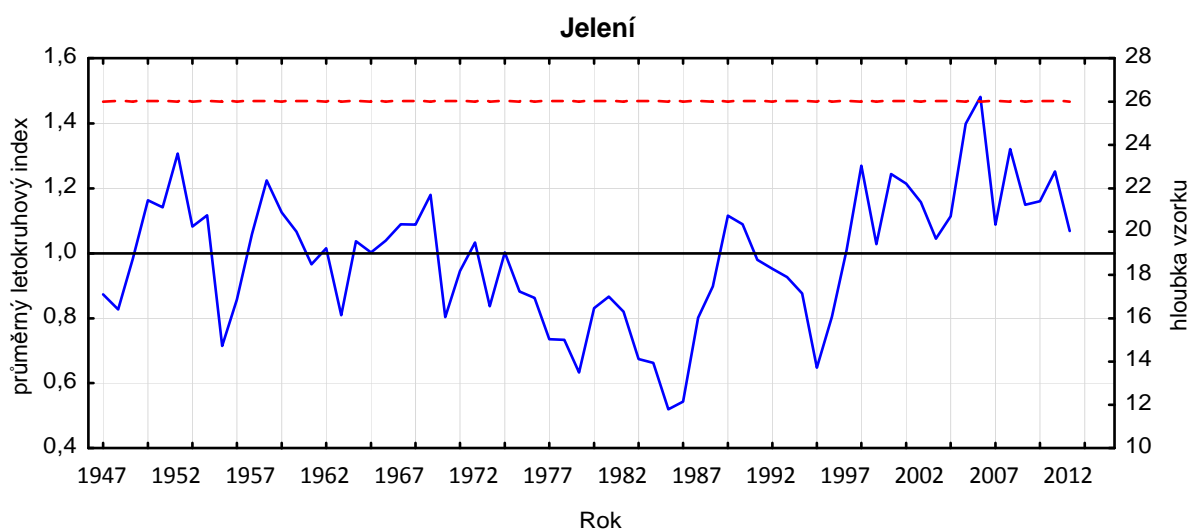


**Graf 7: Velký Močál:** letokruh. chronologie jednotlivých stromů a prům. hodnota (červeně).

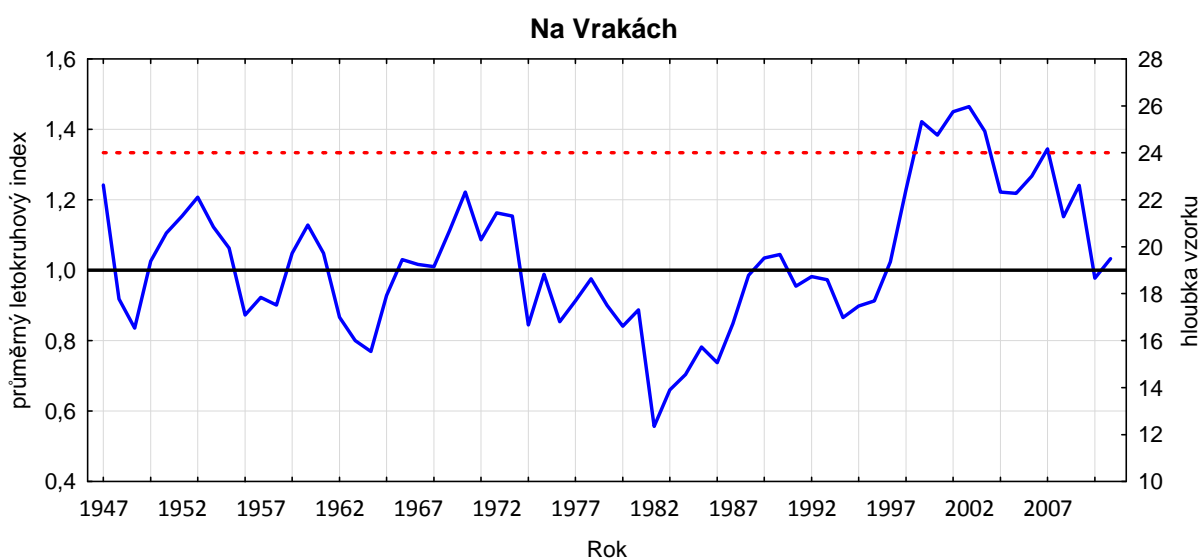
Získané údaje při datování byly rovněž ověřeny prostřednictvím programu COFECHA (Holmes 1983), který je schopen kvalitativně vyhodnotit datování jednotlivých vývrtů. Pracuje se statistickou shodou mezi segmenty každého datovaného vývrtu a jejich shodou se srovnávací letokruhovou křivkou („master chronology“), která je v tomto programu vytvořena z vložených dat (Holmes 1983, Speer 2010).

Vlastní počítačové zpracování získaných letokruhových dat bylo provedeno v knihovně dplR (Bunn 2007, 2008) a detrendeR (Campelo et al. 2012) ve statistickém prostředí „R“ (R Development Core Team 2007). Nejprve byla vytvořena průměrná letokruhová chronologie z jednotlivých letokruhových řad odebraných vývrtů každé lokality včetně grafického zobrazení těchto údajů za použití funkce knihovny detrendeR, kdy jsou v grafu zobrazeny jednotlivé letokruhové chronologie, jejich průměrná hodnota (červeně) a spline funkce (modře) s parametry  $f = 0,5$  a vlnovou délkou jako  $2/3$  délky letokruhové řady (Grafy 2-7). Získané průměrné letokruhové chronologie všech lokalit byly společně graficky zobrazeny, aby bylo možné identifikovat obdobné trendy ve vývoji absolutních hodnot radiálních přírůstků (Graf 1). Poté byla provedena standardizace dat, tedy odstranění věkového trendu z časové řady a výpočet letokruhových indexů vydělením každé naměřené hodnoty šířky letokruhu jeho očekávanou modelovou hodnotou (Fritts 1976). Pro analýzu vlivu citlivosti na meziroční dynamiku počasí byl pro standardizaci použit spline (7) s frekvencí odezvy 0,7 a vlnovou délkou 10 let, který se ukázal vhodným pro tyto typy analýz (Bošeľa et al. 2014). Pro analýzu střednědobých klimatických změn a vlivu imisí byl věkový trend odstraněn modifikovanou negativní exponenciální funkcí (10), která zachovává střednědobou variabilitu (Cook and Kairiukstis 1990). Pro výpočet průměrné časové řady letokruhových indexů byl použit Tukeyův robustní průměr „Tukey’s biweight robust mean“ (Mosteller and Tukey 1977), vzhledem k tomu, že lze očekávat určitou

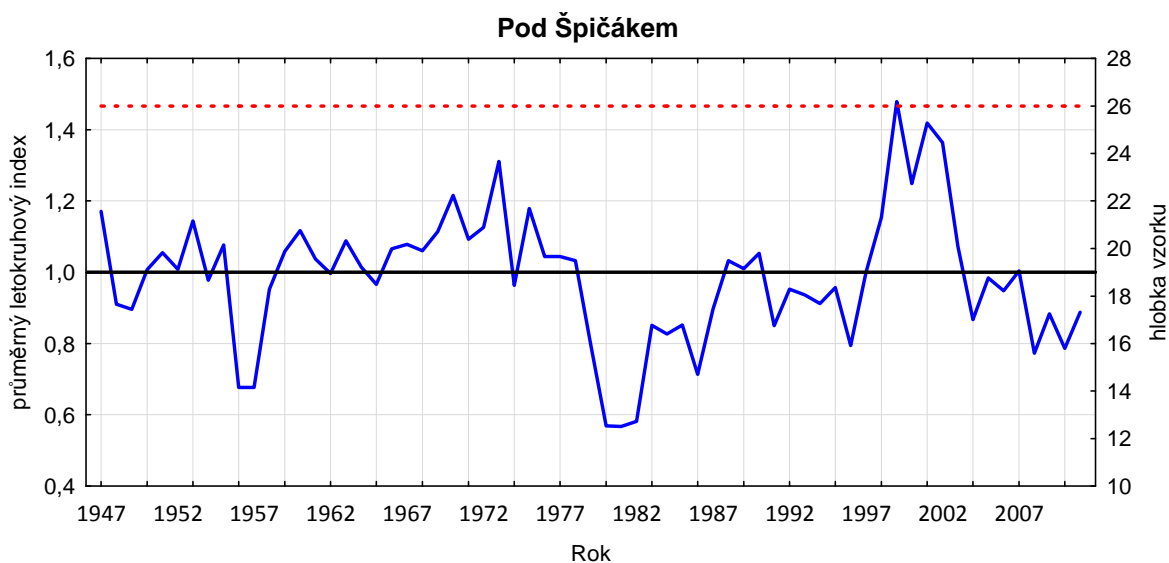
kontaminaci dat vlivem endogenního narušení a jinými zdroji „šumu“, které mají dlouhodobý charakter a nemají normální rozdělení – jsou tedy náhodnými vlivy v prostoru a čase. V tomto případě má robustní průměr menší rozptyl a je účinnějším odhadem společného signálu pro soubory dat. Vývoj průměrných letokruhových indexů v detailu let 1947-2011 se standardizací modifikovanou negativní exponenciální funkcí (10) byl graficky zobrazen pro jednotlivé lokality včetně hloubky vzorku (Graf 8-13).



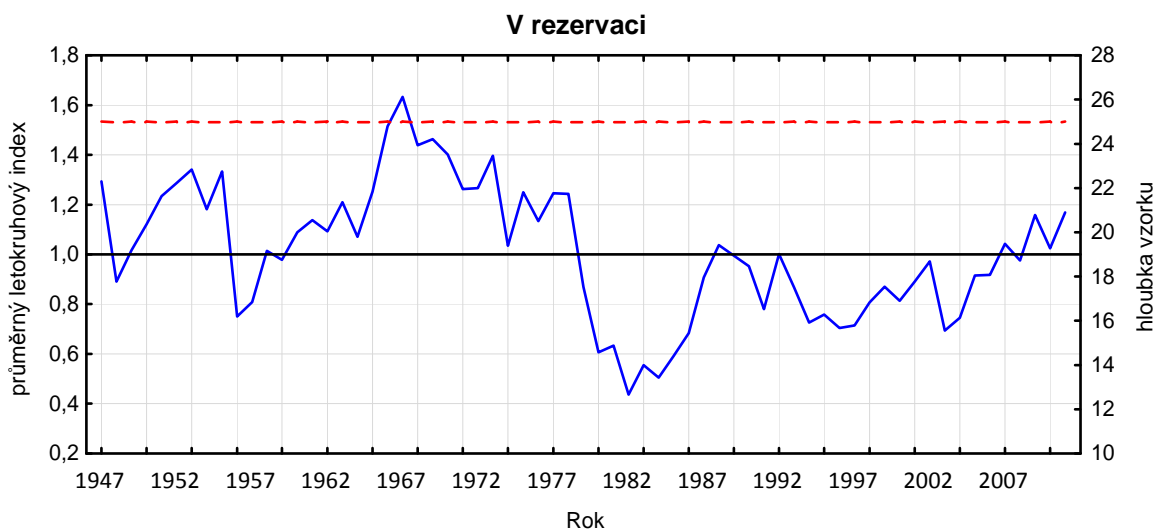
**Graf 8: Jelení:** vývoj průměrných letokruhových indexů v detailu období 1947-2011.



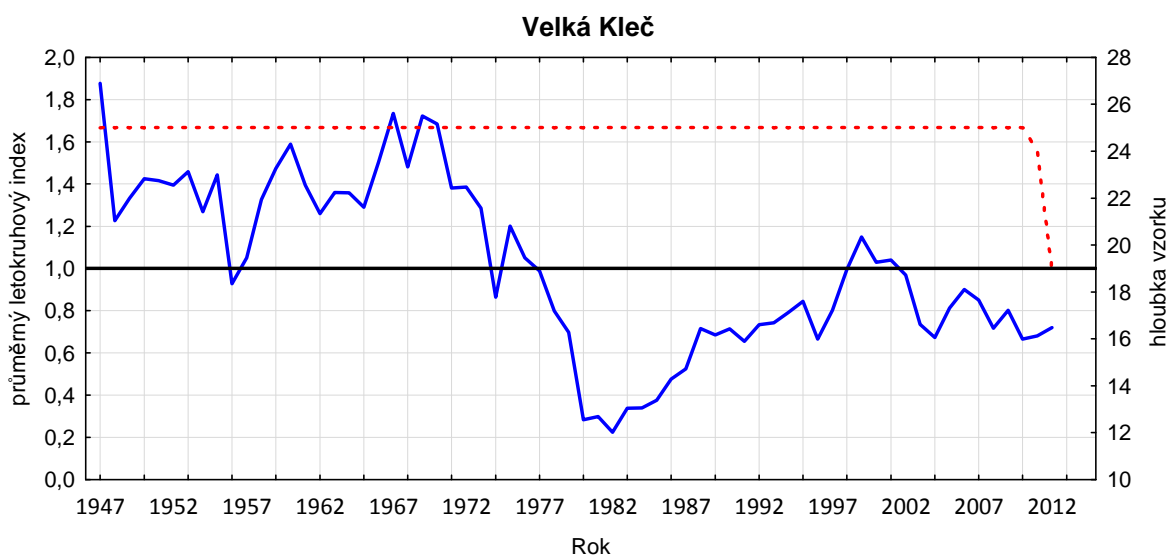
**Graf 9: Na Vrakách:** vývoj průměrných letokruhových indexů v detailu období 1947-2011.



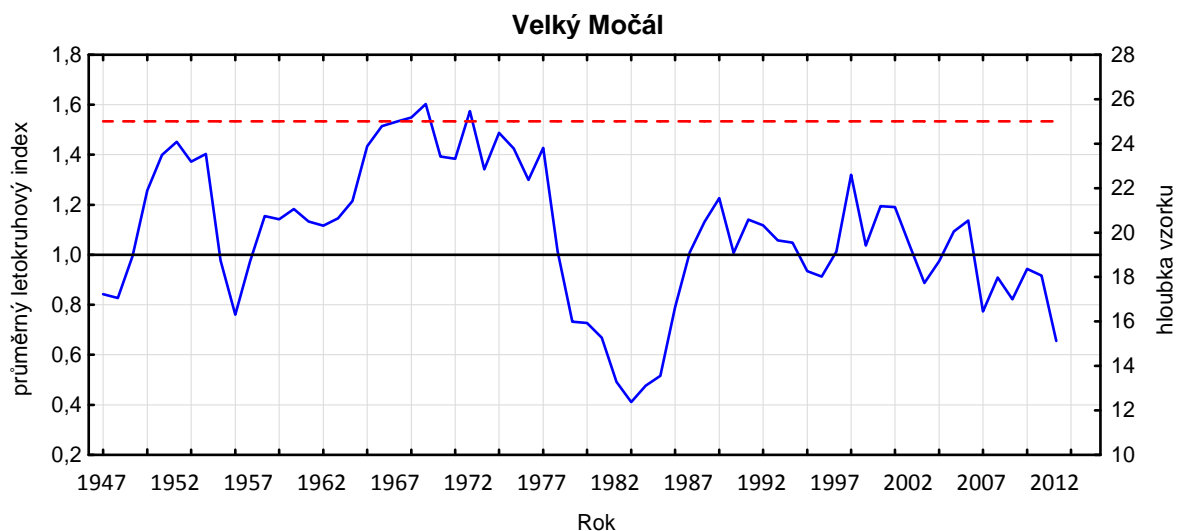
**Graf 10: Pod Špičákem:** vývoj průměrných letokruhových indexů v detailu období 1947-2011.



**Graf 11: V rezervaci:** vývoj průměrných letokruhových indexů v detailu období 1947-2011.



**Graf 12: Velká Kleč:** vývoj průměrných letokruhových indexů v detailu období 1947-2011.



**Graf 13: Velký Močál:** vývoj průměrných letokruhových indexů

Pro každou průměrnou řadu letokruhových indexů byla vypočítána pro období hodnocené v dendroklimatologické analýze (1947-2011) průměrná korelace mezi jednotlivými letokruhovými sériemi (stromy) -  $\bar{r}$  a „Expressed Population Signal“ (EPS), pomocí kterých lze určit sílu signálu v letokruhové sérii (Tab.4). Hodnota EPS je ovlivněna hodnotou  $\bar{r}$  a s rostoucím počtem odebraných vývrtů se asymptoticky blíží hodnotě 1 (dříve pro chronologie s vysokou hodnotou  $\bar{r}$ ). Tedy pro dosažení nějaké předem stanovené hodnoty EPS je pro vysoké  $\bar{r}$  třeba odebrat mnohem méně vývrtů než pro lokality s nízkou korelací mezi letokruhovými sériemi (Briffa 1984; Wigley et. al 1984 in Cook and Kairiukstis 1990).

### Klimatická data

Pro realizaci dendroklimatologické studie je rozhodující blízkost klimatických stanic a dostupnost relevantních klimatických dat v delší časové řadě. Proto byla pro vyhodnocení vlivu klimatických faktorů na radiální přírůst zvolena data nejbližší meteorologické stanice Fichtelberg v Německu, Spolková země Sasko (Deutscher Wetterdienst 2014), 1213 m n.m., N 50°25', E 12°57'. Tato meteorologická stanice je vzdálena od výzkumných lokalit v oblasti NPR Božídarské rašeliniště 4-6 km a od

výzkumných lokalit v NPR Rolavská vrchoviště 19-20 km. Měření je prováděno kontinuálně od roku 1947 a pro dendroklimatologickou analýzu byla využita tato kompletní řada měsíčních průměrných teplot a srážkových úhrnů.

### Imisní data

Pro tuto část studie byla hledána data pokrývající co možná nejdelší časový úsek z nejbližšího okolí výzkumných lokalit. Nejdelší řada měření atmosférických koncentrací SO<sub>2</sub> je k dispozici opět z horské stanice Fichtelberg v Německu, Spolková země Sasko, 1213 m n.m., N 50°25', E 12°57'. Na této stanici jsou data měřena od roku 1973 (Sächsisches Landesamt für Umwelt 2014). Volbu této měřicí stanice podporuje i převládající směr větru ze Z a SZ (Deutscher Wetterdienst 2014), což indikuje, že lokality mohou být především ovlivněny emitenty v Německu.

Nejbližší stanice pro měření atmosférických koncentrací NO a NO<sub>2</sub> se nachází v Annaberg-Buchholz, příměstské stanici v Německu, Spolková země Sasko, ve vzdálenosti 22 km od výzkumných lokalit v NPR Božídarské rašeliniště a 32 km od lokalit v NPR Rolavská vrchoviště. K dispozici je měření až od roku 1995 (Sächsisches Landesamt für Umwelt 2014). Z těchto důvodů nebyla data v analýze využita.

### Statistická analýza vlivu klimatu a imisí

Nejprve byl vyhodnocen pomocí jednoduché lineární regrese vývoj průměrných měsíčních teplot, srážek a imisí v celé délce časové řady, která byla k dispozici. Dále byly podrobněji analyzovány změny trendu v jednotlivých časových úsecích řady. Regresní koeficienty, základních statistiky dat byly vypočteny a grafy vytvořeny v programu Statistica 12 (StatSoft 2013).

Pro volbu způsobu analýzy dendroklimatických dat bylo nejprve nutné ověřit multikolinearitu klimatických proměnných. Ve vlastní regresi se zpravidla předpokládá,

že regresní matice  $X$  má lineárně nezávislé sloupce. V případě, že jsou tyto sloupce v nějakém smyslu téměř lineárně závislé, postup regresní analýzou by mohl vést k statisticky nepřesné interpretaci výsledků. V dendroklimatologické analýze v obdobných klimatických podmínkách se předpokládá možnost ovlivnění růstu klimatickými proměnnými od června předchozího roku do září roku současného, jedná se tedy celkem o 36 nezávislých proměnných průměrných měsíčních teplot a srážek. Pomocí inflačního faktoru VIF („Variance Inflation Factor“) výpočtem v knihovně car (Fox and Weisberg 2014) ve statistickém prostředí R (R Development Core Team 2007) bylo zjištěno překročení kritické hodnoty  $VIF > 10$  u několika proměnných, což indikuje „přeurčenost“ (nadbytečný počet nezávislých proměnných) takového modelu (Zvára 2008b).

Pro analýzu citlivosti radiálního přírůstu na meziroční dynamiku počasí a časových změn v trendu odezvy na klimatické změny byla tedy využita knihovna bootRes (Zang and Biondi 2013) ve statistickém prostředí R, vytvořená speciálně pro dendroklimatologické analýzy, která počítá korelace i response funkce výběrem hlavních komponent prediktorů a pro výpočet statistické významnosti a intervalů spolehlivosti využívá metodou „bootstrapping“ (Efron and Tibshirani 1986; Guiot 1991). Ta je jednou z tzv. resamplingových procedur, tedy „předvýběrů“ z již vybraného výběrového souboru jako náhodných výběrů s opakováním a umožňuje se vyrovnat s problémem vzájemné korelace klimatických dat, tedy multikolinearitou (Cropper 1984).

Pomocí funkcí této knihovny byly vypočteny koeficienty response funkce a korelační koeficienty (Pearsonův korelační koeficient) včetně intervalů spolehlivosti a grafického zobrazení výsledků od období 1948 do konce letokruhové série (první rok klimatických dat 1947 je ve výpočtu využit pro hodnocení vlivu roku předcházejícího

na růst v roce hodnoceném, tj. 1948). Jako vstupní prediktory (nezávislé proměnné) byly použity průměrné měsíční teploty („Temp“) a srážkové úhrny („Prec“) od června roku předcházejícího („prev“) do září roku současného („curr“). Pro analýzu stability vztahu klima-růst byly v této knihovně dále vypočítány 20-leté klouzavé korelace (Pearsonův korelační koeficient) (Bošeľa et al. 2014; Tardif et al. 2003; Wilson and Elling 2004) s intervaly spolehlivosti pro jednotlivé měsíce vegetačního období (duben-září) aktuálního roku a výsledky graficky znázorněny grafikou knihovny bootRes.

V tabelárním přehledu výsledků koeficientů (Tab.5, Tab.6) jsou pro přehlednost uvedeny pouze měsíce, ve kterých se alespoň na jedné lokalitě vyskytla statisticky významná hodnota koeficientu ( $p \leq 0.05$ ), která je zároveň zvýrazněna tučně. Je označeno, zda se jedná o koeficient průměrné měsíční teploty („Temp“) nebo měsíčního úhrnu srážek („Prec“), údaj předcházejícího roku („prev“) nebo roku aktuálního („curr“) a měsíce jsou označeny zkráceným anglickým názvem. V grafech koeficientů response a korelace (Graf 16-21) jsou zobrazeny 95% intervaly spolehlivosti (svislé linie) a hodnota koeficientů pro průměrné měsíční teploty („Temp“) a měsíční úhrn srážek („Prec“) od června roku předcházejícího do září roku současného, hodnoty statisticky významné ( $p \leq 0.05$ ) jsou zvýrazněny. Příslušný měsíc je označen počátečním písmenem jeho anglického názvu, přičemž v případě údaje předcházejícího roku malým písmenem a měsíc roku aktuálního velkým písmenem. V grafickém znázornění 20-letých klouzavých korelací jsou zobrazeny na ose  $x$  jednotlivé 20-leté časové úseky a na ose  $y$  koeficienty průměrných měsíčních teplot („Temp“) a měsíční úhrn srážek („Prec“) pro jednotlivé měsíce vegetačního období (duben-září) aktuálního roku.

Pro analýzu kombinovaného vztahu radiální přírůst-imise-klimatické změny bylo zvoleno období od roku 1980, kdy dochází k výrazné regeneraci radiálních přírůstů. Rok 1980 je počátkem delšího období, ve kterém dochází ke zvratu v trendu



průměrných teplot - po chladném období přibližně mezi lety 1962-1980, kdy průměrné teploty naopak klesaly, dochází k jejich opětovnému kontinuálnímu nárůstu. Zároveň je toto období charakterizováno značným dlouhodobým poklesem atmosférických koncentrací SO<sub>2</sub>. Pro zachycení společného vlivu těchto dvou výrazných trendů proto nebyly do této analýzy zahrnuty údaje chladného období 1973-1979, kdy teploty oscilovaly kolem nejnižších hodnot a neměly žádný trend. Pro společnou analýzu těchto vlivů byla využita mnohonásobná lineární regrese (Hauck et al. 2012). K výpočtu  $\beta$ -koeficientů regresní funkce byly využity jako nezávislé proměnné roční atmosférické koncentrace SO<sub>2</sub> („atm.SO2“), průměrné roční teploty („Temp“) a roční úhrn srážek („Prec“) v jednotlivých letech období 1980-2011. Rovněž byly vypočteny a stejně označeny korelační koeficienty pro kvantifikaci závislosti radiálních přírůstu na těchto proměnných (Tab.7).

#### Statistická analýza vlivu odvodnění

Analýza vlivu odvodnění byla provedena porovnáním lokality ovlivněné „Na Vrakách“ a lokality neovlivněné „Pod Špičákem“, která se nachází ve vzdálenosti 1 km. Lokalita „Na Vrakách“ byla antropologicky ovlivněna zásahem do vodního režimu stanoviště, kdy v roce 1992 byly vybudovány nové a prohloubeny staré odvodňovací příkopy.

Standardizace ve studii vlivu odvodnění na růst byla provedena metodou deterministickou, která je vhodná pro úplné letokruhové řady, kdy je očekávaná hodnota šířky letokruhu vypočtena za použití vhodné přírůstové funkce (Drápela and Zach 1995). Očekávané hodnoty pro analýzu vlivu odvodnění lokality na tloušťkový přírůst byly vypočítány pomocí Korfovy přírůstové funkce (4) (Korf 1939).

Pro testování hypotézy o rovnosti středních hodnot indexů letokruhových přírůstů byl použit dvouvýběrový nezávislý t-test, vzhledem k tomu, že byly porovnávány dvě

lokality. Za účelem odstranění možných krátkodobých výchylek trendu časové řady byly využity 5-leté a 10-leté klouzavé průměry. Tyto průměry pomohou zvýraznit případný dlouhodobý trend řady letokruhových indexů. Statistická analýza dat byla provedena v programu Statistica 12 (StatSoft 2013).

## 5 Výsledky

### 5.1 Trendy teplot, srážek a atmosférických koncentrací SO<sub>2</sub>

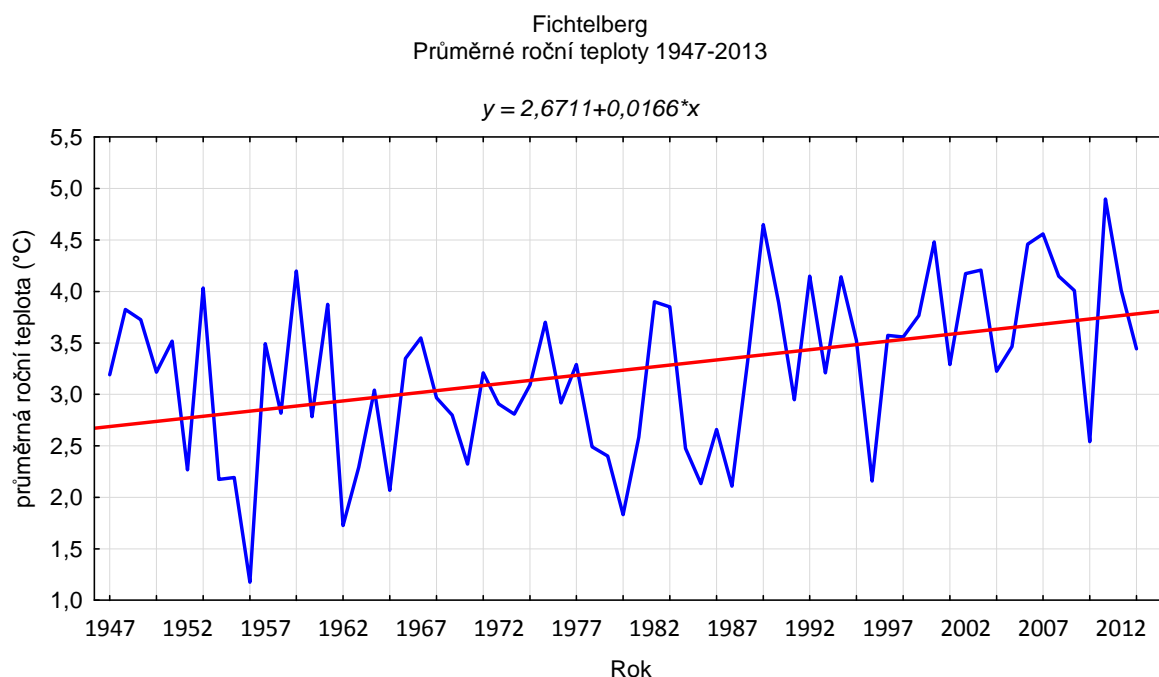
Výsledky regresní analýzy trendů měsíčních a ročních teplot měřených v kontinuální řadě od roku 1947 na meteorologické stanici Fichtelberg (Německo – Sasko), 1213 m n.m., N 50°25', E 12°57' (Deutscher Wetterdienst 2014), ukazují nárůst průměrné roční teploty o 1,1 °C (Tabulka 2, Graf 13). Nejvyšší a statisticky významné nárůsty průměrných měsíčních teplot byly zaznamenány pro měsíce květen (1,8°C), červenec (1,6°C) a srpen (1,73°C).

**Tab.2:** Trendy vývoje měsíčních a ročních teplot za období 1947-2013 z meteorologické stanice Fichtelberg. Měsíce (roční hodnota) se statisticky významnou hodnotou  $p \leq 0.05$  jsou zvýrazněny tučně.

Průměrné teploty (°C)							
1947-2013	průměr	směrodatná odchylka	absolutní člen	sklon	R <sup>2</sup>	p	změna za období
<i>leden</i>	-4.8	2.3	-5.6	0.024	0.04	0.1019	1.62
<i>únor</i>	-4.7	2.9	-5.5	0.022	0.02	0.2220	1.51
<i>březen</i>	-2.1	2.3	-2.6	0.014	0.02	0.3193	0.96
<i>duben</i>	2.0	2.0	1.2	0.022	0.05	0.0796	1.45
<b><i>květen</i></b>	<b>6.8</b>	<b>1.7</b>	<b>5.9</b>	<b>0.027</b>	<b>0.10</b>	<b>0.0098</b>	<b>1.80</b>
<i>červen</i>	9.9	1.5	9.5	0.010	0.02	0.2753	0.68
<b><i>červenec</i></b>	<b>11.7</b>	<b>1.8</b>	<b>10.9</b>	<b>0.024</b>	<b>0.06</b>	<b>0.0382</b>	<b>1.60</b>
<b><i>srpen</i></b>	<b>11.6</b>	<b>1.4</b>	<b>10.8</b>	<b>0.026</b>	<b>0.14</b>	<b>0.0022</b>	<b>1.73</b>
<i>září</i>	8.3	1.8	8.5	-0.006	0.00	0.6062	-0.40
<i>říjen</i>	4.3	1.9	4.1	0.004	0.00	0.7126	0.30
<i>listopad</i>	-0.5	1.8	-1.2	0.021	0.05	0.0681	1.38
<i>prosinec</i>	-3.5	1.9	-3.9	0.011	0.01	0.3801	0.72
<b><i>roční průměrná teplota</i></b>	<b>3.2</b>	<b>0.8</b>	<b>2.7</b>	<b>0.017</b>	<b>0.16</b>	<b>0.0007</b>	<b>1.11</b>

Trend nárůstu průměrných teplot však nebyl v tomto období zdaleka plynulý. Od počátku měření v roce 1947 až do roku 1980 průměrné teploty naopak poklesly (o 0,5°C), přičemž se významně snížily průměrné měsíční teploty v dubnu (-3,0°C). Kolem nejnižších hodnot oscilovaly průměrné teploty v období 1970-1980. Od konce tohoto období do roku 2013 průměrné teploty zaznamenaly statisticky výrazný nárůst

průměrných ročních hodnot o 1,1°C i měsíčních průměrných hodnot v dubnu (3,1°C) a červnu (2,4°C).

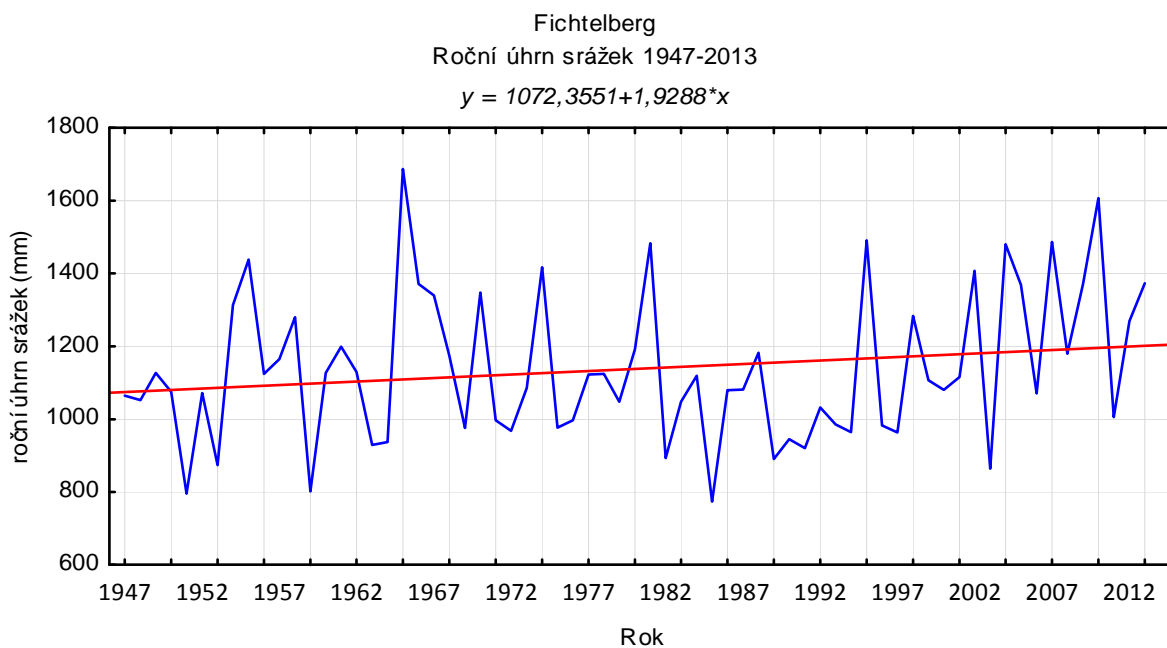


**Graf 13:** Vývoj průměrných ročních teplot v období 1947-2013, meteorologická stanice Fichtelberg.

**Tab.3:** Trendy vývoje měsíčních a ročních srážkových úhrnů za období 1947-2013 z meteorologické stanice Fichtelberg. Měsíce (roční hodnota) se statisticky významnou hodnotou  $p \leq 0.05$  jsou zvýrazněny tučně.

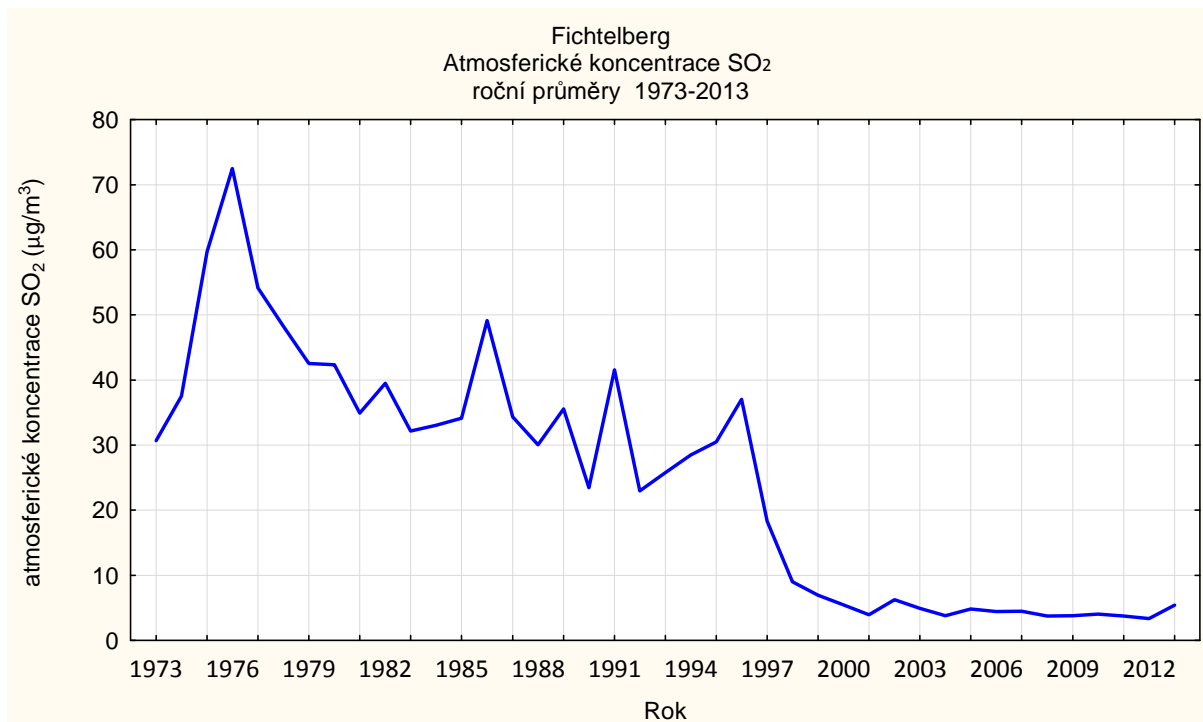
<b>Průměrný úhrn srážek (mm)</b>							
<b>1947-2013</b>	<i>průměr</i>	<i>směrodatná odchyłka</i>	<i>absolutní člen</i>	<i>sklon</i>	<i>R<sup>2</sup></i>	<i>p</i>	<i>změna za období</i>
<i>leden</i>	94	45	89	0.167	0.01	0.5591	11
<i>únor</i>	86	48	92	-0.165	0.00	0.5878	-11
<i>březen</i>	89	45	86	0.110	0.00	0.7034	7
<i>duben</i>	80	39	94	-0.419	0.04	0.0914	-28
<i>květen</i>	96	43	96	-0.017	0.00	0.9502	-1
<i>červen</i>	106	39	101	0.164	0.01	0.5128	11
<i>červenec</i>	126	68	130	-0.142	0.00	0.7454	-9
<b><i>srpen</i></b>	<b>105</b>	<b>52</b>	<b>81</b>	<b>0.684</b>	<b>0.07</b>	<b>0.0371</b>	<b>46</b>
<i>září</i>	88	47	70	0.525	0.05	0.0760	35
<i>říjen</i>	74	43	67	0.215	0.01	0.4329	14
<i>listopad</i>	91	47	76	0.462	0.04	0.1178	31
<i>prosinec</i>	103	52	91	0.345	0.02	0.3000	23
<i>roční úhrn srážek</i>	1138	205	1072	1.929	0.03	0.1366	129

Roční úhrn srážek za sledované období rovněž mírně narostl (o 129 mm), tato změna však nebyla hodnocena jako statisticky významná (Tabulka 3, Graf 14). Měsíční rozložení srážek nezaznamenalo statisticky významných změn, s výjimkou měsíce srpna, kdy došlo k nárůstu o 46 mm. Co se týče dynamiky nárůstu ročních srážkových úhrnů, mírný nárůst průměrných srážek lze zaznamenat i v periodě s postupným ochlazováním 1947-1980 (o 61 mm). Avšak, ke zvyšování ročních srážkových úhrnů dochází zejména po roce 1980 současně s nárůstem teplot, kdy za období 1981-2013 se průměrný roční úhrn srážek zvýšil o 336 mm, se statisticky významným růstem průměrných srážkových úhrnů měsíce května (o 51 mm).



**Graf 14:** Vývoj průměrných ročních srážkových úhrnů v období 1947-2013, meteorologická stanice Fichtelberg.

Atmosférické koncentrace  $\text{SO}_2$  (Graf 15) zaznamenaly od počátku měření v roce 1973 prudký nárůst na maximální hodnotu ročního průměru v roce 1976 ve výši  $72 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Poté nastal určitý pokles, ale hodnoty koncentrací nad  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  přetrvávaly až do roku 1996. V posledních 15 letech již setrvávají na stabilně nízké úrovni, aktuálně s hodnotami ročních průměrů pod  $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .



**Graf 15:** Vývoj atmosférických koncentrací SO<sub>2</sub> v období 1973-2013, měřicí stanice Fichtelberg.

## 5.2 Odezva radiálního přírůstu na změny klimatu

Ve vývoji časové řady průměrných letokruhů jednotlivých lokalit (Graf 1) lze zaznamenat odlišnosti průběhu radiálních přírůstů zejména před rokem 1910, kdy je její kvalita ovlivněna sníženým počtem vzorků, v celé délce pak i odlišnou věkovou strukturou s rozdílnou variabilitou. Jeden společný trend je však patrný v období 1970-1980, kdy dochází k výraznému poklesu radiálních přírůstů na minima v průběhu celé letokruhové série a následuje prudký vzestup přibližně od roku 1982. Tento trend se plně neprojevil na lokalitě Jelení, která je porostem s nejnižším průměrným věkem.

Na základě porovnání síly signálu v letokruhové sérii dle hodnot průměrné korelace mezi jednotlivými letokruhovými sériemi (stromy) -  $\bar{r}$  a EPS (Tab.4), byly zjištěny rozdílné charakteristiky lokalit. Z vysokých hodnot  $\bar{r}$  lze usuzovat na volný zápoj porostu, minimální konkurenci mezi stromy a rovněž nevýznamný vliv disturbancí, které by změnily konkurenční poměry mezi stromy. Porost mohl vzniknout na volné

ploše, nebyl zřejmě při svém vývoji stíněn mateřským porostem. Takové porosty mají většinou výborné statistické vlastnosti pro dendroklimatologické studie. V případě této studie takové vlastnosti mají lokality Velká Kleč, V rezervaci a Velký Močál. Naopak, nízké hodnoty  $\bar{r}$  indikují, že společný signál může být částečně narušen konkurenčními vlivy mezi stromy v zapojeném porostu, kdy disturbance nebo těžební zásahy změnilly přístup stromů ke světlu. Porost mohl postupně vznikat z podrostu, zastíněn mateřským porostem. Radiální přírůsty na takových stanovištích vykazují četné fluktuace a společný růstový trend byl narušován změnou konkurenčních poměrů na stanovišti. Takové vlivy pravděpodobně působily nejvíce na lokalitě Na Vrakách, částečně i Pod Špičákem a Jelení. EPS je pak přímým důsledkem hodnoty  $\bar{r}$ , vzhledem k minimálním rozdílům v počtu hodnocených vývrtů v jednotlivých lokalitách (24-26 vývrtů).

**Tab. 4:** Síla signálu v letokruhové sérii (1947-2011):  $rbar$  ( $\bar{r}$ ) - průměrná korelace mezi letokruhovými sériemi jednotlivých stromů lokality a hodnota EPS (Cook and Kairiukstis 1990).

	<i>Jelení</i>	<i>Na Vrakách</i>	<i>Pod Špičákem</i>	<i>V rezervaci</i>	<i>Velká Kleč</i>	<i>Velký Močál</i>
<i>rbar</i>	0.255	0.161	0.204	0.329	0.498	0.322
<i>EPS</i>	0.899	0.821	0.855	0.924	0.961	0.922

Ve studii citlivosti smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) na meziroční dynamiku počasí od roku 1947 (Tab. 5), kdy je k dispozici kontinuální časová řada průměrných měsíčních teplot a srážek, se ukázaly v případě 4 lokalit (Na Vrakách, Pod Špičákem, V rezervaci a Velká Kleč) statisticky nevýznamnými všechny vypočtené koeficienty response funkce vztahu klimatických proměnných a průměrných letokruhových indexů. Pro lokalitu Jelení byl nalezen jediný statisticky významný koeficient – teploty v únoru. V případě lokality Velká Kleč byla statisticky významným negativním vlivem výše srážek v únoru. Výsledky tak ukazují na všeobecně nízkou citlivost těchto lokalit na meziroční změny počasí.

V analýze korelační funkcí rovněž nebyl nalezen žádný společný trend. Jednotlivě byla zjištěna statisticky významná kladná závislost mezi průměrnými letokruhovými indexy a teplotami v říjnu předchozího roku (V rezervaci), v únoru (Jelení), v březnu (Na Vrakách) a v květnu (Velká Kleč). Negativně ovlivnily radiální přírůst teploty v září předchozího roku (Na Vrakách) a listopadu předchozího roku (Velký Močál). Srážky v listopadu předchozího roku měly negativní vliv na lokalitu Velká Kleč, v únoru aktuálního roku na lokalitu Velký Močál. Naopak srážky v březnu pozitivně ovlivnily lokalitu V rezervaci.

**Tab. 5:** Koeficienty response a korelační funkce odezvy radiálního přírůstu na meziroční dynamiku měsíčních průměrných teplot a srážek pro jednotlivé lokality. Uvedeny jsou pouze měsíce, ve kterých se alespoň na jedné lokalitě vyskytla statisticky významnou hodnota ( $p \leq 0.05$ ), která je zároveň zvýrazněna tučně.

	<i>Jelení</i>	<i>Na Vrakách</i>	<i>Pod Špičákem</i>	<i>V rezervaci</i>	<i>Velká Kleč</i>	<i>Velký Močál</i>
<b>Response funkce</b>						
Temp.curr.feb	<b>0.305</b>	0.009	0.070	0.149	0.003	0.234
Prec.curr.feb	-0.205	0.080	0.057	0.043	0.018	<b>-0.269</b>
<b>Korelační funkce</b>						
Temp.prev.sep	0.058	<b>-0.241</b>	-0.141	-0.218	-0.047	-0.093
Temp.prev.oct	-0.083	0.032	0.127	<b>0.284</b>	0.185	-0.050
Temp.prev.nov	-0.177	-0.047	0.051	-0.001	0.109	<b>-0.255</b>
Temp.curr.feb	<b>0.365</b>	0.149	0.058	0.221	0.078	0.267
Temp.curr.mar	0.037	<b>0.243</b>	0.037	-0.064	-0.018	0.030
Temp.curr.may	0.055	0.112	0.132	0.129	<b>0.258</b>	-0.053
Prec.prev.nov	0.101	-0.039	-0.143	-0.090	<b>-0.217</b>	0.066
Prec.curr.feb	-0.175	0.075	0.049	0.077	-0.007	<b>-0.247</b>
Prec.curr.mar	0.081	0.056	-0.017	<b>0.251</b>	0.142	0.162
Prec.curr.may	-0.144	-0.126	-0.055	-0.043	-0.066	-0.021

Vliv střednědobých změn klimatu dle výsledků response funkce (Tab. 6) se mnohem více projevil na lokalitách s vysokým  $\bar{r}$  (Tab.4) a méně ovlivněných ve svém vývoji (V rezervaci, Velký Močál, Velká Kleč). Vůbec nejvíce byla ovlivněna původní rašelinná smrčina bez zásahu na lokalitě Velký Močál, v podobě pozitivního vlivu teplot v únoru a červnových srážek aktuálního i předchozího roku. Na zvýšené srážkové úhrny v srpnu předchozího i aktuálního roku však stromy reagovaly nižším přírůstem nejen na



této lokalitě, ale i na lokalitě Velká Kleč. Lokalita V rezervaci byla pozitivně ovlivněna srážkami v červnu. Ostatní lokality nevykázaly žádnou reakci na vliv klimatických proměnných.

**Tab. 6:** Koeficienty response funkce odezvy radiálního přírůstu na střednědobý vývoj průměrných měsíčních teplot a srážek pro jednotlivé lokality. Uvedeny jsou pouze měsíce, ve kterých se alespoň na jedné lokalitě vyskytla statisticky významnou hodnota ( $p \leq 0.05$ ), která je zároveň zvýrazněna tučně.

	<i>Jelení</i>	<i>Na Vrakách</i>	<i>Pod Špičákem</i>	<i>V rezervaci</i>	<i>Velká Kleč</i>	<i>Velký Močál</i>
<b>Response funkce</b>						
Temp.curr.feb	0.200	0.042	0.124	0.108	0.109	<b>0.220</b>
Prec.prev.jun	0.097	0.083	0.071	0.185	0.162	<b>0.243</b>
Prec.prev.aug	-0.143	-0.061	-0.141	-0.173	<b>-0.234</b>	<b>-0.264</b>
Prec.curr.jun	-0.058	0.057	0.144	<b>0.243</b>	0.168	<b>0.225</b>
Prec.curr.aug	-0.142	-0.068	-0.099	-0.162	<b>-0.215</b>	<b>-0.205</b>
<b>Korelační funkce</b>						
Temp.prev.jun	<b>0.241</b>	0.211	0.061	0.081	0.052	-0.011
Temp.prev.aug	0.136	0.210	0.092	<b>-0.239</b>	<b>-0.210</b>	-0.042
Temp.curr.jan	0.196	0.154	<b>0.216</b>	-0.047	-0.025	0.044
Temp.curr.feb	<b>0.333</b>	<b>0.264</b>	<b>0.239</b>	0.092	0.088	<b>0.256</b>
Temp.curr.mar	0.119	<b>0.206</b>	0.058	-0.100	-0.137	-0.075
Temp.curr.apr	<b>0.328</b>	<b>0.223</b>	0.030	0.020	0.003	-0.092
Temp.curr.may	<b>0.262</b>	<b>0.339</b>	<b>0.236</b>	-0.077	-0.073	-0.118
Temp.curr.jun	<b>0.325</b>	<b>0.314</b>	0.093	0.096	0.080	0.061
Temp.curr.aug	0.119	<b>0.304</b>	<b>0.230</b>	-0.125	-0.172	-0.121
Prec.prev.jun	0.089	0.059	0.075	0.146	0.137	<b>0.266</b>
Prec.prev.aug	-0.151	-0.062	-0.169	-0.199	<b>-0.288</b>	<b>-0.349</b>
Prec.curr.mar	<b>0.232</b>	0.194	0.096	0.147	0.142	0.136
Prec.curr.jun	-0.068	0.047	0.135	<b>0.260</b>	0.134	0.219
Prec.curr.aug	-0.133	-0.106	-0.148	-0.165	<b>-0.230</b>	-0.216

Korelační koeficienty ze střednědobého pohledu naznačují pozitivní závislost radiálních přírůstů nejčastěji na teplotách, a to zejména na stanovištích s vybudovanými odvodňovacími příkopy (Jelení, Na Vrakách). Jedná se o pozitivní vliv teplot v červnu předchozího roku (Jelení), z aktuálního roku pak teplot v lednu (Pod Špičákem), únoru (Jelení, Na Vrakách, Velký Močál), březnu (Na Vrakách), dubnu (Jelení, Na Vrakách), v květnu (Jelení, Na Vrakách, Pod Špičákem), červnu (Jelení, Na Vrakách) a srpnu (Na

Vrakách, Pod Špičákem). Negativní vliv zvýšených teplot v srpnu předchozího roku se naopak projevilo v lokalitách V rezervaci a Velká Kleč. Bylo tak prokázáno, že stromy skutečně reagovaly na statisticky významné zvýšení teplot v květnu a srpnu, nikoliv ale v červenci a nikoliv na všech lokalitách. Zvýšené objemy srážek v srpnu neprospěly žádné lokalitě, významněji se projevily na lokalitách Velká Kleč a Velký Močál. Naopak pozitivní vliv měly srážky v červnu předchozího roku (Velký Močál) a aktuálního roku (V rezervaci), i přesto, že za celé sledované období nedošlo k jejich výrazné změně.

V následujících grafech koeficientů response a korelace jsou zobrazeny 95% intervaly spolehlivosti (svislé linie), hodnota koeficientů pro průměrné měsíční teploty („Temp“) a měsíční úhrn srážek („Prec“) od června roku předcházejícího do září roku současného; hodnoty statisticky významné ( $p \leq 0.05$ ) jsou zvýrazněny. V přidaném grafickém znázornění 20-letých klouzavých korelací jsou zobrazeny na ose x jednotlivé 20-leté časové úseky a na ose y korelační koeficienty pro jednotlivé měsíce vegetačního období (duben-září) aktuálního roku.

Lokalita **Jelení** (Graf 16) byla ovlivněna vybudováním odvodňovacích příkopů, které změnilo charakter stanoviště a současně z nízké hodnoty  $\bar{r}$  (Tab.4) lze usuzovat, že společný růstový trend byl i částečně narušován změnou konkurenčních poměrů na stanovišti. V grafu koeficientů response funkce a korelační funkce je vidět významnější reakce na změny teplot než na změny srážek. Statisticky významný byl vliv nárůstu průměrných teplot v červnu předchozího roku a únoru, dubnu, květnu a červnu roku aktuálního. Méně reaguje na změny srážek, statisticky významně se projevily srážkové úhrny v březnu. Časová změna odezvy radiálních přírůstků s využitím 20-letých klouzavých korelací nenaznačila v případě lokality Jelení žádný významný trend.

Lokalita **Na Vrakách** (Graf 17) byla rovněž ovlivněna vybudováním odvodňovacích příkopů a nejnižší hodnota  $\bar{r}$  ze všech lokalit (Tab.4) ukazuje, že porost mohl postupně vznikat z podrostu, zastíněn mateřským porostem, nebo že společný růstový signál byl častěji narušen disturbancemi nebo těžebními zásahy. Tato lokalita shodně jako lokalita Jelení mnohem více reaguje na změny teplot než na změny srážek. Statisticky významný byl vliv nárůstu průměrných teplot v únoru až červnu a v srpnu, což je v souladu s tím, že ve všech těchto měsících se průměrné hodnoty teplot ve sledovaném období zvýšily (Tab.2). Na zvýšené srážkové úhrny v měsíci srpnu však nereagovala. Časová změna odezvy radiálních přírůstů s využitím 20-letých klouzavých korelací prokázala, že v roce 1980 započal a nadále trval statisticky významný vliv květnových teplot.

Lokalita **Pod Špičákem** (Graf 18) je stanovištěm bez zásahu do jeho vodního režimu, ale z nízké hodnoty  $\bar{r}$  (Tab.4) lze usuzovat, že společný růstový trend byl částečně v průběhu vývoje porostu narušen změnou konkurenčních poměrů na stanovišti. Stejně jako lokality Jelení a Na Vrakách silněji reagovala na změny průměrných měsíčních teplot, kdy statisticky významné byly korelační koeficienty v lednu, únoru, květnu a srpnu. Změny srážkových úhrnů se nijak významně neprojevíly. Časová změna odezvy radiálních přírůstů s využitím 20-letých klouzavých korelací prokázala, že v roce 1980 započal a nadále trval statisticky významný vliv květnových teplot, zrovna tak jako na lokalitě Na Vrakách.

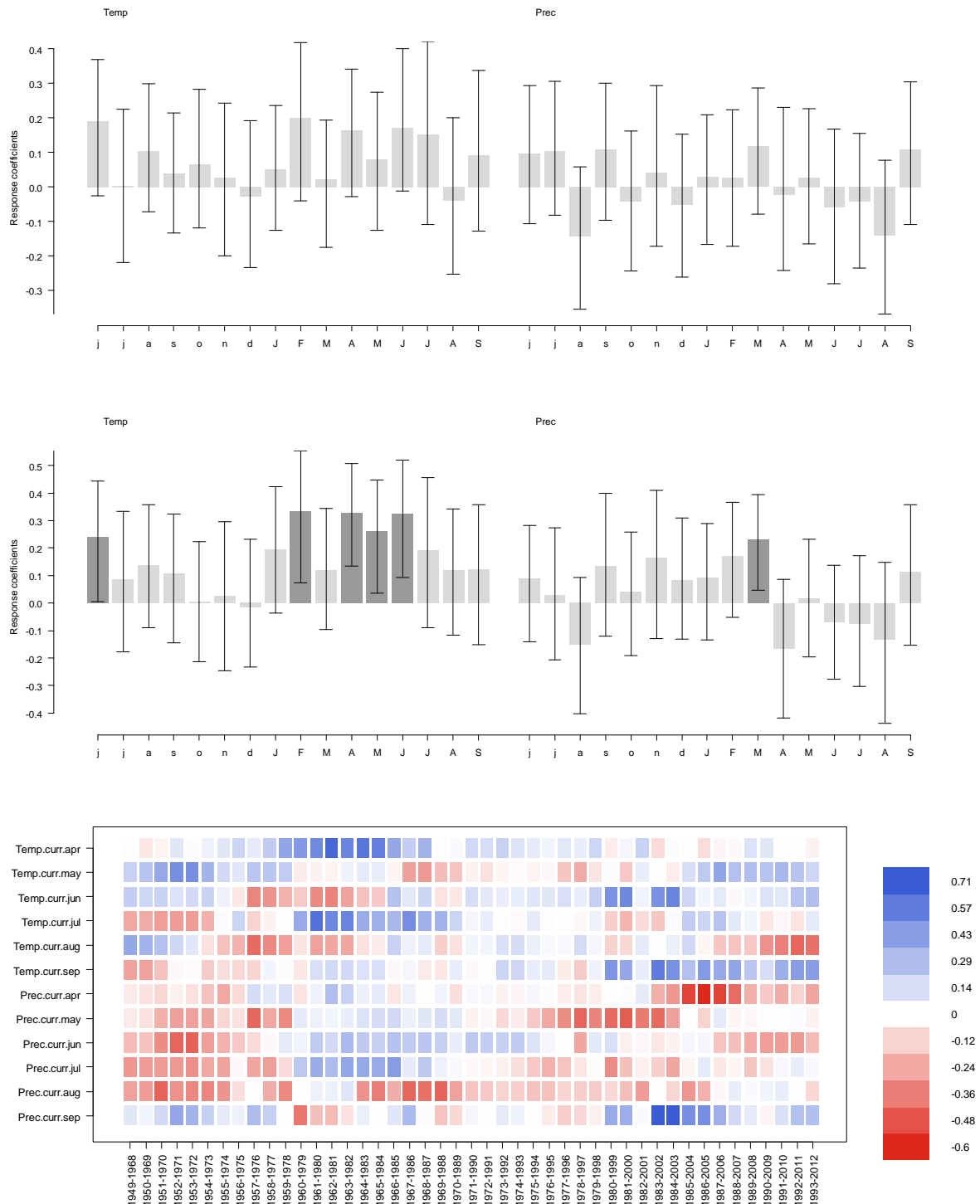
Lokalita **V rezervaci** (Graf 19) je původní rašelinnou smrčínou bez zásahu do jejího vodního režimu. Současně hodnota  $\bar{r}$  (Tab.4) indikuje volnější zápoj porostu, menší konkurenci mezi stromy a rovněž méně významný vliv disturbancí, které by změnily konkurenční poměry mezi stromy. Na rozdíl od lokalit Jelení, na Vrakách a Pod Špičákem se neprojevil v takové míře vliv zvýšení průměrných měsíčních teplot, z grafu

korelačních koeficientů je pouze zřetelná negativní reakce na zvýšení teplot v srpnu předchozího roku. Naopak pozitivní vliv měly srážky v červnu i přesto, že za celé sledované období nedošlo k jejich výrazné změně (Tab.3). Na zvýšené srážkové úhrny v měsíci srpnu však nereagovala. Vývoj koeficientů 20-letých klouzavých korelací prokázal, že na této lokalitě vymizel statisticky významný vliv červnových srážek, který trval od počátku období do roku 1985.

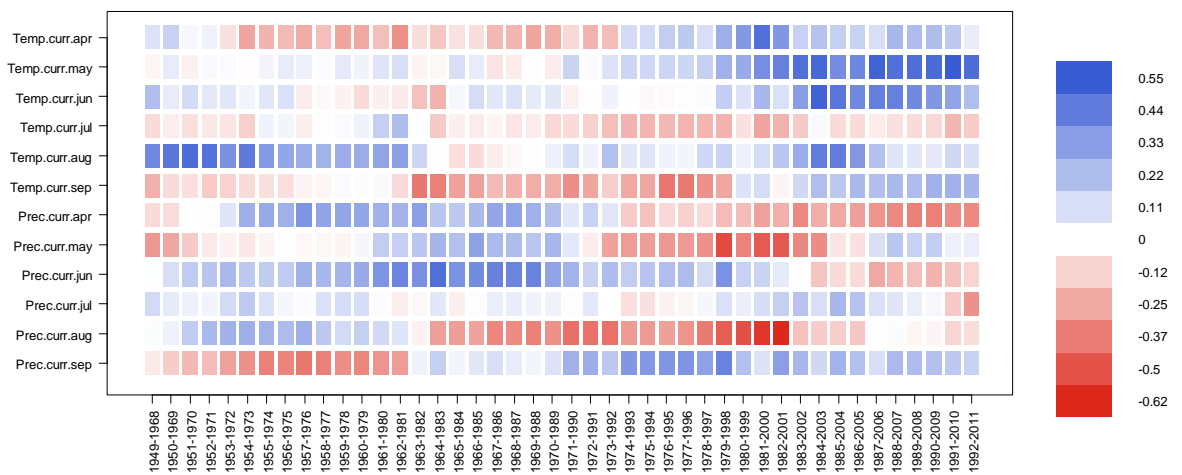
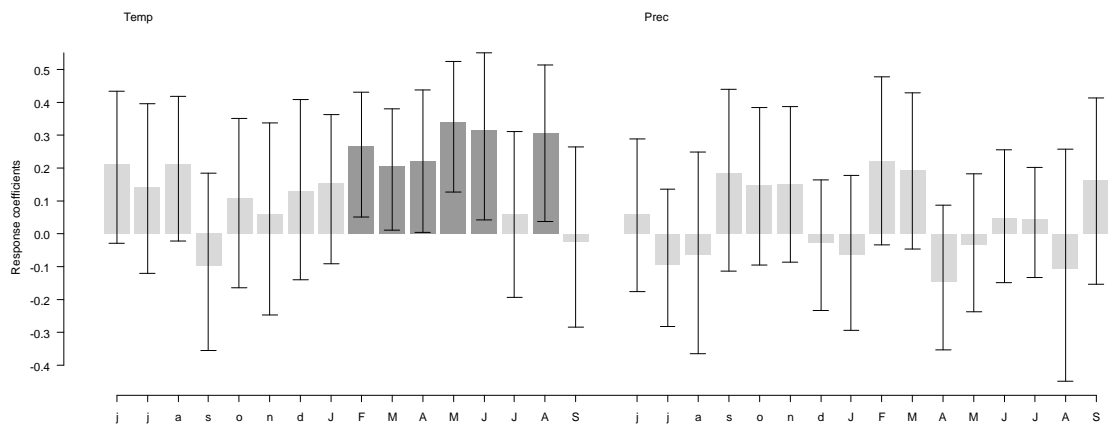
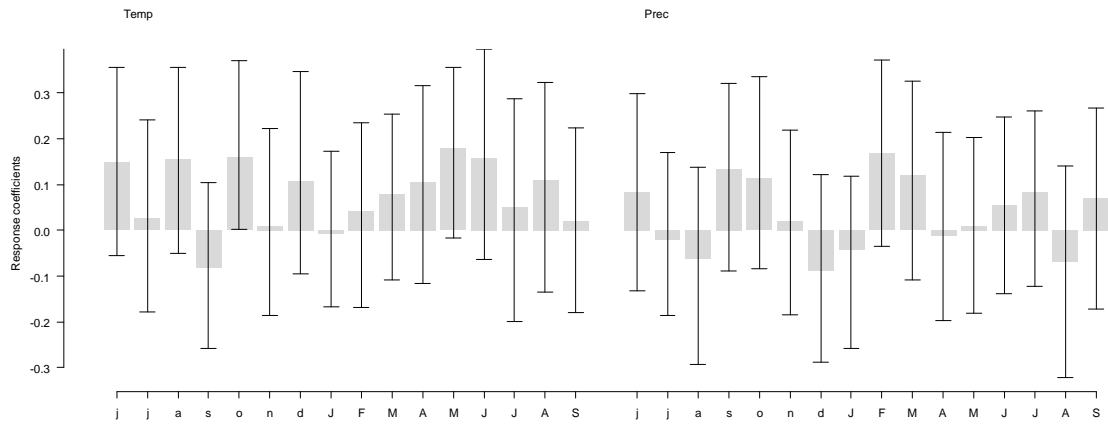
Lokalita **Velká Kleč** (Graf 20) byla ovlivněna odvodněním půdy, ale zřejmě v pozdějším věku. Hodnota  $\bar{r}$  (Tab.4) je nejvyšší ze všech lokalit, jedná se tedy o porost s volnějším zápojem, s menší konkurencí mezi stromy a bez významného vlivu disturbancí, které by změnily konkurenční poměry mezi stromy. Na rozdíl od lokalit Jelení, Na Vrakách a Pod Špičákem se neprojevil vůbec vliv zvýšení průměrných měsíčních teplot, z grafu korelačních koeficientů je pouze zřetelná negativní reakce na zvýšení teplot v srpnu předchozího roku, jako u lokality V rezervaci. Z grafu je rovněž zřetelná negativní odezva na zvýšené srážkové úhrny v měsíci srpnu, a to jak v předchozím tak i aktuálním roce. Vývoj koeficientů 20-letých klouzavých korelací prokázal, že na této lokalitě ustal statisticky významný pozitivní vliv srážek v květnu a červnu, naopak zesílil vliv květnových teplot přibližně od roku 1980.

Lokalita **Velký Močál** (Graf 21) je původní rašelinnou smrčínou bez zásahu do jeho vodního režimu obdobně jako lokalita V rezervaci. Taktéž z hodnoty  $\bar{r}$  (Tab.4) vyplývá volnější zápoj porostu, menší konkurence mezi stromy a rovněž méně významný vliv disturbancí. Zrovna tak jako na lokalitách V rezervaci a Velká Kleč se neprojevil v takové míře vliv zvýšení průměrných měsíčních teplot, s výjimkou měsíce února. Naopak je vidět, že tato lokalita reaguje nejvíce na srážky v červnu aktuálního i předchozího roku i přesto, že za celé sledované období nedošlo k jejich výrazné změně. Na zvýšené srážkové úhrny v měsíci srpnu reaguje negativně jak v případě vlivu roku

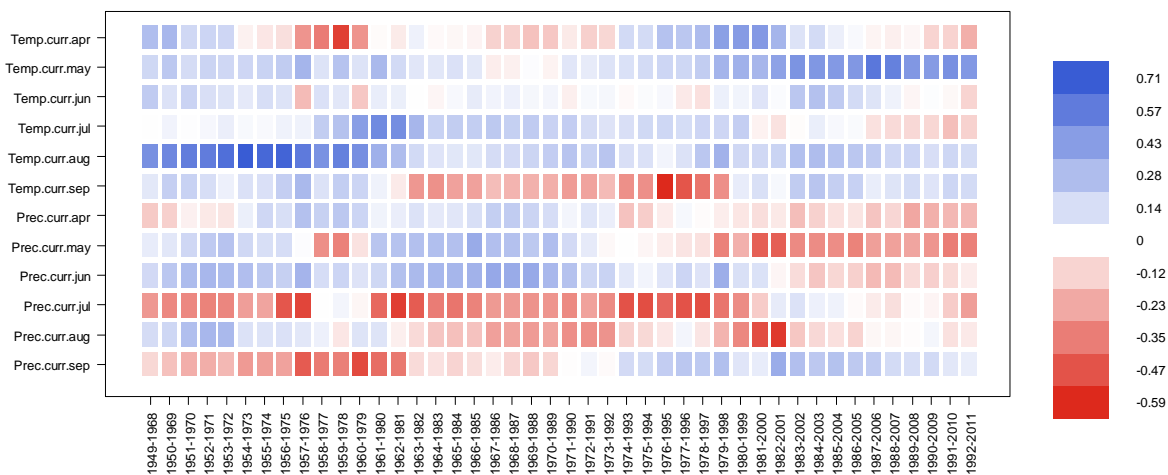
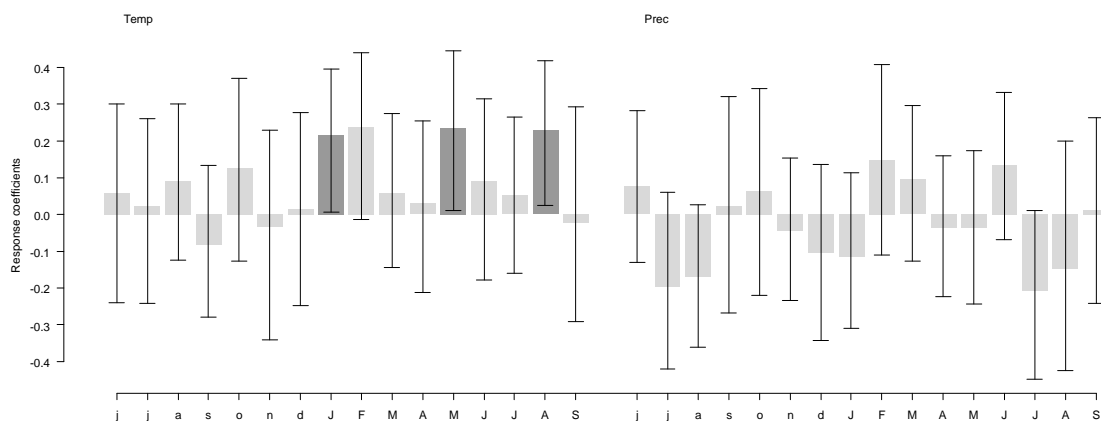
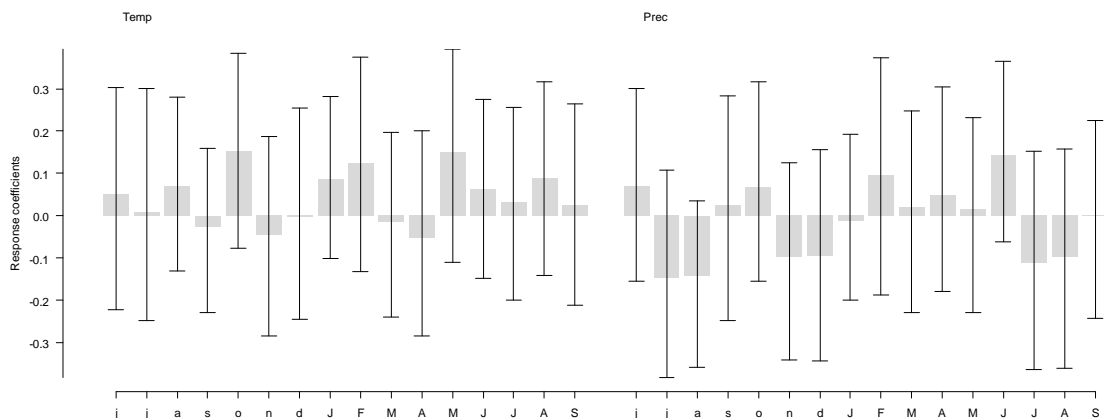
aktuálního tak i předchozího. Dle vývoje koeficientů 20-letých klouzavých korelací bylo možné zaznamenat v období 1955-1986 pozitivní vliv srážek v červnu, ten byl však nahrazen negativním vlivem srážek v květnu.



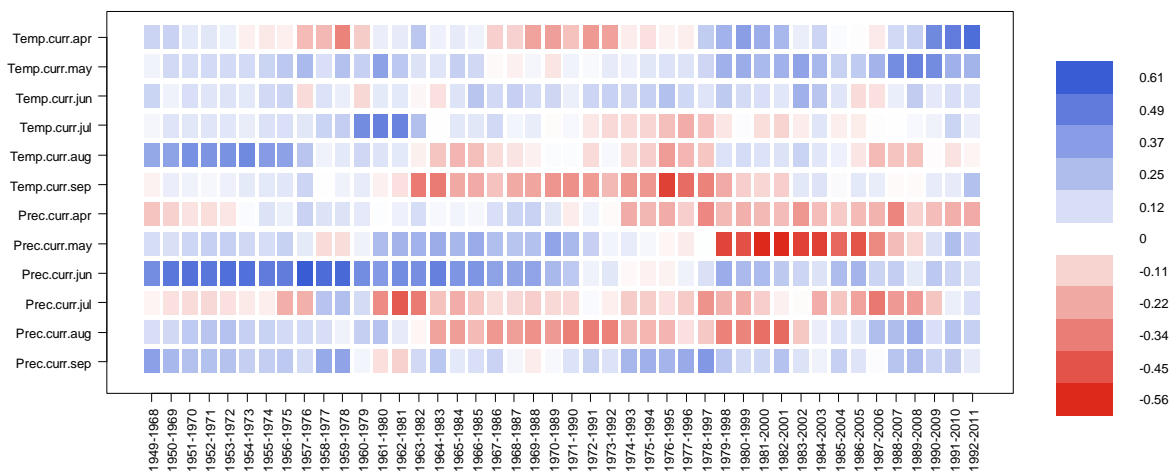
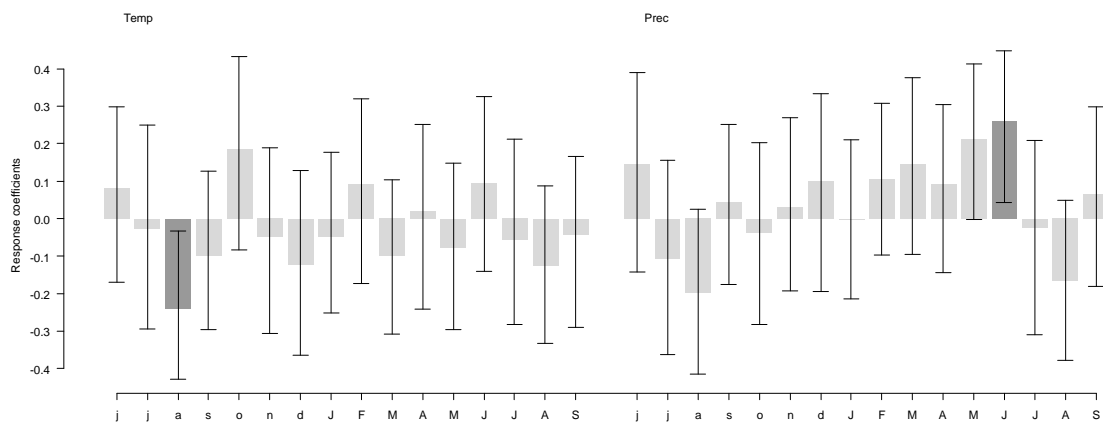
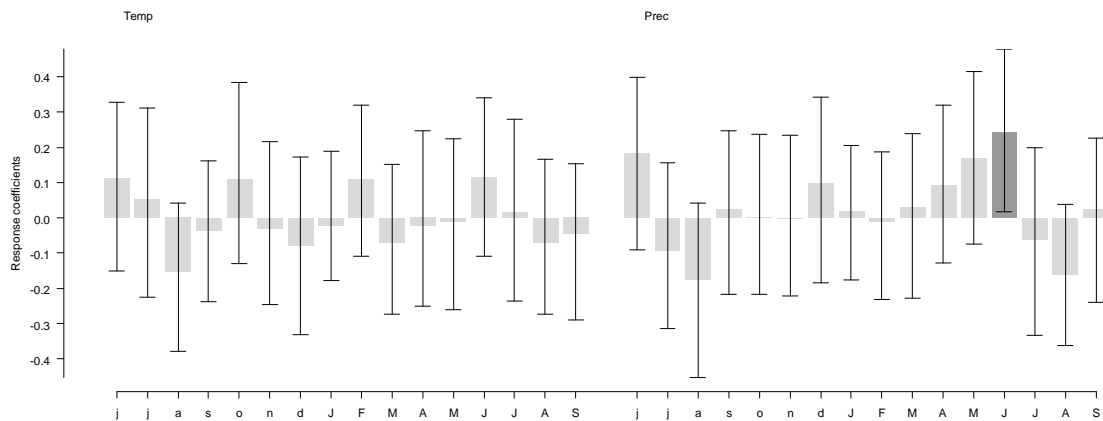
**Graf 16: Jelení:** koeficienty response funkce (nahore), korelační koeficienty (uprostřed) a klouzavé 20-leté korelační koeficienty (dole).



**Graf 17: Na Vrakách:** koeficienty response funkce (nahore), korelační koeficienty (uprostřed) a klouzavé 20-leté korelační koeficienty (dole).

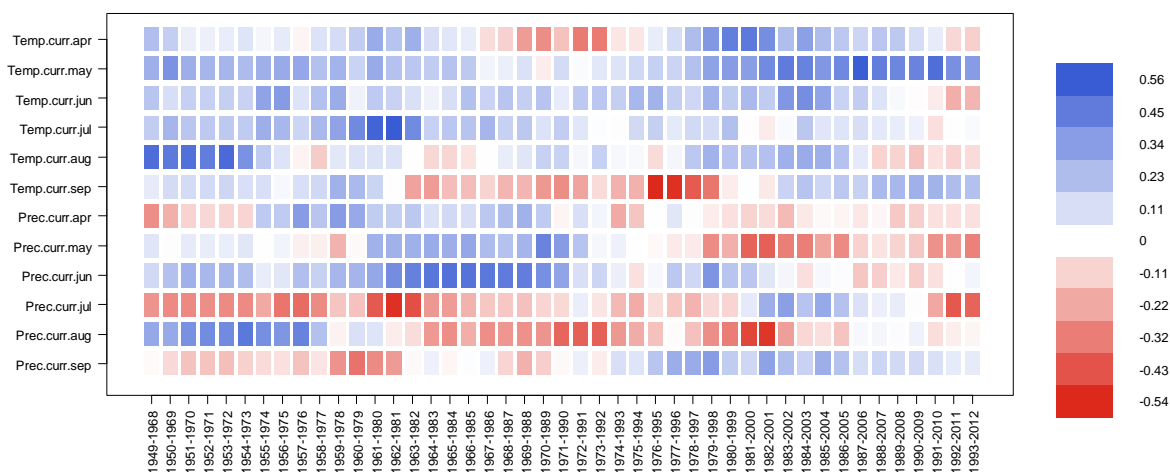
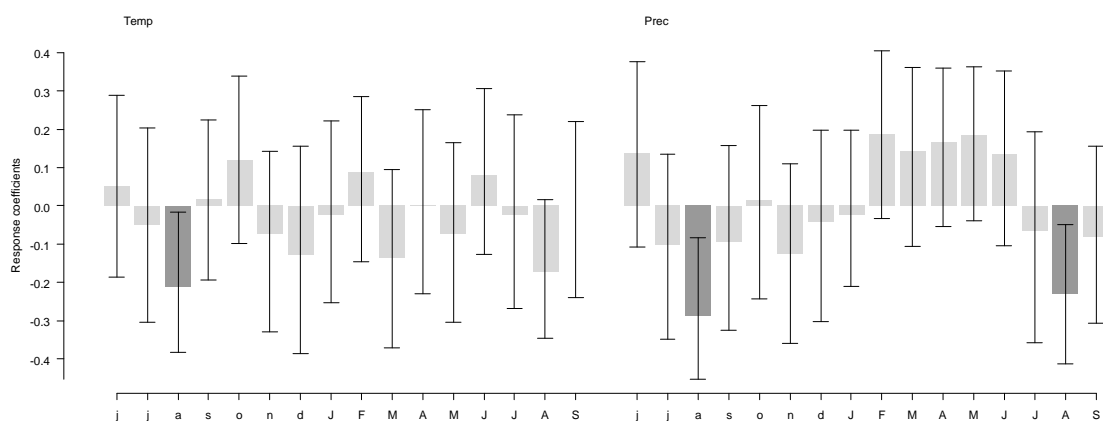
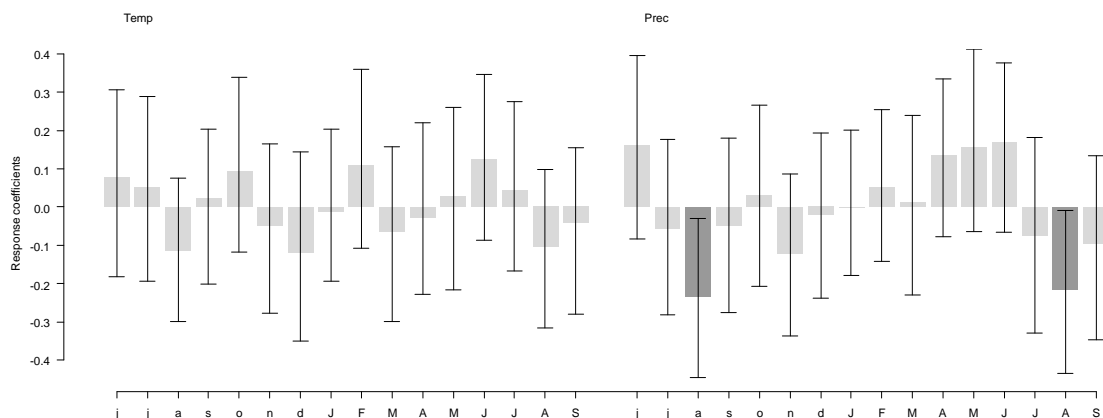


**Graf 18: Pod Špičákem:** koeficienty response funkce (nahore), korelační koeficienty (uprostřed) a klouzavé 20-leté korelační koeficienty (dole).

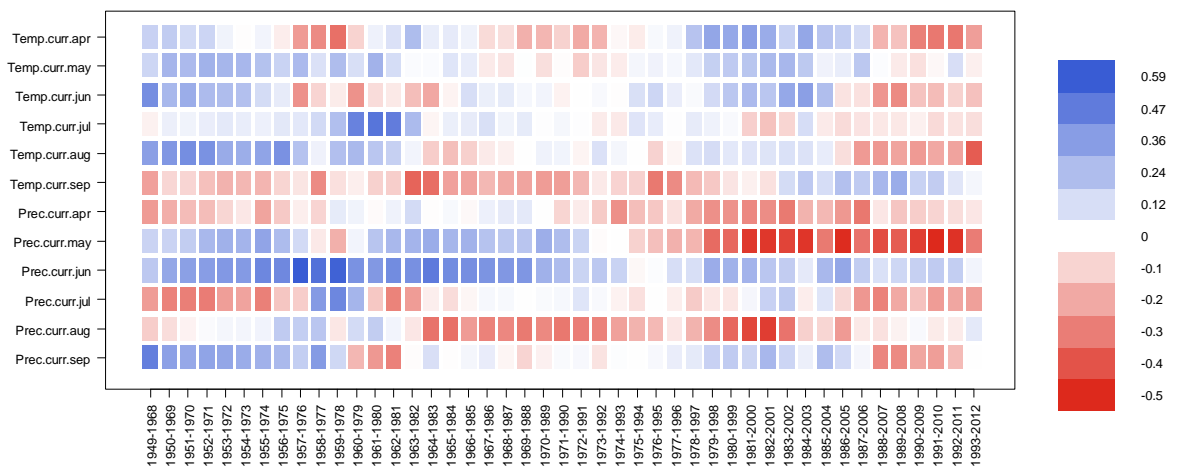
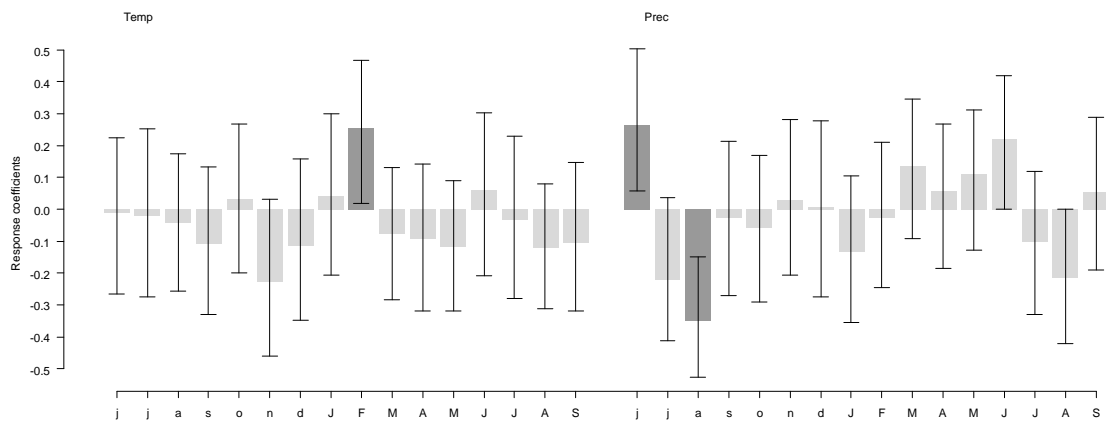
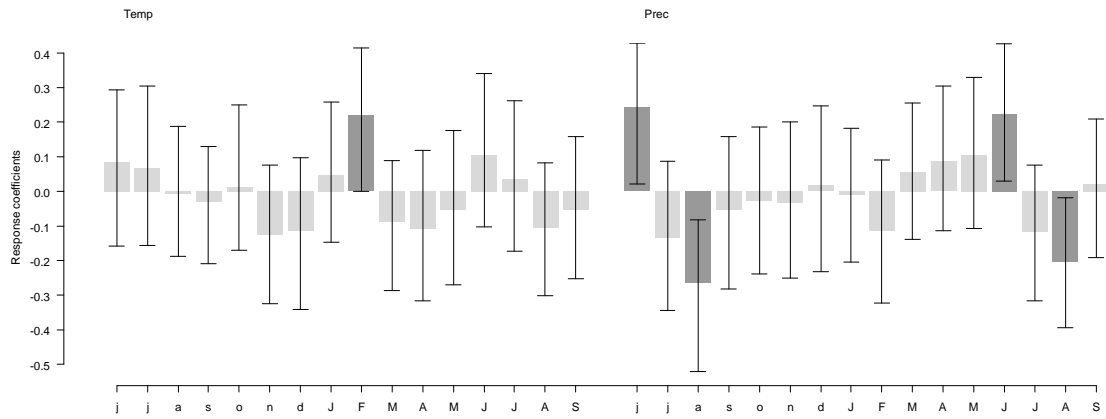


**Graf 19: V rezervaci:** koeficienty response funkce (nahore), korelační koeficienty (uprostřed) a klouzavé 20-leté korelační koeficienty (dole).





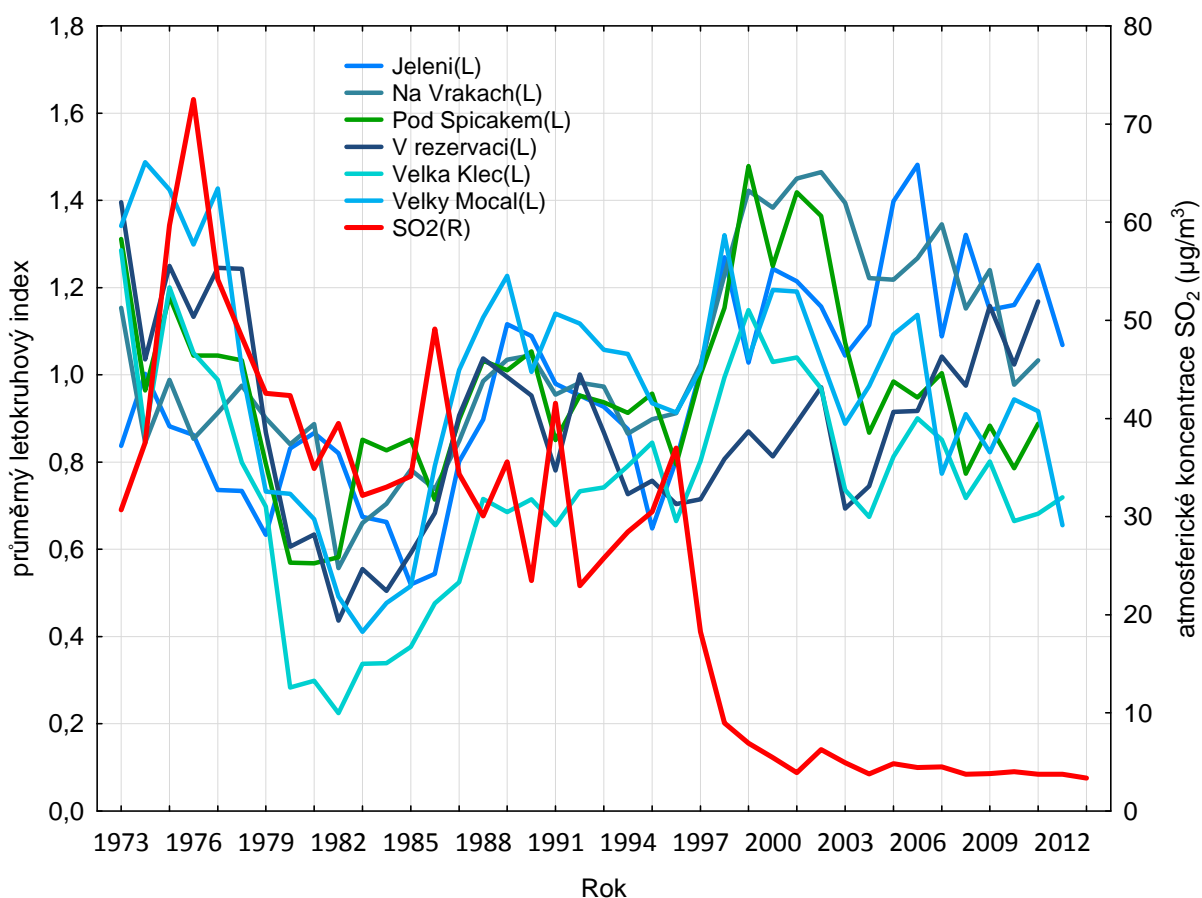
**Graf 20: Velká Kleč:** koeficienty response funkce (nahore), korelační koeficienty (uprostřed) a klouzavé 20-leté korelační koeficienty (dole).



**Graf 21: Velký Močál:** koeficienty response funkce (nahore), korelační koeficienty (uprostřed) a klouzavé 20-leté korelační koeficienty (dole).

### 5.3 Odezva radiálního přírůstu na změny trendu atmosférických koncentrací SO<sub>2</sub> a klimatu po roce 1980

V časové řadě radiálních přírůstů lze identifikovat prudký pokles kolem roku 1973 až na absolutní přírůstová minima a následnou postupnou regeneraci přibližně od roku 1981-1982. V tomto období dochází k výraznému poklesu atmosférických koncentrací SO<sub>2</sub> (Graf 22). Pro analýzu kombinovaného vztahu radiální přírůst-imise-klimatické změny bylo zvoleno období od roku 1980, jako počátek změny trendu průměrných ročních teplot. Po chladném období přibližně mezi lety 1962-1980, kdy průměrné teploty naopak klesaly, dochází k jejich opětovnému kontinuálnímu nárůstu. Pro zachycení společného vlivu těchto dvou výrazných trendů proto nebyly do této analýzy zahrnuty údaje chladného období 1973-1979.



**Graf 22:** Vývoj průměrných letokruhových indexů a atmosférických koncentrací SO<sub>2</sub> v období 1973-2013.

**Tab.7:** Koeficienty regrese a korelace pro období 1980-2011.  $\beta$ -koeficienty s hodnotou  $p \leq 0.05$  jsou zvýrazněny tučně. „atm.SO2“ jsou průměrné roční atmosférické koncentrace SO<sub>2</sub> (µg/m<sup>3</sup>), „Temp“ jsou průměrné roční teploty (°C) a „Prec“ je roční úhrn srážek (mm).

	<i>Jelení</i>	<i>Na Vrakách</i>	<i>Pod Špičákem</i>	<i>V rezervaci</i>	<i>Velká Kleč</i>	<i>Velký Močál</i>
<b>Regrese 1980-2011</b>						
<i>R<sup>2</sup></i>	<b>0.68</b>	<b>0.69</b>	<b>0.37</b>	<b>0.39</b>	<b>0.51</b>	0.17
<i>F</i>	<b>19.74</b>	<b>20.87</b>	<b>5.50</b>	<b>5.85</b>	<b>9.85</b>	1.85
<i>p</i>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	0.16
<i>β (atm. SO2)</i>	<b>-0.72</b>	<b>-0.83</b>	<b>-0.61</b>	-0.35	<b>-0.62</b>	-0.35
<i>p (atm.SO2)</i>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.01</b>	0.10	<b>0.00</b>	0.16
<i>β (Temp)</i>	0.18	0.03	0.07	0.29	0.17	0.12
<i>p (Temp)</i>	0.85	0.77	0.18	0.33	0.76	0.66
<i>β (Prec)</i>	-0.02	-0.04	-0.24	0.17	-0.05	-0.09
<i>p (Prec)</i>	0.21	0.85	0.70	0.14	0.32	0.60
<b>Korelace 1980-2011</b>						
<i>atm. SO2</i>	<b>-0.81</b>	<b>-0.83</b>	<b>-0.56</b>	<b>-0.57</b>	<b>-0.70</b>	<b>-0.38</b>
<i>p (atm.SO2)</i>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.03</b>
<i>Temp</i>	<b>0.57</b>	<b>0.48</b>	<b>0.42</b>	<b>0.47</b>	<b>0.51</b>	0.31
<i>p (Temp)</i>	<b>0.00</b>	<b>0.01</b>	<b>0.02</b>	<b>0.01</b>	<b>0.00</b>	0.08
<i>Prec</i>	0.24	0.28	-0.01	0.29	0.18	0.04
<i>p (Prec)</i>	0.18	0.11	0.97	0.11	0.32	0.83

Regresní model kombinovaného vlivu atmosférických koncentrací SO<sub>2</sub>, průměrných ročních teplot a ročních srážkových úhrnů za období 1980-2011 (Tab. 7) vysvětluje variabilitu radiálních přírůstů nejvíce na lokalitách Jelení ( $R^2 = 0,68$ ), Na Vrakách ( $R^2 = 0,69$ ), Velká Kleč ( $R^2 = 0,51$ ), menší měrou v lokalitách V rezervaci ( $R^2 = 0,39$ ) a Pod Špičákem ( $R^2 = 0,37$ ). Naproti tomu lokalita Velký Močál není statisticky významně těmito proměnnými ovlivňována. Vysoké hodnoty koeficientu determinace ( $R^2$ ) ukazují, že se uvažovanou závislostí radiálního přírůstu na klimatu a exogenním narušení v podobě znečištění ovzduší SO<sub>2</sub> podařilo vysvětlit podstatnou část variability radiálních přírůstů. Nejvíce je to v případě lokality Na Vrakách a Jelení, kde pouze malá část variability (31-32%) zůstává tímto regresním modelem neobjasněna a lze jí připisat tedy ostatním exogenním nebo náhodným vlivům, které tento model nepostihuje. Naopak na variabilitu radiálních přírůstů na lokalitě Velký Močál působí z 83% jiné

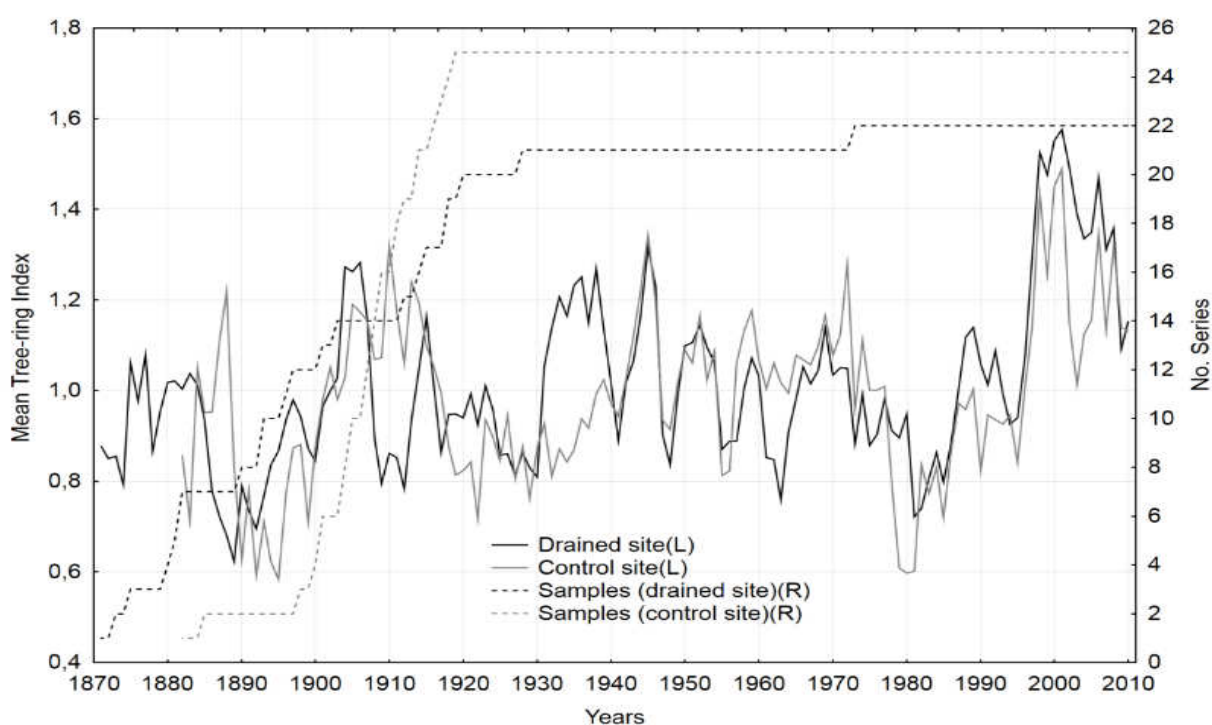
vlivy a regresní model tedy variabilitu radiálních přírůstů dostatečně nevysvětluje. Regresní  $\beta$ -koeficienty jsou statisticky velmi významné v případě atmosférických koncentrací  $\text{SO}_2$  na 4 lokalitách (Jelení, Na Vrakách, Pod Špičákem, Velká Kleč). Na lokalitách původních rašelinných smrčín V rezervaci a Velký Močál je jejich vliv méně významný. Průměrné roční teploty a roční srážkové úhrny statisticky významně nevysvětlují změny radiálního přírůstu v tomto modelu. Výsledky tedy ukazují na vysokou citlivost odvodněných lokalit (Jelení, Na Vrakách, Velká Kleč) na změny atmosférických koncentrací  $\text{SO}_2$ , naproti tomu, původní rozvolněné porosty rašelinné smrčiny bez zásahu byly mnohem méně citlivé na znečištění ovzduší.

Korelační koeficienty rovněž potvrzují silnou negativní závislost radiálních přírůstů na úrovni atmosférických koncentrací  $\text{SO}_2$  na všech lokalitách, míra ovlivnění stanovité je však rozdílná. Zrovna tak jako u regresního modelu, radiální přírůsty byly ovlivněny opět nejvíce na lokalitách odvodněných (Jelení, Na Vrakách, Velká Kleč), střední závislost se ukázala u lokalit Pod Špičákem a V rezervaci, nejmenší pak na lokalitě Velký Močál. Pozitivní závislost radiálních přírůstů na nárůstu průměrných ročních teplot se projevila s výjimkou Velkého Močálu výrazně na všech lokalitách, přičemž nejcitlivější na nárůst průměrných teplot byly opět lokality odvodněné (Jelení, Na Vrakách, Velká Kleč). Naopak roční srážkové úhrny se ukázaly statisticky nevýznamnými na všech lokalitách.

#### **5.4 Vliv odvodnění půdy na radiální přírůst**

Vývoj časové řady průměrných letokruhových indexů a velikost počtu vzorků - tj. počet letokruhových sérií využitý pro konstrukci průměrné řady letokruhových sérií na porost (Graf 23), naznačuje od roku 1940 velmi podobný trend radiálních přírůstu ovlivněné lokality Na Vrakách („Drained site“) a kontrolní lokality Pod Špičákem

(„Control site“). Rozdílný trend přírůstků před rokem 1940 je značně ovlivněn sníženým počtem vzorků, zejména před rokem 1910. Rovněž, o něco vyšší věková variabilita ovlivněné lokality Na Vrakách naznačuje vznik z podrostu, současně z nižší hodnoty průměrné korelace mezi jednotlivými letokruhovými sériemi (stromy) -  $\bar{r}$  (Tab.4) vyplývá, že společný signál byl o něco více než na kontrolní lokalitě Pod Špičákem narušen konkurenčními vlivy mezi stromy, kdy disturbance nebo těžební zásahy změnilly přístup stromů ke světlu.

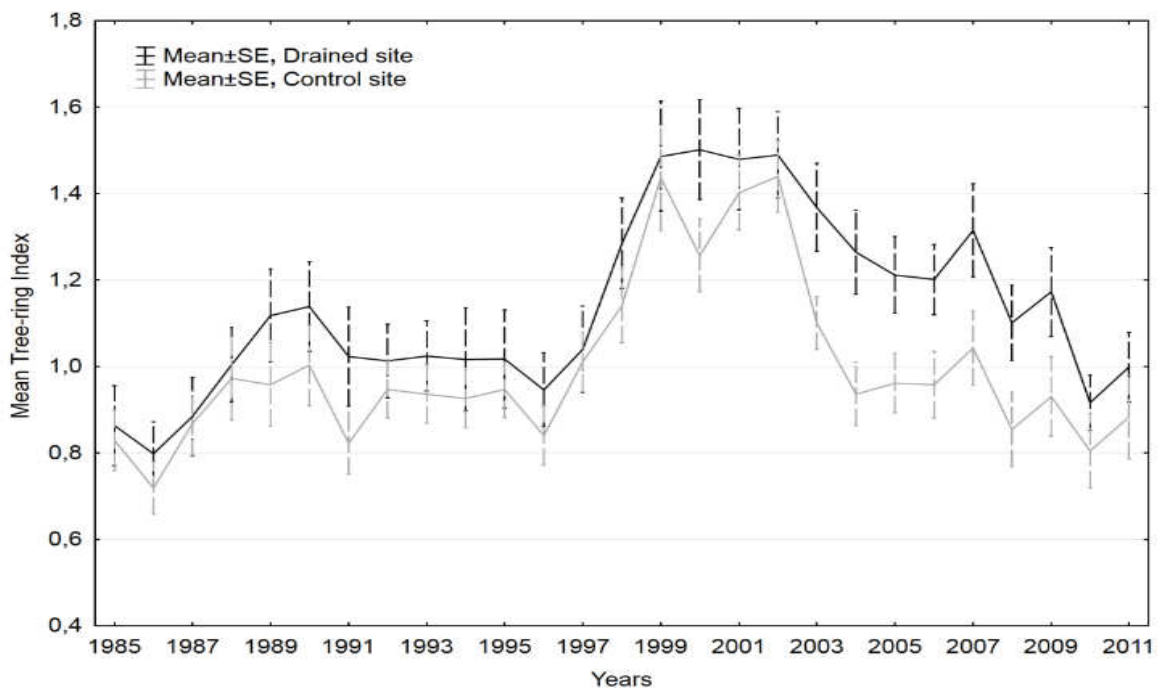


**Graf 23:** Chronologický vývoj průměrného letokruhového indexu - **Na Vrakách** („Drained site“) vs. **Pod Špičákem** („Control site“) a velikost počtu vzorků („Samples“)

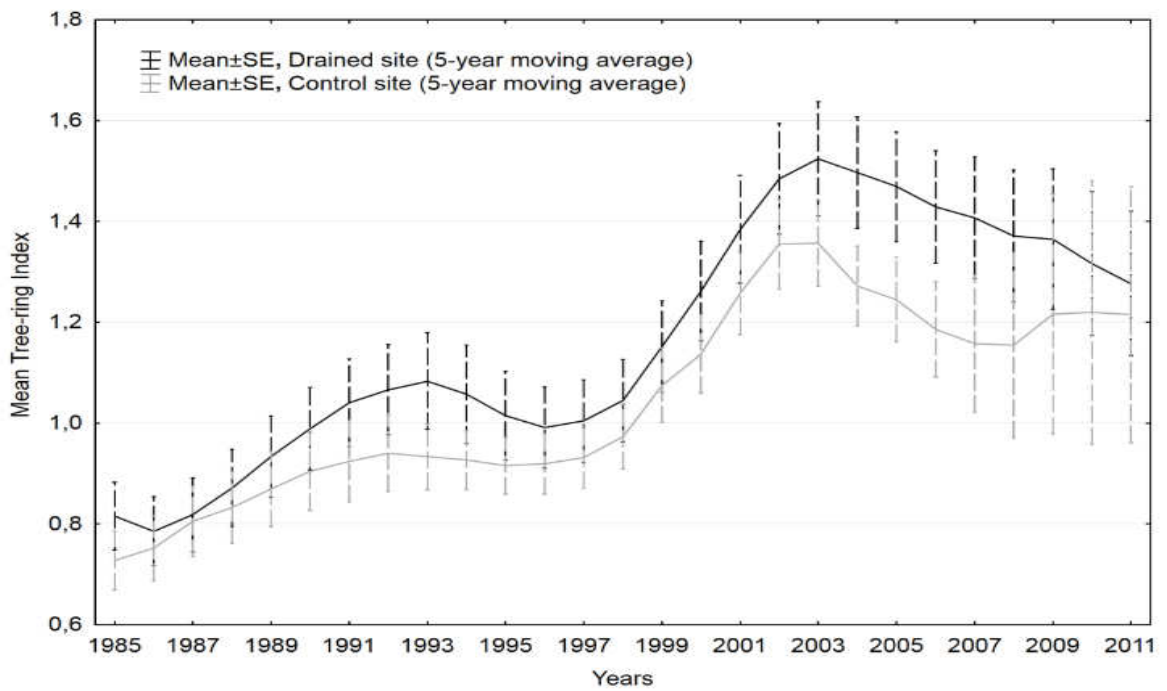
Porost v lokalitě Na Vrakách byl v roce 1992 odvodněn vybudováním nových a obnovením systému již zanesených starých odvodňovacích příkopů, které byly původně vybudovány pravděpodobně na počátku 20. století. Vliv odvodnění je proto detailně analyzován za období 1985-2011 (Graf 24) a zobrazuje porovnání průměrného letokruhového indexu odvodněné lokality Na Vrakách a neodvodněné lokality Pod Špičákem v tomto období včetně 95% intervalů spolehlivosti (svislé linie). Časová řada průměrných letokruhových indexů po roce 1992 má velmi obdobný trend, bez

evidentního vlivu odvodnění na radiální přírůst na ovlivněném stanovišti a tedy tento faktor exogenního narušení nelze považovat za významný pro radiální přírůst stromů na lokalitě Na Vrakách po roce 1992. Použití 5-ti a 10-ti letých klouzavých průměrů k eliminaci krátkodobých výkyvů časové řady tento stejný trend ještě více zdůraznilo (Graf 25, Graf 26).

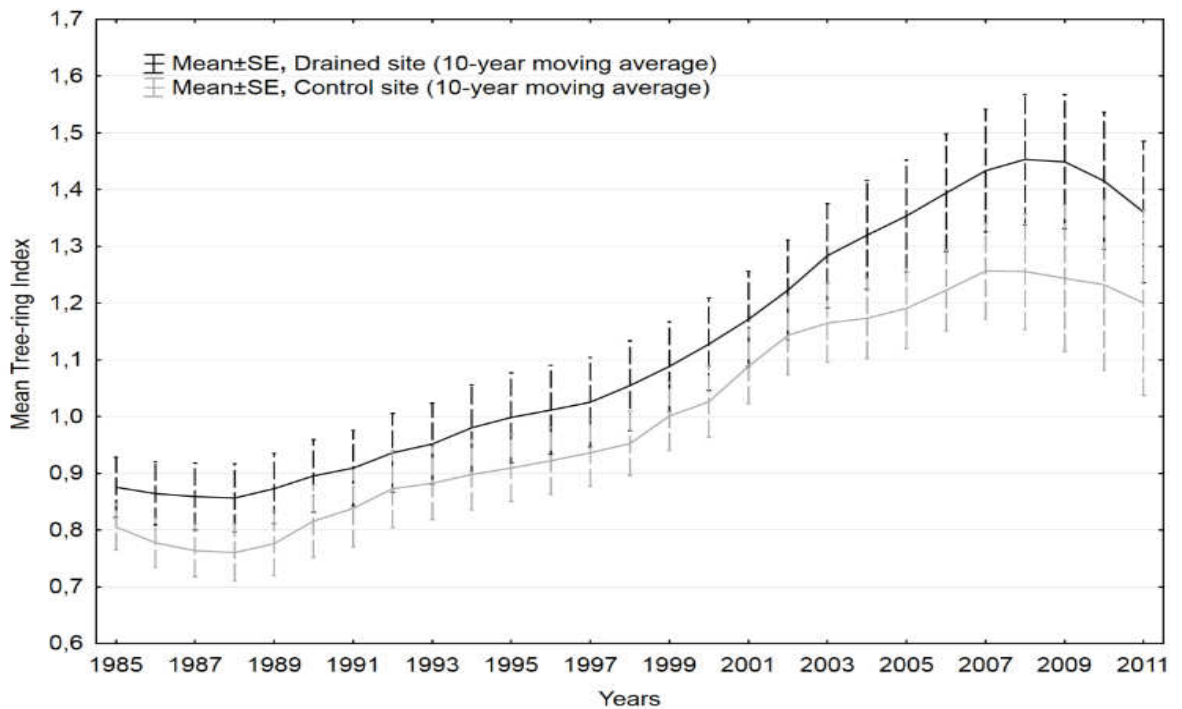
Výsledky porovnání průměrných letokruhových indexů obou lokalit a jejich 5-letých a 10-ti letých klouzavých průměrů prostřednictvím dvouvýběrového t-testu pro období 1985-2011 neodhalily podstatný statisticky významný rozdíl v hodnotách průměrného letokruhového indexu mezi ovlivněnou lokalitou Na Vrakách a kontrolní lokalitou Pod Špičákem (Tab. 8), s výjimkou let 2003 a 2004. Výsledky neprokazují, že by odvodnění stanoviště bylo statisticky významným faktorem ovlivňujícím radiální přírůst stromů po roce 1992 v lokalitě Na Vrakách a radiální přírůst je ovlivňován spíše jinými faktory prostředí, které působí obdobně na obou lokalitách.



**Graf 24:** Porovnání průměrného letokruhového indexu **Na Vrakách** („Drained site“) vs. **Pod Špičákem** („Control site“) v detailu období 1985-2011.



**Graf 25:** Porovnání průměrného letokruhového indexu **Na Vrakách** (odvodněná) vs. **Pod Špičákem** (neodvodněná lokalita) v detailu období 1985-2011: 5-leté klouzavé průměry.



**Graf 26:** Porovnání průměrného letokruhového indexu **Na Vrakách** (odvodněná) vs. **Pod Špičákem** (neodvodněná lokalita) v detailu období 1985-2011: 10-leté klouzavé průměry.



**Tab. 8.:** Výsledky dvouvýběrového t-testu porovnání průměrných letokruhových indexů detailu období 1985-2011 (t-hodnota, p, df=45).

T-test: Na Vrakách vs. Pod Špičákem (1985-2011)						
Rok	letokr.index		5-letý klouzavý průměr		10-year moving average	
	t-hodnota	p	t-hodnota	p	t-hodnota	p
1985	0,295	0,769	0,997	0,324	0,884	0,381
1986	0,827	0,413	0,357	0,723	1,137	0,262
1987	0,141	0,888	0,128	0,898	1,211	0,232
1988	0,251	0,803	0,374	0,710	1,240	0,221
1989	1,111	0,272	0,588	0,560	1,188	0,241
1990	0,980	0,332	0,755	0,454	0,938	0,353
1991	1,894	0,065	0,978	0,333	0,766	0,448
1992	0,622	0,537	1,082	0,285	0,701	0,487
1993	1,177	0,245	1,316	0,195	0,953	0,346
1994	0,531	0,598	1,185	0,242	0,984	0,330
1995	-0,203	0,840	0,972	0,336	0,952	0,346
1996	0,929	0,358	0,734	0,467	0,976	0,334
1997	0,533	0,597	0,716	0,478	1,024	0,311
1998	1,133	0,263	0,702	0,486	1,157	0,253
1999	0,499	0,620	0,663	0,511	1,056	0,297
2000	1,531	0,133	1,004	0,321	1,114	0,271
2001	0,634	0,530	0,935	0,355	0,939	0,352
2002	0,609	0,546	0,928	0,359	0,920	0,363
2003	2,387	0,021	1,203	0,235	1,068	0,291
2004	2,369	0,022	1,686	0,099	1,296	0,202
2005	1,176	0,246	1,648	0,106	1,455	0,153
2006	0,854	0,398	1,667	0,102	1,489	0,144
2007	0,350	0,728	1,358	0,181	1,403	0,167
2008	0,537	0,594	0,938	0,353	1,259	0,214
2009	0,095	0,925	0,521	0,605	1,058	0,296
2010	-0,162	0,872	0,313	0,756	0,815	0,419
2011	0,098	0,922	0,206	0,838	0,728	0,471

## 6 Diskuze

### Odezva na změny průměrných teplot a srážek

Výsledky analýzy pomocí response funkce naznačují, že tato stanoviště nejsou citlivá na meziroční změny počasí ani limitována klimatickými charakteristikami (Zang and Biondi 2013). Tomuto závěru nasvědčuje neexistence statisticky významných koeficientů response funkce pro lokality Jelení, Na Vrakách a Pod Špičákem, pouze jednoho statisticky významného koeficientu lokality V rezervaci a dvou v případě lokality Velká Kleč (Tab. 5). Skutečně, výzkumné lokality se vyznačují pravidelnými vysokými srážkami v průběhu celého roku (Tab. 3, Graf 14). Vliv klimatických změn (Tab. 6) se nejvíce projevil na nejstarší lokalitě původní rašelinné smrčiny Velký Močál v podobě pozitivního vlivu teplot v únoru a červnových srážek. Na zvýšené srážkové úhrny v srpnu však stromy reagovaly negativně nejen na této lokalitě, ale i na lokalitě Velká Kleč. Možným vysvětlením by mohla být specifická situace stanoviště rašelinné smrčiny, kdy vysoká hladina podzemní vody a nedostatek půdního vzduchu působí jako limitující faktory růstu dřevin v těchto podmínkách. Avšak obdobný negativní vliv srážek v srpnu předchozího roku byl zaznamenán i v jiné výzkumné práci na nepodmáčeném stanovišti (7M,7K) u porostu ve věku 140 let v 3 km vzdálené lokalitě Přebuz - Falešný metr (Vejpustková 2008).

Teploty se rovněž neukázaly jako významný regresní koeficient v celé délce sledovaného období (1947-2011). Korelační koeficienty však ze střednědobého pohledu naznačují pozitivní závislost radiálních přírůstů na zvyšujících se teplotách, a to zejména na stanovištích s vybudovanými odvodňovacími příkopy (Jelení, Na Vrakách). Nárůst teplot v srpnu předchozího roku však měl i negativní vliv na radiální přírůst a projevil se v lokalitách V rezervaci a Velká Kleč. Bylo tak prokázáno, že stromy skutečně reagovaly na statisticky významné zvýšení teplot v květnu a srpnu, nikoliv ale

v červenci a ne na všech lokalitách stejně. Pozitivní vliv teplot zesiluje po roce 1980 na lokalitách Na Vrakách, Pod Špičákem a Velká Kleč, kdy dochází po chladném období 1962-1980 k výraznému nárůstu průměrných ročních teplot (Grafy 16-21).

Vzhledem k tomu, že výzkumné práce věnované odezvě smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) na klimatické charakteristiky na rašelinných stanovištích nejsou k dispozici, lze výsledky porovnat se závěry obdobného výzkumu vlivu klimatických faktorů na růst borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) na Baltských rašeliništích v Polsku, kdy nebyl rovněž prokázán statisticky významný vliv klimatických charakteristik na přírůst stromů v rašeliništi (Cedro and Lamentowicz 2008, 2011).

Dále lze výsledky porovnat s výzkumy na dalších typech stanovišť, které se zaměřují na vliv teplot a srážek na dynamiku růstu smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) v hlavních oblastech jeho rozšíření. Ty povětšinou ukázaly, ve vyšších zeměpisných šířkách s vlhkým a chladným klimatem je růst omezován nízkými letními teplotami (Makinen et al. 2002; Makinen et al. 2001). Srovnatelné výsledky výzkumu vlivu teplot a srážek na radiální přírůst smrku ztepilého jsou k dispozici z výzkumné lokality vzdálené 3 km od výzkumných lokalit Jelení a Velký Močál. Za období 1958-2001 byl korelací zjištěn statisticky významný vztah mezi přírůsty a květnovými teplotami, srážkovými úhrny v měsících červenci a srpnu předchozího roku, kdy pro červenec vyšel vztah mezi srážkami a přírůsty jako pozitivní, v srpnu naopak negativní. Výše srážek v daném roce neměla na přírůsty vliv (Vejpustková 2008). Výzkum vlivu klimatických proměnných na radiální přírůst smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) proveden v sousedním Sasku (Německo), tedy v blízkosti výzkumných lokalit; teploty pozdní zimy (únor-březen) měly významný pozitivní vliv bez ohledu na nadmořskou výšku a geografickou lokalitu. Od května do července se vliv teploty zvyšuje s nadmořskou výškou, zatímco vliv srážek se snižuje. (Neumann and Rohle 2001).

Podobné výsledky jsou k dispozici ze západních Alp (údolí Rhony, kanton Valis, Švýcarsko), analyzující přírůsty smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst), borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.), modřínu opadavého (*Larix decidua* Mill.) a jedle bělokoré (*Abies alba* Mill.) v různých nadmořských výškách s vývojem teplot a srážek (Affolter et al. 2010), kdy letokruhové chronologie ukázaly rovněž tendenci k teplotně limitovanému růstu ve vysokých nadmořských výškách. V Rakousku byl rovněž proveden rozsáhlý výzkum vlivu klimatu na růst dominantního smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) za období 1961-1990 (Hasenauer et al. 1999) - výsledky z lokalit v různých nadmořských výškách ukázaly, že nedošlo v tomto období ke změně množství srážek, naopak došlo ke statisticky významnému zvýšení průměrné roční teploty o  $+0.72^{\circ}\text{C}$ , což způsobilo významné zvýšení průměrného přírůstu smrku ztepilého. Další výzkum interakce přírůst-klima z Rakouska pěti druhů nejčastěji se vyskytujících jehličnatých dřevin v rakouských Alpách - *Abies alba* Mill., *Picea abies* (L.) Karst., *Larix decidua* Mill., *Pinus cembra* L., *Pinus nigra* Arn. ukázal, že ve vysokých nadmořských výškách již nejsou srážky limitujícím faktorem a růst je většinou určován letními teplotami (Leal et al. 2007). Dendroklimatická studie smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) je k dispozici rovněž z polských Tater z nadmořských výšek od 839 do 1468 m n.m. Byla zjištěna statisticky významná závislost mezi radiálním přírůstem běžného roku a průměrnými teplotami v březnu, dubnu, červnu a červenci, ale se zvyšující se nadmořskou výškou se síla této korelace snižovala pro teploty březen-duben a zvyšovala pro teploty červen-červenec. Celkově ze studie vyplynul výraznější vliv teplot na růst stromů ve vyšších nadmořských výškách se závěrem, že tato stanoviště mohou být zvláště senzitivní na možné účinky změny průměrných teplot (Savva et al. 2006).

### Odezva na změny trendů atmosférických koncentrací SO<sub>2</sub> a klimatu po roce 1980

Analýza vlivu změn trendu atmosférických koncentrací SO<sub>2</sub>, průměrných ročních teplot a ročních srážkových úhrnů za období 1980-2011 na radiální přírůst (Tab.7) ukazuje velmi významný negativní vliv atmosférických koncentrací SO<sub>2</sub> na 4 lokalitách (Jelení, Na Vrakách, Pod Špičákem, Velká Kleč). Na lokalitách V rezervaci a Velký Močál je jejich vliv méně významný. Průměrné roční teploty a roční srážkové úhrny statisticky významně nevysvětlují změny radiálního přírůstu v tomto modelu. Korelační koeficienty naznačující silnou negativní závislost radiálních přírůstů na úrovni atmosférických koncentrací SO<sub>2</sub> na všech lokalitách, míra ovlivnění stanovité je však rozdílná. Pozitivní závislost nárůstu průměrných ročních teplot a radiálního přírůstu se projevila s výjimkou Velkého Močálu významně na všech lokalitách. Naopak roční srážkové úhrny nebyly rozhodující na žádné výzkumné lokalitě.

Na obdobný kombinovaný vliv snižování emisí SO<sub>2</sub> a nárůstu průměrných teplot poukazuje výzkum příčin nedávného rychlého zvýšení radiálního přírůstu jedle bělokoré (*Abies Alba* Mill.) na Slovensku v Západních Karpatech (Bošel'a et al. 2014). Byl zjištěn významný nárůst radiálních přírůstů od období 1970-1980 a jako pravděpodobné příčiny byly identifikovány redukce emisí SO<sub>2</sub> a NO<sub>3</sub> spolu s významným zvýšením průměrných teplot v dubnu, červnu a červenci.

V časové řadě radiálních přírůstů lze identifikovat prudký pokles kolem roku 1973 až na absolutní přírůstová minima a následnou postupnou regeneraci přibližně od roku 1981-1982. Období 1970-1980 je charakteristické prudkým nárůstem atmosférických koncentrací SO<sub>2</sub>, které začínají být postupně redukovány koncem tohoto období. Po roce 1980 se i výrazně mění trend průměrných teplot, kdy po chladném období mezi lety 1962-1980 začínají průměrné roční teploty podstatněji narůstat.

Vliv zvyšování emisí SO<sub>2</sub> s dosažení maxim v období 1970-1980 a jejich následné postupné snižování potvrdily i výzkumy v Německu (Elling et al. 2009). Dlouhodobá časová řada porovnávací vliv srážek na radiální přírůst smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) a jedle bělokoré (*Abies alba* Mill) je k dispozici z Bavorského lesa v jižním Německu. Tento výzkum poukázal na skutečnost, že od poloviny 60. let u jedle bělokoré a od poloviny 70. let u smrku ztepilého byl do té doby evidentní klimatický signál zeslaben vlivem emisí SO<sub>2</sub> z lokálních zdrojů (Wilson and Elling 2004). V ČR byl pozorován prudký pokles depozic SO<sub>2</sub> od roku 1990 (Hůnová et al. 2014). Ve Slovenské republice rovněž došlo v posledních třiceti letech k podstatnému snížení atmosférických koncentrací SO<sub>2</sub> o téměř 90% (Bošel'a et al. 2014).

V ČR byl proveden výzkum radiálních přírůstů ve vybraných porostech smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) ve Slezských Beskydech v nadmořských výškách od 403 m n.m. do 794 m n.m. Regionální standardizované letokruhové časové řady ukazují zřejmý pokles v radiálním přírůstu počínaje rokem 1970 do poloviny 90. let (Rybníček et al. 2010). V obdobném výzkumu v Krušných horách byl v posledních 25 letech pozorován výrazný výkyv v podobě přírůstové deprese v letech 1979 – 1987 s hlubokými minimy v letech 1980 a 1986 a následný výrazný vzestup přírůstů po roce 1987 (Vejpustková 2008). Na výrazné poklesy radiálních přírůstů smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) přibližně mezi lety 1975-1985 z důvodu chladnějšího období v kombinaci s vysokou imisní zátěží poukazují i další výzkumy z východních Krušných hor, Jizerských hor a Krkonoš (Kroupová 2002). V této souvislosti je možné uvést i sníženou odolnost smrku ztepilého oslabeného vysokou imisní zátěží vůči mrazu (Ryšková and Uhlířová 1985). Při porovnání výsledků reakce radiálních přírůstů smrku ztepilého na imise SO<sub>2</sub> z těchto výzkumných lokalit, a rovněž z výzkumné plochy Přebuz – Falešný metr (Vejpustková 2008) v západní části Krušných hor a z východní

části Krušných hor (Kroupová 2002) je evidentní, že porosty v západní části Krušných hor byly zasaženy imisemi méně. Důvodem může být skutečnost, že západní Krušné hory byly ovlivněny emitenty především z průmyslové oblasti v sousedním Německu, kde k odsíření zdrojů došlo mnohem dříve než v ČR.

Odlišná citlivosti jednotlivých stanovišť na změnu atmosférických koncentrací SO<sub>2</sub> a klimatu může být vysvětlena rozdíly ve věku stromů (Linderholm and Linderholm 2004) a antropogenními zásahy do stanoviště. Nejméně totiž na změny trendů imisí reagovaly lokality Velký Močál, V rezervaci a Pod Špičákem, přičemž se ve všech případech jedná o lokality bez zásahů do vodního režimu stanoviště. Zároveň jsou to lokality s nejvyšší průměrnou délkou letokruhové série (Velký Močál délka série 121 let, V rezervaci 120 let). Velký Močál se projevuje jako lokalita nejméně citlivá na změnu atmosférických koncentrací SO<sub>2</sub> a klimatu, naopak největší odezvu bylo možné sledovat na lokalitách Jelení, Na Vrakách a Velká Kleč, které byly zcela určitě ovlivněny během svého vývoje alespoň jedním zásahem do vodního režimu stanoviště. Zda odvodnění půdy mění citlivost radiálního přírůstu borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) na klimatické faktory bylo předmětem výzkumu odvodněných porostů na rašelinných půdách ve Finsku (Hokka et al. 2012). Hodnoty přírůstu byly porovnávány s přírůsty v porostech na přilehlých minerálních půdách. Změny v přírůstech na rašelinné a minerální půdě ukázaly rozdílnou závislost na klimatických faktorech. Stromy na rašelinné půdě ve vzdálenosti do 5 m od odvodňovacího příkopu vykázaly rozdílnou klimatickou odezvu v porovnání s těmi, co byly umístěny ve větší vzdálenosti.

### Vliv odvodnění půdy na radiální přírůst

Výsledky neprokazují, že by odvodnění stanoviště bylo statisticky významným faktorem ovlivňujícím radiální přírůst stromů po roce 1992 v lokalitě Na Vrakách a radiální přírůst je pravděpodobně spíše ovlivňován jinými faktory prostředí, které působí obdobně na obou lokalitách (Graf 23-26). Výsledky dvouvýběrového t-testu pro období 1985-2011 (Tab. 8) neodhalily podstatný statisticky významný rozdíl v hodnotách průměrného letokruhového indexu po roce 1992 mezi ovlivněnou lokalitou Na Vrakách a kontrolní lokalitou Pod Špičákem, s výjimkou let 2003 a 2004, kdy mohl být tento statisticky významný rozdíl způsoben spíše narušením společného růstového signálu lokality náhlou změnou konkurenčního prostředí mezi stromy disturbancí, těžebním zásahem do porostu nebo jiným náhodným vlivem. Tomu nasvědčují i nízké hodnoty průměrné korelace mezi jednotlivými letokruhovými sériemi (stromy) -  $\bar{r}$  lokality Na Vrakách (Tab.4).

Výsledky obdobných výzkumů časové odezvy radiálního přírůstu stromu na odvodnění nejsou jednoznačné. V desetileté studii růstu a produkce smrku černého (*Picea mariana* Mill.) v zalesněném rašeliništi v Ontariu, oblasti Wally Creak, odezva na odvodnění trvala pět až sedm let (McLaren and Jeglum 1998). Naproti tomu, ve výzkumu dynamiky produkce borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) a smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) na odvodněných rašelinných stanovištích ve Finsku byl pozorován značný nárůst v produkci dřeva po odvodnění, který byl největší v průběhu dvaceti let po odvodnění a pokračoval až do čtyřiceti let poté (Hokka and Penttila 1999).

Limitujícím faktorem vlivu odvodnění půdy na radiální přírůst však může být fakt, že v době, kdy bylo provedeno odvodnění, se věk porostu na základě počtu letokruhů odebraných vývrtů pohyboval mezi 105-110 lety. Některé starší studie



(Piawczenko and Sabo 1962 in Socha 2012) naznačily schopnost smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) reagovat na odvodnění ve věku více než 100 let, výsledky tohoto výzkumu však tuto hypotézu nepotvrzují. Rovněž výzkumné práce smrku černého (*Picea mariana* Mill.) (MacDonald and Yin 1999) a borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) (Hokka and Ojansuu 2004, Socha 2012) potvrzují reakci na odvodnění v mladším nebo středním věku porostu. Výsledky této analýzy nenaznačují schopnost smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) reagovat na odvodnění rašelinného stanoviště ve věku přesahujícím 100 let.

Dalším limitujícím faktorem může být skutečnost, že odezva stromu na odvodnění půdy je ovlivněna schopností stromu využít hlubší půdní vrstvy svým kořenovým systémem (Schweingruber 2007). Z porovnání růstu smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) na zcela odvodněném a málo odvodněném stanovišti ukázala, že kořenový systém byl dvakrát mělčí a výrazně širší než na odvodněných stanovištích (Konôpka 2002; Konôpka et al. 2010; Tobin et al. 2007). Slabá reakce stromů na odvodnění půdy v této studii může být ovlivněna faktem, že v průměrném věku porostu 105-110 let již stromy nejsou schopny adaptovat svůj kořenový systém změnám výšky vodní hladiny.

Analýza dat odhalila, že porost na odvodněném stanovišti vykazuje v delším časovém horizontu vyšší průměrný radiální roční přírůst než porost na kontrolním stanovišti. Vzhledem k tomu, že i malé odlišnosti ve stanovištních podmínkách ovlivňují růst (Schweingruber 2007), lze tuto odlišnost připsat rozdílné konfiguraci terénu a expozici stanoviště: zatímco kontrolní stanoviště má severní expozici, odvodněný porost je na terénu s mírnou jižní expozicí. Navíc, oblast odvodněné lokality byla historicky pod větším antropogenním tlakem, lze tedy předpokládat další zásahy do vodního režimu i dříve, pravděpodobně kolem roku 1930, i když historické záznamy nejsou k dispozici.

Vzhledem k absenci nepoškozených porostů rašelinné smrčiny středního věku nebylo možné ověřit hypotézu, zda odvodnění stanoviště v této oblasti ovlivňuje velikost tloušťkového přírůstu v porostech mladšího-středního věku.

Přestože byly všechny výzkumné lokality vybrány ze stanoviště a věkově stejných porostů, analýza radiálního přírůstu ukázala, že se zdaleka nejedná o porosty s identickými charakteristikami. Lokalita Jelení vykazuje nejvyšší výčetní tloušťku vzorníků a současně nejnižší průměrný věk. Je to lokalita s nejnižší nadmořskou výškou a jsou zde viditelné staré odvodňovací příkopy, není však známo, kdy byly vybudovány. Další lokality s viditelnými odvodňovacími příkopy Velká Kleč a Na Vrakách patří rovněž k porostům s vyšší výčetní tloušťkou mezi výzkumnými lokalitami. Naopak lokality v původních bezzásahových rašelinných smrčinách V rezervaci a Pod Špičákem jsou porosty s nejnižší výčetní tloušťkou. Lokalita Velký Močál je rovněž původní rašelinnou smrčinou, ale vyšší průměrnou výčetní tloušťkou může ovlivňovat i skutečnost, že se nachází v nadmořské výšce o 100 m nižší než srovnatelné lokality V rezervaci a Pod Špičákem. Uvedené výsledky naznačují, že nelze vyloučit vliv odvodnění na hodnoty radiálního přírůstu rašelinné smrčiny v mladších věkových stadiích porostu včetně příznivého vlivu na zvýšenou stabilitu dospělého porostu. Přírůstové charakteristiky ovlivňuje mimo toho i nadmořská výška výzkumné lokality.

## 7 Závěr a doporučení pro praxi

Ve střední Evropě se rašelinné a vrchovištní smrčiny nacházejí v montánních a subalpínských oblastech, v ČR pak zejména v Krušných horách, na Šumavě, v Jizerských horách a Hrubém Jeseníku, převážně v nadmořských výškách 700-1.300 m (Průša 2001). V porovnání s ostatními soubory lesních typů tvoří jen nepatrnou část lesních porostů ČR- přibližně 9518 ha (SLT 7R a 8R), tj. 0,35 % porostní plochy (Poleno et al. 2007). Lesní porosty jsou zakrslé, mezernaté, trpí větrem, zamokřením, mrazem a sněhem; jedná se většinou o lesy ochranné nebo lesy zvláštního určení s nepatrnou produkční potencií (AVB = 16 m), les tedy plní převážně vodohospodářskou ochrannou funkci (Průša 2001). Rašelištní stanoviště jsou důležitým regulátorem stavu podzemních vodních nádrží a proto je nutné je chránit před odvodňováním a narušováním jejich vegetační vrstvy (Dohnal 1965).

Dendrochronologické, dendroekologické a dendroklimatologické studie stromů rostoucích na rašelištích v Evropě jsou ojedinělé a většinou jsou zaměřeny na jiné dřeviny než smrk ztepilý (*Picea abies* L. Karst). Přínosem této práce je tedy rozšíření dosavadních poznatků jejich růstové dynamiky a vnějších faktorů, které ji nejvíce ovlivňují.

Výsledky analýzy pomocí response a korelační funkce ukázaly, že rašelinné smrčiny nejsou citlivé na meziroční změny počasí ani limitovány srážkovými úhrny. Tato stanoviště jsou charakteristická pravidelnými vysokými srážkami v průběhu celého roku, které zde navíc stagnují díky konfiguraci terénu se ztíženým odtokem vody z rašelinného ložiska. Teploty se rovněž neukázaly jako významný faktor radiálního přírůstu v celé délce sledovaného období (1947-2011), jejich pozitivní vliv však zesiluje po roce 1980, kdy dochází po chladném období 1962-1980 k výraznému nárůstu průměrných ročních teplot zejména v měsíci dubnu, červnu a listopadu. Je třeba

zdůraznit, že na nárůst průměrných měsíčních teplot byly mnohem citlivější lokality ovlivněné zásahy do půdního vodního režimu s vybudovanými odvodňovacími příkopy. Na lokalitách původních rašelinných smrčín bez zásahů do vodního režimu byl vliv nárůstu průměrných měsíčních teplot na radiální přírůst povětšinou málo výrazný.

V časové řadě radiálních přírůstů lze identifikovat prudký pokles kolem roku 1973 až na absolutní přírůstová minima a následnou postupnou regeneraci přibližně od roku 1981-1982. Období 1970-1980 je charakteristické prudkým nárůstem atmosférických koncentrací  $\text{SO}_2$ , k jejichž redukci docházelo postupně. Přetrvávání vysokých koncentrací  $\text{SO}_2$  způsobuje kontinuální depresi radiálních přírůstů, snižování emisí naopak vede k jejich postupné regeneraci. Analýza vlivu změn trendu atmosférických koncentrací  $\text{SO}_2$ , průměrných ročních teplot a ročních srážkových úhrnů za období 1980-2011 na radiální přírůst ukazuje kombinovaný pozitivní vliv snižování emisí  $\text{SO}_2$  a nárůstu průměrných ročních teplot. Rozdílná citlivost jednotlivých stanovišť na změnu atmosférických koncentrací  $\text{SO}_2$  a klimatických charakteristik může být vysvětlena rozdíly ve věku stromů a antropogenními zásahy do stanoviště (zejména odvodnění půdy), kdy stromy na odvodněných lokalitách byly mnohem více zasaženy zvýšenými atmosférickými koncentracemi  $\text{SO}_2$  než stromy původních rašelinných smrčín bez zásahů do jejich vodního režimu.

Podmáčené smrčiny jsou obecně známé svou velkou citlivostí na narušení jejich vnějšího prostředí. Výsledky této práce prokázaly, že zásah do vodního režimu půdy na stanovištích rašelinné smrčiny zvyšuje podstatnou měrou citlivost stromů na změny vnějšího prostředí zejména v podobě vlivu atmosférických koncentrací  $\text{SO}_2$ , zatímco původní neovlivněné porosty vykazují mnohem větší přírůstovou stabilitu i v měnících se podmínkách prostředí. Odvodnění ve vyšším věku nepřináší zvýšení produkce porostu. Vzhledem k tomu, že rašelinné smrčiny plní zejména funkce lesa zvláštního

určení nebo lesa ochranného, nedoporučuji na základě těchto výsledků provádět odvodnění půdy těchto stanovišť. Naopak, pokud již takové opatření bylo v minulosti provedeno a odvodňovací příkopy jsou stále funkční, je vhodné obnovit původní vodní režim rašelinné smrčiny hrazením odvodňovacích příkopů nebo jiným způsobem. V případě, že by u porostů na rašelinných stanovištích převažovala produkční funkce, lze na základě výsledků této práce předpokládat, že odvodnění v mladším věku pozitivně ovlivní budoucí produkci smrkového porostu a zvýší jeho statickou stabilitu. Rizikovým faktorem však zůstává vyšší citlivost na měnící se podmínky vnějšího prostředí, které nelze v celé délce časového vývoje porostu předem odhadnout. Proto doporučuji možné přínosy a negativní vlivy umělých zásahů do těchto ojedinělých stanovišť vždy předem pečlivě zvážit.

V Evropě jsou zbylá zachovalá rašeliniště a je obklopující rašelinné a podmáčené lesy předmětem ochrany na národní nebo nadnárodní úrovni. V souvislosti s tím je v posledních letech velmi aktuální rašeliniště poškozená odvodněním nebo těžbou systematicky obnovovat (Obr.10). Pro výše uvedené cíle jsou výsledky této práce teoretickým přínosem. Zároveň výsledky studie vlivu změn klimatu a atmosférických koncentrací  $\text{SO}_2$  dávají porostům v jejich přirozené dřevinné skladbě na těchto stanovištích v současných podmínkách mnohem lepší perspektivu, než před 30-40 lety, kdy vrcholilo jejich imisní poškození.



**Obr. 10:** Obnova vodního režimu rašelinné smrčiny, lokalita “Velká Kleč”, NPR Božídarské rašeliniště.

## 8 Seznam literatury a použitých zdrojů

1. Affolter, P., U. Buntgen, J. Esper, A. Rigling, P. Weber, J. Luterbacher, and D. Frank. 2010. Inner Alpine conifer response to 20th century drought swings. *Eur. J. For. Res.* 129(3):289-298.
2. Akaike, H. 1974. New look at statistical-model identification. *Ieee T. Automat. Contr.* AC19(6):716-723.
3. Andersen, R., S.J. Chapman, and R.R.E. Artz. 2013. Microbial communities in natural and disturbed peatlands: A review. *Soil Biol. Biochem.* 57:979-994.
4. Andreassen, K., S. Solberg, O.E. Tveito, and S.L. Lystad. 2006. Regional differences in climatic responses of Norway spruce (*Picea abies* L. Karst) growth in Norway. *Forest Ecol. Manag.* 222(1-3):211-221.
5. Anděl, J. 2007. *Statistické metody*. Matfyzpress, Praha. 299 s. ISBN 80-7378-003-8.
6. Badorek, T., E.S. Tuittila, P. Ojanen, and K. Minkkinen. 2011. Forest floor photosynthesis and respiration in a drained peatland forest in southern Finland. *Plant Ecol.* 4(2-3):227-241.
7. Biondi, F. 1997. Evolutionary and moving response functions in dendroclimatology. *Dendrochronologia* 15:139-150.
8. Biondi, F., T.J. Kozubowski, and A.K. Panorska. 2005. A new model for quantifying climate episodes. *Int. J. Climatol.* 25(9):1253-1264.
9. Biondi, F., T.J. Kozubowski, A.K. Panorska, and L. Saito. 2008. A new stochastic model of episode peak and duration for eco-hydro-climatic applications. *Ecol. Model.* 211(3-4):383-395.
10. Biondi, F., and F. Qeadan. 2008. A theory-driven approach to tree-ring standartization: defining the biological trend from expected basal area increment. *Tree-Ring Res.* 64(2):81-96.
11. Biondi, F., and K. Waikul. 2004. DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Comput. Geosci.* 30(3):303-311.
12. Bouriaud, O., and I. Popa. 2009. Comparative dendroclimatic study of Scots pine, Norway spruce, and silver fir in the Vrancea Range, Eastern Carpathian Mountains. *Trees-Struct. Funct.* 23(1):95-106.
13. Box, G.E.P., and G.M. Jenkins. 1970. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Holden-Day, San Francisco.
14. Bošeľa, M., L. Kulla, and R. Marušák. 2011. Detrending ability of several regression equations in tree-ring research: a case study based on tree-ring data of Norway spruce (*Picea abies* [L.]). *J. For. Sci.* 57:491-499.
15. Bošeľa, M., R. Petráš, Z. Sitková, T. Priwitzer, J. Pajtík, H. Hlavatá, R. Sedmák, and B. Tobin. 2014. Possible causes of the recent rapid increase in the radial increment of silver fir in the Western Carpathians. *Environ. Pollut.* 184:211-221.
16. Briffa, K.R., T.J. Osborn, and F.H. Schweingruber. 2004. Large-scale temperature inferences from tree rings: a review. *Global Planet. Change* 40(1-2):11-26.
17. Briffa, K.R., T.J. Osborn, F.H. Schweingruber, P.D. Jones, S.G. Shiyatov, and E.A. Vaganov. 2002a. Tree-ring width and density data around the Northern Hemisphere: Part 1, local and regional climate signals. *Holocene* 12(6):737-757.
18. Briffa, K.R., T.J. Osborn, F.H. Schweingruber, P.D. Jones, S.G. Shiyatov, and E.A. Vaganov. 2002b. Tree-ring width and density data around the Northern Hemisphere: Part 2, spatio-temporal variability and associated climate patterns. *Holocene* 12(6):759-789.

19. Briffa, K.R., V.V. Shishov, T.M. Melvin, E.A. Vaganov, H. Grudd, R.M. Hantemirov, M. Eronen, and M.M. Naurzbaev. 2008. Trends in recent temperature and radial tree growth spanning 2000 years across northwest Eurasia. *Philos. T. Roy. So. B*.363(1501):2271-2284.
20. Bunn, A.G. 2007. Dendrochronology Program Library in R. R package version 1.0. URL. Dostupné z WWW: <http://cran.r-project.org/web/packages/dplR>.
21. Bunn, A.G. 2008. A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia* 26(2):115-124.
22. Bunn, A.G. 2010. Statistical and visual crossdating in R using the dplR library. *Dendrochronologia* 28(4):251-258.
23. Bunn, A.G., E. Jansma, M. Korpela, R.D. Westfall, and J. Baldwin. 2013. Using simulations and data to evaluate mean sensitivity (zeta) as a useful statistic in dendrochronology. *Dendrochronologia* 31(3):250-254.
24. Campelo, F., I. Garcia-Gonzalez, and C. Nabais. 2012. detrendeR - A Graphical User Interface to process and visualize tree-ring data using R. *Dendrochronologia* 30(1):57-60.
25. Caprio, J.M., H.C. Fritts, R.L. Holmes, D.M. Meko, and D.L. Hemming. 2003. A chi-square test for the association and timing of tree ring-daily weather relationships: A new technique for dendroclimatology. *Tree-Ring Res.* 59(2):99-113.
26. Cedro, A., and M. Lamentowicz. 2008. The last hundred years' dendroecology of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) on a Baltic bog in Northern Poland: Human impact and hydrological changes. *Baltic For.* 14(1):26-33.
27. Cedro, A., and M. Lamentowicz. 2011. Contrasting responses to environmental changes by pine (*Pinus sylvestris* L.) growing on peat and mineral soil: An example from a Polish Baltic bog. *Dendrochronologia* 29(4):211-217.
28. Cook, E.R., and L.A. Kairiukstis. 1990. *Methods of Dendrochronology*. International Institute for Applied Systems Analysis. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Holandsko.
29. Cook, E.R., and P.J. Krusic. 2005. Program ARSTAN: A Tree-ring Standardization Program Based on Detrending and Autoregressive Time Series Modeling with Interactive Graphics. Tree-Ring Laboratory, Lamont Doherty Earth Observatory of Columbia University, Palisades, NY, USA.
30. Cook, E.R., and K. Peters. 1981. The smoothing spline: A new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bulletin* 41:45-53. Dostupné z WWW: <http://www.treeringsociety.org/TRBTRR/TRBTRR.htm>
31. Cropper, J.P. 1984. Multicollinearity within selected western North American temperature and precipitation data sets. *Tree-Ring Bulletin* 44:29-37. Dostupné z WWW: <http://www.treeringsociety.org/TRBTRR/TRBTRR.htm>
32. Čejková, A., and T. Kolář. 2009. Extreme radial growth reaction of Norway spruce along an altitudinal gradient in the Sumava mountains. *Geochronometria* 33:41-47.
33. ČHMÚ. 2007. *Atlas podnebí Česka*, Český hydrometeorologický ústav, Praha.
34. Deutscher Wetterdienst. 2014. *Klimadaten Meteostation Fichtelberg*, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Berlin. SRN.
35. Dittmar, C., T. Eissing, and A. Rothe. 2012. Elevation-specific tree-ring chronologies of Norway spruce and Silver fir in Southern Germany. *Dendrochronologia* 30(2):73-83.



36. Dohnal, Z. 1965. Československá rašeliniště a slatiniště. Československá akademie věd, Praha.
37. Drápela, K., and J. Zach. 1995. Dendrometrie : (dendrochronologie). Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, Brno. 149 s. ISBN 80-7157-178-4
38. Efron, B., and R. Tibshirani. 1986. Bootstrap methods for standard errors, confidence intervals, and other measures of statistical accuracy. *Stat. Sci.* 1:54-75.
39. Elling, W., C. Dittmar, K. Pfaffelmoser, and T. Rotzer. 2009. Dendroecological assessment of the complex causes of decline and recovery of the growth of silver fir (*Abies alba* Mill.) in Southern Germany. *Forest Ecol. Manag.* 257(4):1175-1187.
40. Feliksik, E., and S. Wilczynski. 2009. The effect of climate on tree-ring chronologies of native and nonnative tree species growing under homogenous site conditions. *Geochronometria* 33:49-57.
41. Fox, J., and S. Weisberg. 2014. Package "car": Companion to Applied Regression for R. Dostupné z WWW: <http://cran.r-project.org/web/packages/car/index.html>
42. Fraver, S., B.G. Jonsson, M. Jonsson, and P.A. Esseen. 2008. Demographics and disturbance history of a boreal old-growth *Picea abies* forest. *J. Veg. Sci.* 19(6):789-798.
43. Frelechoux, F., A. Buttler, and F. Gillet. 2000a. Dynamics of bog-pine-dominated mires in the Jura Mountains, Switzerland: A tentative scheme based on synusial phytosociology. *Folia Geobot.* 35(3):273-288.
44. Frelechoux, F., A. Buttler, F. Gillet, J.M. Gobat, and F.H. Schweingruber. 2003. Succession from bog pine (*Pinus uncinata* var. *rotundata*) to Norway spruce (*Picea abies*) stands in relation to anthropic factors in Les Saignolis bog, Jura Mountains, Switzerland. *Ann. Forest Sci.* 60(4):347-356.
45. Frelechoux, F., A. Buttler, F.H. Schweingruber, and J.M. Gobat. 2000b. Stand structure, invasion, and growth dynamics of bog pine (*Pinus uncinata* var. *rotundata*) in relation to peat cutting and drainage in the Jura Mountains, Switzerland. *Can. J. Forest Res.* 30(7):1114-1126.
46. Frelechoux, F., A. Buttler, F.H. Schweingruber, and J.M. Gobat. 2004. Spatio-temporal pattern of bog pine (*Pinus uncinata* var. *rotundata*) at the interface with the Norway spruce (*Picea abies*) belt on the edge of a raised bog in the Jura Mountains, Switzerland. *Ann. Forest Sci.* 61(4):309-318.
47. Fritts, H.C. 1976. *Tree Rings and Climate*. Academic Press, New York. USA.
48. Fritts, H.C. 1996. PRECON - A Statistical Model for Analyzing the Tree-Ring response to Variations in Climate. Computer Program.
49. Fritts, H.C., J.E. Mosimann, and C.P. Bottorff. 1969. A revised computer programm for standartizing tree-ring series. *Tree-Ring Bulletin* 29(1-2):15-20. Dostupné z WWW: <http://www.treeringsociety.org/TRBTRR/TRBTRR.htm>
50. Fritts, H.C., and T.W. Swetnam. 1989. Dendroecology - a tool for evaluating variations in past and present forest environments. *Adv. Ecol. Res.* 19:111-188.
51. Fritts, H.C., and X. Wu. 1986. A comparision between response function analysis and other regression techniques. *Tree-Ring Bulletin* 46:31-46. Dostupné z WWW: <http://www.treeringsociety.org/TRBTRR/TRBTRR.htm>
52. Grissino-Mayer, H.D. 1994. *The Science of Tree Rings*. Department of Geography, The University of Tennessee, Knoxville, Tennessee, USA. Dostupné z WWW: <http://web.utk.edu/~grissino/index.htm>
53. Grissino-Mayer, H.D., and H.C. Fritts. 1997. The International Tree-Ring Data Bank: An enhanced global database serving the global scientific community. *Holocene* 7(2):235-238.

54. Guiot, J. 1986. ARMA techniques for modeling tree-ring response to climate and for reconstructing variations of paleoclimates. *Ecol. Model.* 33(2-4):149-171.
55. Guiot, J. 1991. The bootstrapped response function. *Tree-Ring Bulletin* 51:39-41. Dostupné z WWW: <http://www.treeringsociety.org/TRBTRR/TRBTRR.htm>.
56. Gunnarson, B.E., A. Borgmark, and S. Wastegard. 2003. Holocene humidity fluctuations in Sweden inferred from dendrochronology and peat stratigraphy. *Boreas* 32(2):347-360.
57. Gunnarson, B.E., H.W. Linderholm, and A. Moberg. 2011. Improving a tree-ring reconstruction from west-central Scandinavia: 900 years of warm-season temperatures. *Clim. Dynam.* 36(1-2):97-108.
58. Gustavsen, H.G., R. Heinonen, E. Paavilainen, and A. Reinikainen. 1998. Growth and yield models for forest stands on drained peatland sites in southern Finland. *Forest Ecol. Manag.* 107(1-3):1-17.
59. Hasenauer, H., R.R. Nemani, K. Schadauer, and S.W. Running. 1999. Forest growth response to changing climate between 1961 and 1990 in Austria. *Forest Ecol. Manag.* 122(3):209-219.
60. Hauck, M., J. Zimmermann, M. Jacob, C. Dulamsuren, C. Bade, B. Ahrends, and C. Leuschner. 2012. Rapid recovery of stem increment in Norway spruce at reduced SO<sub>2</sub> levels in the Harz Mountains, Germany. *Environ. Pollut.* 164:132-141.
61. Hokka, H. 1997. Height-diameter curves with random intercepts and slopes for trees growing on drained peatlands. *Forest Ecol. Manag.* 97(1):63-72.
62. Hokka, H., and R. Ojansuu. 2004. Height development of Scots pine on peatlands: describing change in site productivity with a site index model. *Can. J. Forest Res.* 34(5):1081-1092.
63. Hokka, H., and T. Penttila. 1999. Modelling the dynamics of wood productivity on drained peatland sites in Finland. *Silva Fenn.* 33(1):25-39.
64. Hokka, H., H. Salminen, and E. Ahti. 2012. Effect of temperature and precipitation on the annual diameter growth of Scots pine on drained peatlands and adjacent mineral soil sites in Finland. *Dendrochronologia* 30(2):157-165.
65. Holmes, R.L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurements. *Tree-Ring Bull.* 44:69-75. Dostupné z WWW: <http://www.treeringsociety.org/TRBTRR/TRBTRR.htm>
66. Holmes, R.L., E.R. Cook, and P.J. Krusic. 1994. *Dendrochronology Program Library*. University of Arizona, Tuscon.
67. Hůnová, I., J. Máznová, and P. Kurfürst. 2014. Trends in atmospheric deposition fluxes of sulphur and nitrogen in Czech forests. *Environ. Pollut.* 184:668-675.
68. Hůnová, I., R. Novotný, H. Uhlířová, T. Vráblík, J. Horálek, B. Lomský, and V. Šrámek. 2010. The impact of ambient ozone on mountain spruce forests in the Czech Republic as indicated by malondialdehyde. *Environ. Pollut.* 158(7):2393-2401.
69. Chytrý, M., T. Kučera, and M. Kočí. 2001. *Katalog biotopů České republiky*. Agentura ochrany přírody a krajiny ČR, Praha.
70. Iritz, L., B. Johansson, and L. Lundin. 1994. Impacts of forest drainage on floods. *Hydrolog. Sci. J.* 39(6):637-661.
71. Jonsson, M.T., S. Fraver, and B.G. Jonsson. 2009. Forest history and the development of old-growth characteristics in fragmented boreal forests. *J. Veg. Sci.* 20(1):91-106.

72. Jyske, T., T. Holttä, H. Makinen, P. Nojd, I. Lumme, and H. Spiecker. 2010. The effect of artificially induced drought on radial increment and wood properties of Norway spruce. *Tree Physiol.* 30(1):103-115.
73. Karnet, P. 2008. Dendrochronologický průzkum růstových charakteristik. Disertační práce, Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.
74. Kirilyanov, A.V., E.A. Vaganov, and M.K. Hughes. 2007. Separating the climatic signal from tree-ring width and maximum latewood density records. *Trees-Struct. Funct.* 21(1):37-44.
75. Konôpka, B. 2002. Relationship between parameters of the aboveground parts and root system in Norway spruce with respect to soil drainage. *Ekol.Bratislava* 21(2):155-165.
76. Konôpka, B., M. Moravčík, J. Pajtík, and M. Lukáč. 2010. Effect of soil waterlogging on below-ground biomass allometric relations in Norway spruce. *Plant Biosyst.* 144(2):448-457.
77. Koprowski, M., and A. Zielski. 2006. Dendrochronology of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) from two range centres in lowland Poland. *Trees-Struct. Funct.* 20(3):383-390.
78. Korf, V. 1939. Příspěvek k matematické formulaci vzrůstového zákona lesních porostů /Contribution to mathematical definition of the law of stand volume growth). *Lesnická práce* 18:339-379.
79. Kroupová, M. 2002. Dendroecological study of spruce growth in regions under long-term air pollution load. P. 536-548, *J. For. Sci.*
80. Leal, S., T.M. Melvin, M. Grabner, R. Wimmer, and K.R. Briffa. 2007. Tree-ring growth variability in the Austrian Alps: the influence of site, altitude, tree species and climate. *Boreas* 36(4):426-440.
81. LHPprojekt. 2012. LHP pro LHC Městské lesy Boží Dar.LHPprojekt, Brno.
82. Lieffers, V.J., and R.L. Rothwell. 1987. Effect of drainage on substrate-temperature and phenology of some trees and shrubs in an Alberta peatland. *Can. J. Forest Res.* 17(2):97-104.
83. Linderholm, H.W., and B.E. Gunnarson. 2005. Summer temperature variability in central Scandinavia during the last 3600 years. *Geogr. Ann. A* 87A(1):231-241.
84. Linderholm, H.W., and K. Linderholm. 2004. Age-dependent climate sensitivity of *Pinus sylvestris* L. in the central Scandinavian Mountains. *Boreal Environ. Res.* 9:307-317.
85. Lomský, B., V. Šrámek, and R. Novotný. 2012. Changes in the air pollution load in the Jizera Mts.: effects on the health status and mineral nutrition of the young Norway spruce stands. *Eur. J. For. Res.* 131(3):757-771.
86. Lopatin, E., T. Kolstrom, and H. Spiecker. 2008. Impact of climate change on radial growth of Siberian spruce and Scots pine in North-western Russia. *Iforest-Biogeosciences and Forestry* 1:13-21.
87. MacDonald, S.E., and F.Y. Yin. 1999. Factors influencing size inequality in peatland black spruce and tamarack: evidence from post-drainage release growth. *J. Ecol.* 87(3):404-412.
88. Makinen, H., P. Nojd, H.P. Kahle, U. Neumann, B. Tveite, K. Mielikainen, H. Rohle, and H. Spiecker. 2002. Radial growth variation of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) across latitudinal and altitudinal gradients in central and northern Europe. *Forest Ecol. Manag.* 171(3):243-259.
89. Makinen, H., P. Nojd, and K. Mielikainen. 2001. Climatic signal in annual growth variation in damaged and healthy stands of Norway spruce *Picea abies* (L.) Karst. in southern Finland. *Trees-Struct. Funct.* 15(3):177-185.

90. Marttila, H., and B. Klove. 2010. Dynamics of erosion and suspended sediment transport from drained peatland forestry. *J. Hydrol.* 388(3-4):414-425.
91. Marttila, H., K.M. Vuori, H. Hokka, J. Jamsen, and B. Klove. 2010. Framework for designing and applying peak runoff control structures for peatland forestry conditions. *Forest Ecol. Manag.* 260(8):1262-1273.
92. McCarroll, D., N.J. Loader, R. Jalkanen, M.H. Gagen, H. Grudd, B.E. Gunnarson, A.J. Kirchhefer, M. Friedrich, H.W. Linderholm, M. Lindholm, T. Boettger, S.O. Los, S. Remmele, Y.M. Kononov, Y.H. Yamazaki, G.H.F. Young, and E. Zorita. 2013. A 1200-year multiproxy record of tree growth and summer temperature at the northern pine forest limit of Europe. *Holocene* 23(4):471-484.
93. McLaren, B.E., and J.K. Jeglum. 1998. Black spruce growth and foliar nutrient responses to drainage and fertilization: Wally Creek, Ontario. *Forest. Chron.* 74(1):106-115.
94. Mellert, K.H., J. Prietzel, R. Straussberger, K.E. Rehfuess, H.P. Kahle, P. Perez, and H. Spiecker. 2008. Relationships between long-term trends of air temperature, precipitation, nitrogen nutrition and growth of coniferous stands in Central Europe and Finland. *Eur. J. For. Res.* 127(6):507-524.
95. Minkkinen, K., J. Laine, and H. Hokka. 2001. Tree stand development and carbon sequestration in drained peatland stands in Finland - a simulation study. *Silva Fenn.* 35(1):55-69.
96. Moilanen, M., J. Hytonen, and M. Leppala. 2012. Application of wood ash accelerates soil respiration and tree growth on drained peatland. *Eur. J. Soil Sci.* 63(4):467-475.
97. Mosteller, F., and J.W. Tukey. 1977. *Data Analysis and Regression: a Second Course in Statistics.* Addison-Wesley Pub. Co., Reading, Mass, 588 s.
98. Míchal, I., and V. Petříček. 1999. *Péče o chráněná území. II., Lesní společenstva.* Agentura ochrany přírody a krajiny České republiky, Praha. 714 s.
99. MŽP. 2012. *Plán péče o NPR Rolavská vrchoviště 2012-2020.* Ministerstvo životního prostředí ČR, Praha.
100. MŽP. 2013. *Plán péče o NPR Božídarské rašeliniště 2013-2020.* ČR, Ministerstvo životního prostředí ČR, Praha.
101. Naurzbaev, M.M., M.K. Hughes, and E.A. Vaganov. 2004. Tree-ring growth curves as sources of climatic information. *Quaternary Res.* 62(2):126-133.
102. Naurzbaev, M.M., E.A. Vaganov, O.V. Sidorova, and F.H. Schweingruber. 2002. Summer temperatures in eastern Taimyr inferred from a 2427-year late-Holocene tree-ring chronology and earlier floating series. *Holocene* 12(6):727-736.
103. Neumann, U., and H. Rohle. 2001. The weather-dependent annual radial increment of Norway Spruce (*Picea abies* L. Karst.) in mountainous regions of Saxony. *Forstwiss. Centralbl.* 120(5):277-287.
104. Obidzinski, A., M. Kloss, and A. Cedro. 2009. Is spontaneous regeneration of raised mire vegetation possible? A case study of the 'Czarne Bagno' mire in the Bystrzyckie Hills, southern Poland. *Holocene* 19(2):229-239.
105. Paavilainen, E., and J. Päivänen. 1995. *Peatland Forestry: Ecology and Principles.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg, SRN.
106. Pitkanen, A., J. Turunen, T. Tahvanainen, and H. Simola. 2013. Carbon storage change in a partially forestry-drained boreal mire determined through peat column inventories. *Boreal Environ. Res.* 18(3-4):223-234.
107. Plíva, K., and E. Průša. 1969. *Typologické podklady pěstování lesů.* SZN, Praha.

108. Poleno, Z., Vacek, S., Podrázský, V. 2007. Pěstování lesů. II., Teoretická východiska pěstování lesů. Lesnická práce, Kostelec nad Černými lesy. 463 s. ISBN 978-80-7084-656-8.
109. Polomski, J., and N. Kuhn. 2001. Root habitus and wind stability of trees. *Forstwiss. Centralbl.* 120(5):303-317.
110. Polomski, J., N. Kuhn, and Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald Schnee und Landschaft. 1998. Wurzelsysteme. P. Haupt, Bern ; Stuttgart ; Wien. 290 s.
111. Prévost, M., A.P. Plamondon, and P. Belleau. 1999. Effects of drainage of a forested peatland on water quality and quantity. *J. Hydrol.* 214(1-4):130-143.
112. Průša, E. 2001. Pěstování lesů na typologických základech. Lesnická práce, Kostelec nad Černými lesy. 593 s. ISBN 80-86386-10-4
113. R Development Core Team 2007. R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Rakousko.
114. Regent Instruments Inc. 2009. WinDENDRO for Tree-Ring Analysis. Computer Program. Kanada.
115. Rybníček, M., P. Čermák, T. Kolář, and T. Žid. 2012. Growth responses of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) to the climate in the south-eastern part of the Českomoravska Upland (Czech Republic). *Geochronometria* 39(2):149-157.
116. Rybníček, M., P. Čermák, T. Žid, and T. Kolář. 2010. Radial growth and health condition of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst) stands in relation to climate (Silesian Beskids, Czech Republic). *Geochronometria* 36:9-16.
117. Ryšková, L., and H. Uhlířová. 1985. Vliv imisí na mrazuvzdornost jehličnatých dřevin. s. 339-361, VÚLHM. Praha
118. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Luft und Geologie. 2014. Referat Klima, Luft, Dresden. SRN.
119. Savva, Y., J. Oleksyn, P.B. Reich, M.G. Tjoelker, E.A. Vaganov, and J. Modrzyński. 2006. Interannual growth response of Norway spruce to climate along an altitudinal gradient in the Tatra Mountains, Poland. *Trees-Struct. Funct.* 20(6):735-746.
120. Savva, Y.V., F.H. Schweingruber, N.A. Kuzmina, and E.A. Vaganov. 2002. Sensitivity of diameter growth to annual weather conditions in Scots pine provenances at a Central Siberian location. *Silvae Genet.* 51(2-3):49-55.
121. Schweingruber, F.H. 2007. Wood Structure and Environment. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, SRN. 279 s. ISBN-13 978-3-540-48299-4.
122. Sherwood, J.H., N. Kettridge, D.K. Thompson, P.J. Morris, U. Silins, and J.M. Waddington. 2013. Effect of drainage and wildfire on peat hydrophysical properties. *Hydrol. Process.* 27(13):1866-1874.
123. Shiyatov, S.G., V.S. Mazepa, E.A. Vaganov, and F.H. Schweingruber. 1996. Summer temperature variations reconstructed by tree-ring data at the polar timberline in Siberia. 61-70 s.
124. Socha, J. 2012. Long-term effect of wetland drainage on the productivity of Scots pine stands in Poland. *Forest Ecol. Manag.* 274:172-180.
125. Speer, J.H. 2010. Fundamentals of tree-ring research. The University of Arizona Press, Arizona, USA.
126. StatSoft, Inc. 2013. STATISTICA 12. Computer Program. Oklahoma, USA.
127. Svoboda, M., S. Fraver, P. Janda, R. Bače, and J. Zenáhlíková. 2010. Natural development and regeneration of a Central European montane spruce forest. *Forest Ecol. Manag.* 260(5):707-714.

128. Svoboda, M., P. Janda, T.A. Nagel, S. Fraver, J. Rejzek, and R. Bače. 2012. Disturbance history of an old-growth sub-alpine *Picea abies* stand in the Bohemian Forest, Czech Republic. *J. Veg. Sci.* 23(1):86-97.
129. Šmelko, Š. 1982. Biometrické zákonosti rastu a prírastku lesných stromov a porastov. Veda, Bratislava, SR.182 s.
130. Šrámek, V., B. Lomský, M. Slodičák, V. Balcar, J. Kulhavý, P. Hadaš, K. Pulkrab, L. Šišák, L. Pěnicka, and M. Sloup. 2008. The Ore Mountains: Will Successive Recovery of Forests from Lethal Disease Be Successful? *Mt. Res. Dev.* 28(3-4):216-221.
131. Šrámek, V., R. Novotný, E. Bednářová, and H. Uhlřřová. 2007. Monitoring of ozone risk for forests in the Czech Republic: Preliminary results. *The scientific world journal* 7:78-83.
132. Šrámek, V., R. Novotný, M. Vejpusťková, I. Hůnová, and H. Uhlřřová. 2012. Monitoring of ozone effects on the vitality and increment of Norway spruce and European beech in the Central European forests. *J. Environ. Monitor.* 14(6):1696-1702.
133. Tardif, J., J.J. Camarero, M. Ribas, and E. Gutierrez. 2003. Spatiotemporal variability in tree growth in the Central Pyrenees: Climatic and site influences. *Ecol. Monogr.* 73(2):241-257.
134. Tobin, B., J. Cermak, D. Chiatante, F. Danjon, A. Di Iorio, L. Dupuy, A. Eshel, C. Jourdan, T. Kalliokoski, R. Laiho, N. Nadezhdina, B. Nicoll, L. Pages, J. Silva, and I. Spanos. 2007. Towards developmental modelling of tree root systems. *Plant Biosyst.* 141(3):481-501.
135. Tolwinski-Ward, S.E., M.N. Evans, M.K. Hughes, and K.J. Anchukaitis. 2011. An efficient forward model of the climate controls on interannual variation in tree-ring width. *Clim. Dynam.* 36(11-12):2419-2439.
136. Tuovinen, M., D. McCarroll, H. Grudd, R. Jalkanen, and S. Los. 2009. Spatial and temporal stability of the climatic signal in northern Fennoscandian pine tree-ring width and maximum density. *Boreas* 38(1):1-12.
137. Urbanová, Z., J. Bárta, and T. Pícek. 2013. Methane Emissions and Methanogenic Archaea on Pristine, Drained and Restored Mountain Peatlands, Central Europe. *Ecosystems* 16(4):664-677.
138. Vacek, S., L. Bílek, O. Schwarz, P. Hejcmanová, and M. Mikeska. 2013. Effect of Air Pollution on the Health Status of Spruce Stands A Case Study in the Krkonose Mountains, Czech Republic. *Mt. Res. Dev.* 33(1):40-50.
139. Vacek, S., M. Hejcman, V. Semelová, J. Remeš, and V. Podrazský. 2009. Effect of soil chemical properties on growth, foliation and nutrition of Norway spruce stand affected by yellowing in the Bohemian Forest Mts., Czech Republic. *Eur. J. For. Res.* 128(4):367-375.
140. Vacek, S., P. Hejcmanová, and M. Hejcman. 2012. Vegetative reproduction of *Picea abies* by artificial layering at the ecotone of the alpine timberline in the Giant (Krkonoše) Mountains, Czech Republic. *Forest Ecol. Manag.* 263:199-207.
141. Vaganov, E.A., K.R. Briffa, M.M. Naurzbaev, F.H. Schweingruber, S.G. Shiyatov, and V.V. Shishov. 2000. Long-term climatic changes in the Arctic region of the Northern Hemisphere. *Earth Sci.* 375(8):1314-1317.
142. Vaganov, E.A., M.K. Hughes, A.V. Kirilyanov, F.H. Schweingruber, and P.P. Silkin. 1999. Influence of snowfall and melt timing on tree growth in subarctic Eurasia. *Nature* 400(6740):149-151.

143. Vejputsková, M. 2008. Trendy tloušťkových a výškových přírůstků smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst) v oblastech s historicky odlišnými vstupy dusíku. Disertační práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Praha
144. Viewegh, J. 2003. Klasifikace lesních rostlinných společenstev : (se zaměřením na Typologický systém ÚHÚL). Česká zemědělská univerzita v Praze. Praha 208 s. ISBN 80-213-1061-8.
145. Villalba, R., T.T. Veblen, and J. Ogden. 1994. Climatic influences on the growth of sub-alpine trees in the Colorado front range. *Ecology* 75(5):1450-1462.
146. Vinš, B. 1961. Použití letokruhových analýz k průkazu kouřových škod. *Lesnictví* 7.
147. Vinš, B. 1962. Použití letokruhových analýz k průkazu kouřových škod. *Lesnictví* 8:263-280.
148. Vinš, B. 1963. Tree-Ring Studies in Czechoslovakia. *Communicationes Instituti forestralis Cechoslovenie* 3:192-196.
149. Wilson, R., and W. Elling. 2004. Temporal instability in tree-growth/climate response in the Lower Bavarian Forest region: implications for dendroclimatic reconstruction. *Trees-Struct. Funct.* 18(1):19-28.
150. Yamaguchi, D.K. 1991. A simple method for cross-dating increment cores from living trees. *Can. J. Forest Res.* 21(3):414-416.
151. Zach, J., and K. Drápela. 1991. Možnosti užití některých matematických funkcí ke standartizaci letokruhových sérií. *Lesnictví* 37:267-272.
152. Zahradníček, J. 2008. LHP pro LHC AOPK ČR- Karlovarský kraj.
153. Zang, C., and F. Biondi. 2013. Dendroclimatic calibration in R: The bootRes package for response and correlation function analysis. *Dendrochronologia* 31(1):68-74.
154. Zvára, K. 2008a. Biostatistika. Karolinum, Praha. 213 s. ISBN 978-80-246-0739-9.
155. Zvára, K. 2008b. Regrese. Matfyzpress, Praha. 253 s. ISBN 978-80-7378-041-8.