

Univerzita Palackého v Olomouci
Přírodovědecká fakulta
Katedra ekologie a životního prostředí



Růst letokruhů topolu kanadského a jeho bioindikační využití v hodnocení
kvality prostředí v lužním ekosystému

Martin Zýka
Diplomová práce

předložená
na Katedře ekologie a životního prostředí
Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci

jako součást požadavků
na získání titulu Mgr. v oboru
Ochrana a tvorba životního prostředí

Vedoucí práce: prof. MVDr. Emil Tkadlec, CSc.

Olomouc 2016

Zýka M. 2016. Růst letokruhů topolu kanadského a jeho bioindikační využití v hodnocení kvality prostředí v lužním ekosystému [diplomová práce]. Olomouc: Katedra ekologie a životního prostředí PřF UP v Olomouci. 49 s., česky.

Abstrakt

Lužní lesy jsou mimořádně exponované pro svůj vysoký produkční potenciál. Zranitelnost ekosystému současně zvyšují také probíhající klimatické změny. Stromy citlivě reagují na změny podmínek prostředí intenzitou svého růstu. Proměnlivost podmínek se dobře projevuje šířkou letokruhů. Stromy téhož druhu ze stejné oblasti mají tendenci vytvářet obdobné sekvence letokruhů. Dendrochronologická analýza topolu kanadského měla za cíl získat informaci o účincích hydro-klimatických poměrů na růst. Využil jsem 38leté letokruhové záznamy (1973–2010), které jsem porovnal s časovými řadami průměrných měsíčních charakteristik: maximální teplotou, srážkami a hladinou podzemní vody. Responses and correlation analýzou byl proveden užší výběr nejtěsněji korelujících charakteristik s letokruhovými daty. Mezi vytvořenou sadou modelů s nejvýznamnějšími charakteristikami se vybírá jeden model, který poskytuje nejlepší sblížení odhadu s pozorováním podle skóre AICc. Podle výsledků jsou roční přírůsty pozitivně ovlivněné zejména množstvím březnových srážek a negativně ovlivněné vyšší teplotou v červenci minulé růstové sezóny. Z růstové strategie topolu a jeho reakce na uvedené klimatické charakteristiky vyplývá jeho citlivost na dostatečné zásobování vodou. Dominantním zdrojem vláhy se zdají být srážky, u kterých je současně patrná korelace s hladinou podzemní vody. Neprojevily se dlouhodobé trendy růstu, které by průkazně souvisely s výskytem klimatických extrémů ani hydrologických poruch v lokalitě.

Klíčová slova: AICc, dendrochronologie, dplR, hladina podzemní vody, klima, lužní les, topol kanadský.

Zýka M. 2016. Annual growth rings of Canadian Poplar used for bioindication of environmental quality in a floodplain forest. [diploma's thesis]. Olomouc: Department of Ecology and Environmental Sciences, Faculty of Science, Palacky University Olomouc 49 p., Czech.

Abstract

Floodplain forests are exceptionally exploited because of their high production potential. The vulnerability of the ecosystem is further increased by ongoing climate change. Tree growth is sensitive to changes in environmental conditions. Ring widths are generally considered as a good indicator of variability of the environment. Trees of the same species from the same region tend to create a similar sequence of tree rings. Dendrochronological analysis of Canadian Poplar was designed to obtain information about the effects of hydro-climatic conditions on growth. I analysed 38-year old tree ring records (1973–2010) by comparing them with the time series of average monthly characteristics: maximum temperature, rainfall and groundwater level. Responses and correlation analysis was run to selection climatic characteristics that correlate with growth ring data most closely. From the set of candidate generalized linear mixed models created for the main characteristics of the model I selected the best one based on the lowest AICc (Akaike Information Criterion). I found that the annual increment of tree rings is increased with the amount of rainfall in March and decreased with temperatures in July last growing season. According poplar growth strategy, and its close relationship with those climatic characteristics, these findings indicate its high sensitivity to sufficient water supply. The dominant source of water appears to be precipitation, which is also correlated with the groundwater level. There was no evidence of long-term growth trends that could be significantly associated with the occurrence of climatic extremes or hydrological disturbances in the area.

Key words: AICc, Canadian Poplar, climate, dendrochronology, dplR, groundwater tabel level.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením prof. MVDr. Emila Tkadlece, CSc. a jen s použitím citovaných literárních pramenů.

V Olomouci 12. května 2016

.....

podpis

Obsah

Seznam tabulek	iii
Seznam obrázků	iv
Poděkování	v
Úvod	1
Topoly, typické dřeviny lužního lesa	1
Růst topolu	3
Vodním režim v lužních lesích	4
Stresové vlivy v lužním lese	6
Produkční vlastnosti topolu a jejich měření	9
Cíle práce	12
Materiál	13
Lokalita	13
Klima	13
Hydrologie	14
Benkovský potok	14
Oskava	15
Lužní les	16
Data	17
Metody	19
Zpracování vzorků	19
Odstranění věkového trendu (standardizace)	19
Úprava letokruhových řad	20
Sestavení stanovištní chronologie	21
Funkce pro odpověď a korelaci	21
Korelační funkce	22
Rekonstrukce klimatické variability pomocí modelů	22

Výsledky	24
Diagnostika vzorků topolu a synchronizace	24
Růstové charakteristiky a trendy	24
Výsledky analýzy vztahu růstu a hydro-klimatických podmínek	26
Diskuze.....	33
Závěr	36
Souhrn	37
Literatura.....	38

Seznam tabulek

Tabulka 1. Přehled základních charakteristik letokruhových dat a získaných chronologií	25
Tabulka 2. Průměrné měsíční charakteristiky úrovně hladiny podzemní vody (HPV), maximální teploty (T) a úhrnů srážek (P) za období 1973–2010. HPV je vzdálenost hladiny od povrchu měřená v m.....	27
Tabulka 3. Přehled koeficientů responsivní a korelační funkce. Sledované období začíná v červnu předchozího roku (označené $t-1$) a končí zářím daného aktuálního roku. Přehled neobsahuje měsíce zimní dormance. Responsivní (Resp.) a korelační (Corr.) koeficienty označené * patří proměnným, které tvoří významnou složku klimatického signálu.	27
Tabulka 4. Sada kandidátních modelů použitá pro statistickou analýzu ke stanovení významu vybraných klimatických proměnných pro letokruhovou chronologii. Každý model obsahuje klimatická data jako fixní efekty. Součástí modelů jsou náhodné vlivy roku ID stromu na intercept. T = průměrná měsíční maximální teplota; P = měsíční úhrn srážek, HPV = průměrná měsíční úroveň hladiny podzemní vody; $t-1$ = předchozí rok. Tabulka představuje 5 nejlepších modelů řazených podle velikosti rozdílu hodnot AICc a srovnání s modelem 1 (pouze intercept, bez prediktorů).	28

Seznam obrázků

Obr. 1. Letokruhové řady (nahore) znázorňující individuální rozdíly v délce a synchronizované časové řady letokruhových indexů po odstranění exponenciálního věkového trendu (dole)	24
Obr. 2. Autokorelační struktura ACF stanovištní chronologie topolu kanadského a zobrazení frekvenční variability signálu stanovištní chronologie ve vlnovém (wavelet power) spektru. Červené pole s černým obrysem představuje 95% úroveň spolehlivosti výsledku. Křížově šrafované pole vyjadřuje nízké frekvenční rozlišení signálu limitované velikostí vzorku. Signál je tedy bez jednoznačné periody.	26
Obr. 3. Výsledný model předpovědi červencových teplot minulé sezóny a množství březnových srážek odhadnutý pomocí generalizovaného aditivního smíšeného modelu se stejnou strukturou náhodných efektů jako GLMM. Tento model současně ukazuje, že efekty klimatických proměnných jsou lineární.	29
Obr. 4. Vliv březnového srážkového úhrnu na hladinu podzemní vody (vzdálenost v metrech od měrného bodu).....	30

Poděkování

Upřímné poděkování za odborné vedení, podporu a trpělivost patří vedoucímu diplomové práce prof. MVDr. Emilu Tkadlecovi, CSc. Dále děkuji Ing. Tomáši Kolářovi a Ing. Michalu Rybníčkoví, Ph.D. z Dendrochronologické laboratoře MZLU v Brně za pomoc se zpracováním letokruhových vzorků. Za spolupráci a poskytnutí cenných informací o stavu lužních lesů a problematice topolů děkuji lesním správcům revíru Střeň Jiřímu Hetmanovi a Josefu Vyroubalovi. Za detailnější seznámení s hydrologií území děkuji Ing. Olze Žerníčkové ze Správy CHKO Litovelské Pomoraví. Rád bych poděkoval i své rodině za jejich vytrvalou podporu během celého studia.

V Olomouci dne 12. května 2016

Úvod

Stromy jsou vytrvalé rostliny se schopností druhotného tloustnutí dřevnatého stonku. Díky činnosti dělivého pletiva strom během celého života roste. Proces růstu jedince je nezměnitelný, jednosměrný časový posun (Špinlerová 2014). Vysoký vzrůst je evolučně ekologickým důsledkem kompetice o světelné záření. Náklady na vybudování této struktury jsou vysoké energeticky i časově. I proto je hlavním determinantem distribuce dřevin a jejich společenstev charakter podnebí a dostupnost zdrojů. V mírném středoevropském podnebí je dostupnost zdrojů řízena střídáním ročních období. Na tyto změny dřeviny odpovídají fázemi letního růstu a zimního spánku. Nejviditelněji se účinek sezónní periodicity klimatu na růstové procesy projevuje tvorbou letokruhů (Fritts 1976).

Klíčovým zdrojem dřevin v lužním lese je voda. V našich krajích se plošně nejrozsáhlejší lužní lesy vyskytují v údolních nivách velkých řek (Douda 2009). Jsou součástí říční krajiny, tedy dynamického systému, jehož motorem je řeka (Štěrbá et al. 2008). Akumulační rovina podél vodního toku, která bývá zpravidla částečně či celá zaplavována, definuje údolní nivu (Demek 1988). Ploché údolní dno vyplňují sedimenty přenášené vodním tokem a usazené uvnitř zákrutů a meandrů nebo sedimentací na povrchu půdy za povodní (Smolová and Vítek 2007).

Dlouhodobá erozně-akumulační činnost řeky je zárukou pro stabilní obnovu a distribuci efemérních stanovišť (Černý 2010). Vzniklá vysoká heterogenita prostředí může být evolučním a ekologickým hot spotem pro velké množství organismů a životních strategií (Stettler 2009). Mnoho druhů prodělává životní cyklus v různých typech stanovišť, jejichž dostupnost v čase je regulována řekou (Poff 1997). Rostlinná společenstva jsou v průběhu roku vystavena široké škále hydrologických podmínek a značně rozkolísané hladině hydrického stresu od zaplavení po vysychání (Francis et al. 2005). Získané adaptace jim umožňují vyvíjet se a rozmnožovat v dynamicky proměnlivém prostředí. Lužní lesy jsou ukázkou jak časová a prostorová dynamika ovlivňuje variabilitu druhů i jejich úspěšnost.

Topoly, typické dřeviny lužního lesa

Velmi úspěšným rodem v lužních lesích je topol, *Populus*. Taxonomie rodu není jednotná. Euroameričtí taxonomové uvádějí počet druhů od 29 (Eckenwalder 1996) do 32 (Dickmann and Kuzovkina 2008). Asijská klasifikace uznává druhů více. Jenom v

Číně znají 47–50 druhů topolů (Wu and Raven 1999; Zheng 1985). Na našem území jsou původní 3 druhy a jeden kříženec rodu *Populus*: topol černý (*P. nigra*), topol bílý (*P. alba*), topol osika (*P. tremula*) a topol šedý (*P. alba* × *P. tremula*). Topol má nedostatek genetických izolačních mechanismů a snadno tak dochází k mezidruhovému křížení (EPA 1999). Hybridizace probíhá přirozeně či v umělých podmínkách. Vzniklé kříženci získávají lepší vlastnosti než rodičovské generace díky jevu heteroze. Nejžádanější jsou zlepšení růstových znaků (např. výška, průměr, objem) a odolnosti vůči chorobám, často bez ohledu na klimatické vlivy na tyto růstové vlastnosti (Chhin 2010). Nejvýznamnější skupinou hybridů na celém světě je *P. deltoides* × *P. nigra*, s botanickým názvem *P. × canadensis*, známé také jako euramerické nebo kanadské topoly (Richardson et al. 2014).

V našich klimatických podmínkách jsou topoly dominantní dřevinou nejvlhčích míst, zejména v blízkosti řek (Chytrý et al. 2010). V jejich přítomnosti běžně nacházíme i vrbu. Technicky jde o dřeviny s měkkým dřevem. Vžitý název společenstva měkký luh je odvozený od vlastností dřeva hlavních dominant. V obou případech nejde o dlouhověké dřeviny. Vlivem změn vlhkostních poměrů se může měkký luh změnit na luh tvrdý a vrbo-topolový tandem na sklonku jejich existence nahradí druhy s tvrdým dřevem: duby, jasany, jilmy, javory, olše.

Přirozená hrozba zániku vhodných stanovišť pro topol ovšem není reálná. S táním sněhu ve vyšších polohách přichází zpravidla každoroční jarní zvýšení průtoků v řekách a záplavy. Kinetická energie řek údolních niv je nízká a tak se vodou unášený jemný materiál usazuje. Po ústupu záplav zůstává na povrchu půdy vrstva hlinitých až jílovitých sedimentů a v řečišti mladé náplavy (Chuman et al. 2008). Na některých místech současně dojde k odstranění vegetace a otevření prostoru. Takto obnažené plochy nabízejí minimální prostorovou a světelnou konkurencí, která je nezbytná pro uchycení konkurenčně slabých druhů (Matějček 2009).

Topol je schopným kolonizátorem takových míst. Jejich životní cyklus je synchronizovaný s vodním režimem řeky (Lytle and Merrit 2004; Rood et al. 2013). Jedná se o velmi důležitou fenologickou adaptaci. Kvete brzy z jara jako jedna z prvních dřevin. Ve stejný okamžik dosahuje řeka vysokých průtoků a často se rozlévá do nivy. K uvolňování semen obvykle dochází krátce po kulminačním průtoku (Mahoney and Rood 1998). Drobná semena topolu jsou rozptýlena větrem nebo vodou během relativně krátké

doby a usazují se na holé, vlhké, čerstvě nanesené sedimenty (Rood et al. 2003). Právě skutečnost, že k rozptylu semen dochází s klesajícími průtoky v řece, zvyšuje pravděpodobnost, že semena přistanou na vhodném místě (Braatne et al. 1996). Semena jsou téměř bez endospermu a tedy bez potřebných zásobních látek a energie na prosazení se v konkurenčním prostředí nebo prorůstání hrabankou (Braatne et al. 1996). Jejich životaschopnost je proto velmi krátká, trvá jen několik týdnů. Jakmile semena usednou na holý, osluněný, vlhký substrát, klíčí už do 24 hodin (Braatne et al. 1996). Zásadní pro přežití a růst je udržet kontakt s půdní vodou (Mahoney and Rood 1998). Pouze vysoká plasticita kořenů dokáže udržet trvalý kontakt s podzemní vodou (Pilipovic et al. 2006). Za příliš rychlého poklesu zásob vody v půdě semenáčky podlehnou suchu (Lytle and Merrit 2004). Omezený vývoj či vysokou úmrtnost ovšem způsobuje i trvalé zamokření půdy, kde kořenový systém trpí nedostatkem kyslíku (Amlin and Rood 2002; Lytle and Merrit 2004).

Růst topolu

Po úspěšném zakořenění semenáčku následuje období intenzivního růstu. Diametrální růst topolu prochází 4 fázemi. V počáteční fázi je intenzita růstu objemu kmene nižší kvůli investicím energie do vybudování kořenového systému a růstu do výšky. Tato fáze trvá 3–7 let. V další zhruba 15leté fázi dochází k výraznému zrychlení růstu nadzemní části, které vrcholí 3. fází kolem 20. roku. Mezi 20. až 30. rokem života nastupuje poslední fáze zralosti, kdy diametrální i výšková expanze postupně klesá (Willms et al. 2006). Mladé stromky ročně přirostou do výšky 1 až 2 m (Kevan 2011). V 10 letech dosahují stromy výšky asi 5–8 m, ve 20 letech 8–12 m. Po 40 letech topol odroste všem potenciálním konkurentům. Jeho jediným konkurentem se stávají jedinci vlastního druhu (Stettler 2009).

Z těchto parametrů je jasné, že topoly patří mezi nejrychleji rostoucí stromy v mírných zeměpisných šířkách (Braatne et al. 1996), ale jejich vysoká produktivita je spojena s vysokými požadavky na vodu (Richardson et al. 2014). Mechanismus růstu je do značné míry podmíněn transpirací, tj. odpařováním vody z povrchu listů. Zdrojem energie je slunce, které ohřívá listy. Rozdíl teplot mezi listy a atmosférou pohání příjem vody kořeny a s ní rozpuštěné živiny. Tím vzniká tzv. transpirační proud. Voda opouští list otevřenými průduchy. Opačným směrem vstupuje CO₂. Ten je důležitým zdrojem uhlíku pro asimilaci fotosyntetických produktů, které jsou nezbytné pro růst a reprodukci. Příjem CO₂ dosahuje normálních rychlostí jen v úzkém rozsahu dostatečného zásobování vodou.

Při nedostatku nebo nadbytku vody se průduchy zavírají, tím se zpomaluje výměna CO₂ a omezuje fotosyntéza a produktivita (Stettler 2009; Špinlerová 2014). Pro topoly je typická vysoká úroveň transpirace. Produkční potenciál je podpořený pozicí na osluněných a vodou dobře zásobených stanovištích. Topol spotřebuje transpirací během vegetační sezóny obrovské množství vody. Uvádí se spotřeba až 500 litrů vody na vytvoření 1 kg sušiny za sezónu. Pro srovnání u borovice je to 170 litrů, u buku 350 litrů, u kukuřice 370 litrů (Celjak 2010). Přirovnání topolu k "vodnímu čerpadlu" schopnému snižovat hladinu podzemní vody nemusí být přehnané (Pilipovic et al. 2006).

Vodním režim v lužních lesích

Doplňování zásob podzemních vod probíhá zejména mimo vegetační období (říjen až březen) a souvisí s průtokovým režimem řeky. Při vyšších jarních průtocích roste infiltrační plocha, ze které voda prosakuje do podloží (Hadaš et al. 2006). Půdní profil se nasýtí vodou a nastavené vlhkostní podmínky jsou příznivé pro začátek nového vegetačního období. V průběhu vegetační sezóny dochází k výrazným ztrátám vlhkosti půdy transpirací vegetace (Hybler 2010). Doplňování srážkovou vodou se děje jen sporadicky a pouze v případě déletrvajících vydatných srážek. Méně vydatné srážky jsou prakticky okamžitě spotřebovány na pokrytí vláhové potřeby lesa (Šeda 2013). Ve srážkově deficitní oblasti lužních lesů je hlavním zdrojem vody pro transpiraci podzemní voda. Ukázkou je situace v lužních lesích povodí řeky Dyje, kde množství spotřebované vody pochází ze 70 % z podzemních zásob a pouze ze 30 % ze srážek.

Kolísání hladiny podzemní vody je známou skutečností, kterou popisuje hned několik prací. V oblasti dolního toku Moravy a Dyje hladina každoročně kolísá v rozmezí od 1 do 2 metrů (Prax et al. 2006). V oblasti Litovelského Pomoraví to je kolem 1 metru (Šeda 2013). Pokles hladiny má do určité míry příznivý vliv na kořeny, protože dochází k provzdušnění půd a útlumu redukčních půdních procesů (Prax et al. 2006). Rizika souvisí s poklesem hladiny podzemní vody až do štěrkopískového podloží a rychlosti změny, která bývá proměnlivá. Příklad naměřené kritické rychlosti poklesu hladiny vůči tempu růstu kořenů je 2,5 cm/den (Lytle and Merrit 2004). Vyšší rychlost poklesu způsobí ztrátu kontaktu s vodou. Poklesem podzemní vody do štěrkového podloží se přeruší kapilární přítok do svrchních půd a omezí potřebná vláha v kořenové zóně (Šeda 2013). V takové situaci se voda stává limitujícím faktorem. Svrchní půdy mají velmi proměnlivou mocnost. Snadno se může vyskytovat lokální vysychání půd nebo jejich zamokření s negativním dopadem na vitalitu lesa. Kritickou hodnotu poklesu hladiny podzemní vody

lze určit z hloubky štěrkopískového podloží (Hadaš et al. 2006). Komunikace vodního toku s podložím souvisí rovněž s velikostí toku a jeho zahloubením. Průsak vody z menších vodních toků do podloží bývá omezený kolmatací dna, tedy zmenšováním pórovitosti a propustnosti jemnými sedimenty (Šeda 2013).

Zjevná periodicitu v ročním kolísání hladiny podzemní vody je zcela přirozeným jevem v lužních lesích, které jsou na specifický vodní režim dlouhodobě adaptované (Prax et al. 2006). Vodní režim se projevuje nejvíce na architektuře kořenů (Šeda 2013; Špinlerová 2014). Topoly říčních niv vytváří hluboký kořenový systém do úrovně hladiny podzemní vody, který často proniká až do štěrkopískového podloží. Pro případy omezené dostupnosti podzemní vody vytváří i soustavu jemných kořenů ve svrchním půdním profilu pro příjem kapilární vody ze srážek. Ovšem mělké kořeny mají nižší kapacitu pro přenos vody do xylému. Hlavní potřeby transpirující koruny pokrývají hluboké kořeny. Situace, kdy kořeny nemají přístup k podzemní vodě, vyvolává stres a výrazně klesá růst. Topol může investovat do prodloužení hlubokých kořenů pro udržení kontaktu s podzemní vodou.

Druhou strategií je rozvinout mělký kořenový systém a spoléhat na přísun atmosférických srážek (Singer et al. 2012). Povrchový kořenový systém je náchylnější ke klimatickým a půdním změnám. Pro výběr strategie je rozhodující, zda k omezené dostupnosti vody dojde v průběhu vegetačního období nebo zda dřevina trpí nedostatkem vody již od počátku vegetačního období. V prvním případě strom investuje spíše do rozvoje mělkého kořenového systému, ale vliv vodního stresu je na metabolismus silnější. Naopak, rostli rostlina od počátku vegetace v suchu, má hlouběji pronikající kořenový systém, silnější kutikulu, méně průduchů a relativně menší listovou plochu, čímž se suchu účinněji vyhýbá (Špinlerová 2014). Obě adaptivní strategie jsou běžné u mladých stromů, ale s rostoucím věkem schopnost přizpůsobení klesá (Singer et al. 2012).

Nedostatek vody není jediným rizikem. Dlouhodobé zamokření má paradoxně srovnatelnou fyziologickou odpověď jako nedostatek vody. V zamokřené půdě hlubší kořeny začnou trpět hypoxií, tedy nedostatkem kyslíku a odumřou. Optimální obsah kyslíku v půdě je 10 až 12 % (Špinlerová 2014). Omezený kořenový systém není schopen dodávat dostatečné množství vody k uspokojení poptávky transpirace (Stettler 2009). Uvádí se, že topol je schopný stát bez poškození ve vodě zhruba 50 dní (Dickmann and Kuzovkina 2008). Pro srovnání vrba vydrží zaplavení v průměru až 190 dní v roce, v

extrémních případech až 300 dní (Špinlerová 2014). Odolnost vůči zaplavení neplatí paušálně, ale roste s rostoucí koncentrací kyslíku ve vodě. Platí, že s klesající teplotou vody stoupá rozpustnost kyslíku ve vodě z atmosféry (Skořepa 2006). Proto zaplavení studenou prokysličenou jarní vodou lužní lesy snáze vydrží. Částečnou prevencí vůči nedostatku kyslíku během zaplavení je také pohyblivost vody v půdním horizontu.

Stresové vlivy v lužním lese

Je zjevné, že voda je základní podmínkou pro růst, ale v extrémních případech může působit také jako stresový faktor. Na lužní les, potažmo samotný strom působí několik různých rušivých vlivů a jejich kombinací, které vyvolávají stres. Příirozeně se jedná o fyzikální nebo biologické stresory, které se liší se rozsahem, intenzitou, pravidelností i frekvencí (Marron et al. 2014; Míchal 1994). Přechodné, lokální události, které zabíjí, potlačují nebo narušují vývoj, označujeme jako disturbance (Horčíčková 2015). Stresový podnět vyvolává tlak, který nejčastěji ovlivňuje procesy růstu u jednoho nebo více jedinců. Abiotické stresové podmínky způsobují rozsáhlé ztráty v zemědělství a lesnictví na celém světě. V případě rodu *Populus* jsou to nejčastěji dopady sucha, zasolení nebo extrémní teploty, které jsou předmětem intenzivního výzkumu (Marron et al. 2014).

Pojem sucho je nejčastěji používán ve smyslu meteorologického sucha, které souvisí s nedostatkem srážek. Při nedostatku vody v půdě postupně nastupuje sucho zemědělské. Pokud deficit srážek nadále pokračuje, vzniká hydrologické sucho, které se projevuje na zásobách povrchových vod. Další pokles množství vody má dopady na stavy podzemní vody (Blinka 2009). Typickými fyziologickými projevy sucha u topolů jsou snížené přírůstky radiální kmenové, vadnutí a padání listů a usychání větví (Michael L. Scott, 1999).

Fyziologické sucho způsobují vysoké koncentrace solí v půdě, které omezují nebo znemožňují příjem vody kořeny. Mezi topoly je nejcitlivější k zasolení hybridní topol kanadský. Experimentální průměrná míra přežívání byla pouze 2,5 % při koncentracích 138 mM NaCl (Marron et al. 2014). Chlorid sodný je klasická kamenná sůl běžně používaná jako chemický posyp komunikací při teplotách kolem -7 až -9 . Intenzivní solení je častou příčinou chřadnutí lesa (Vavřínek 2004). Citlivým obdobím je konec zimy a počátek jara, kdy roztoky solí pronikají do porostu, vsakují se do půdy a mohou kontaminovat podzemní vody. Zejména během mírné zimy jsou kořeny topolu již aktivní. Škodlivý účinek posiluje stagnace vody v porostu.

Vegetační období znamená intenzivní růst spojený s nejintenzivnější komunikací a výměnou látek a energií s prostředím (Špinlerová 2014). Z toho důvodu se topol stává jednou z nejčastěji používaných dřevin v fytořemediaci, a hraje významnou roli při sanaci kontaminovaných lokalit (Pilipovic et al. 2006). Některé klony jsou velmi účinné při vychytávání těžkých kovů, organických rozpouštědel, ropných produktů, herbicidů, pesticidů, radionuklidů a hnojiv (Richardson et al. 2014). Úrodné nivy řek bývají intenzivně zemědělsky obdělávané a pro luhy je potencionálním rizikem nadměrné používání pesticidů a dusíkatých hnojiv (AOPK 2008). Kořeny přicházejí do kontaktu s polutanty ze splachů z ošetřených polí. Krátkodobé experimenty neprokázaly přímé toxické účinky běžných herbicidů. Poškození se předpokládá při dlouhodobém působení těchto sloučenin (Burken and Schnoor 1998). Bilanční přebytky dusíku zhoršují zejména kvalitu povrchových a podzemních vod. Časté výsadby topolů kolem melioračních kanálů plní funkci detoxikačního orgánu. V optimálních podmínkách se nadbytky dusíku projevují intenzivním růstem (Pilipovic et al. 2006). Vyprodukovaná biomasa má nevyzrálou řídkou strukturu, která je náchylná na poškození mrazem (Špinlerová 2014).

Společně s vodním režimem má klíčovou roli teplota. Vedle přímého účinku indukuje změny i u řady dalších faktorů. Současné a budoucí změny klimatu souvisí s teplotou. Aktuální růst teploty si drží desetileté tempo růstu 0,2 °C a ani pro příští desetiletí se neočekává zpomalení (IPCC 2007). Oblast jihomoravských luhů hlásí vzrůst průměrné roční teploty vzduchu o více než 1 °C za období 1961 až 2000. Ve stejném období průměrné teploty vzduchu pro měsíce IV. – IX. vzrostly dokonce o 1,5 °C (Bagar et al. 2001). Délka vegetačního období se prodloužila. V moravských úvalech s lužními lesy trvá 220–240 dní (Pokladníková et al. 2008). De Boeck et al. (2010) upozorňuje na častější výskyt vlny veder. Regulérně se jedná o období sedmi po sobě jdoucích dnů s teplotami nad dlouhodobým průměrem. Přípustný je jeden den s nižší teplotou. S globálním růstem teplot lze očekávat častější výskyt horkých období s rostoucí délkou trvání i intenzity. Podle výstupů z meteorologických měření pro západní Evropu vlnu veder doprovází o 69 % více hodin slunečního svitu, 78 % méně srážek, a to o 17 % méně relativní vlhkosti ve srovnání s běžné průměry (Boeck et al. 2010).

Z lesnického pohledu je lesní ekosystém adaptován na klimatické hodnoty zhruba dlouhodobého 50letého průměru (Bagar et al. 2001). Spíše než dlouhodobé změny průměrných hodnot jsou pro živé organismy daleko závažnější právě extrémy, jako výkyvy teplot, pozdní mráz a silný zimní mráz (Pokorný 1999). Nadprůměrné teploty

během vegetační sezóny mají obvykle pozitivní vliv na radiální růst. Extrémně vysoké teploty již poškozují pletiva a narušují metabolismus. Nejcitelněji se projevují u metabolicky neaktivnějších pletiv – listů a kořenů (Špinlerová 2014). Na extrémní teploty jsou topoly zvláště citlivé (Marron et al. 2014). Experimentální odhad minimální teploty pro optimální rozvoj kořenů je u topolu kolem 14 °C (Marron et al. 2014). Optimum pro kořenovou aktivitu u většiny dřevin je 20 °C (Špinlerová 2014). Chladná půda s teplotou pod 5 °C se chová jako fyziologicky suchá. V přirozeném prostředí nepřežijí teplotu nižší -46 °C nebo překračující 38 °C po dobu delší než jednoho týdne (Demeritt 2016). Čím delší dobu vysoká teplota působí, tím škodlivější je její účinek. K poškození listové tkáně a poruchám metabolismu dochází při překročení kritické teploty, která například u topolu kanadského kolísá mezi 43 až 47 °C (Marron et al. 2014).

Na aktuálním radiálním přírůstu se výrazně projevuje průběh teplot předchozí sezóny. U topolu má v tomto případě největší význam červnová a červencová teplota z předchozího roku v kombinaci s ročním průtokem a letními srážkami (Skolaut 2012). Pro příznivý růst by průměrná teplota v období červen–srpen neměla klesat pod 15 °C (Nikl and Soušek 2015). Vysoké letní teploty spojené s vysokou mírou transpirace a nedostatkem srážek mohou omezit dostupnost živin pro následující sezónu. Nízké přírůsty se projeví zejména v případě, když srážky z tohoto období jsou podprůměrné (Singer et al. 2012).

Riziko chřadnutí lesa může představovat také ozon v přízemní vrstvě atmosféry. Jeho koncentrace za posledních 100 let několikanásobně vzrostly. Ve vyšších koncentracích je toxický a v současné době je považován za nejvýznamnější plynnou škodlivinu ovlivňující zdravotní stav evropských lesů (Šrámek et al. 2007). Oxidativní stres snižuje množství chlorofylu v listech a efektivitu fotosyntézy a celkově odolnost stromu. Je dobře známo, že topoly jsou obecně citlivé na O₃ a patří mezi nejcitlivější dřeviny na zvýšené koncentrace O₃ (Marron et al. 2014).

Vytrvale rostou koncentrace také oxidu uhličitého v atmosféře. Zvýšený obsah CO₂ v ovzduší zpočátku stimuluje fotosyntézu a vede k rychlejšímu růstu a vyšší produkci (Marron et al. 2014). Zkoumáním topolů bylo zjištěno souběžné působení CO₂ a O₃. Tyto plyny jsou současně přijímány otevřenými průduchy listů, ale jejich účinky se vzájemně vyrušují (Šrámek et al. 2007). Škody způsobené O₃ se vyrovnávají přínosem z vyšší asimilace CO₂ (Richardson et al. 2014), ale někdy zvýšený příjem CO₂ může podpořit škodlivý účinek O₃ (Marron et al. 2014).

Zvýšená stresová zátěž se projevuje na množství nahodilých těžeb, tak i procentem nezdaru obnovy lesních kultur (Bagar et al. 2001). Dlouhodobě v našich lesích absolutní výše nahodilých těžeb v m³ znatelně roste. Relativní nárůst nahodilých těžeb ve vztahu k celkové výši ročních těžeb je mírnější. Nejnižší relativní podíl nahodilé těžby na celkové těžbě byl v roce 1956 a 1959 (9 %), nejvyšší v letech 1985 (83 %), 1993 (81 %) a 2007 (80 %), za období po roce 1989 je průměrný podíl nahodilé těžby 44 %. Nejčastější příčinou jsou nepříznivé klimatické vlivy (Čermák 2013). Vedle abiotických rizik se na vitalitě dřeviny podílí aktivity člověka. Lužní lesy a okolní niva jsou mimořádně exponované pro svůj vysoký produkční potenciál. Vysoký tlak na lesy je důsledkem vysoké koncentrace osídlení a hospodářských aktivit (Hybler 2010). Prokázané jsou případy poškození porostu následky vodohospodářských úprav v povodích, výstavba a provoz malých vodních elektráren, zvýšených odběrů vody v prameništích skupinových vodovodů, a následné změny vodního režimu (Šeda 2013). Velkoplošné odvodňování zemědělských pozemků zhoršilo vodní poměry stanovišť. Tím se některá stanoviště stala vysychavá, na jiných zůstává stojatá voda déle.

Do dynamiky růstu zasahuje také způsob lesního hospodaření (Dohnanský et al. 2015). Zúčastněné dřeviny mají většinou rozdílný růstový rytmus a v určitých růstových stupních se navzájem potlačují. V hustém zápoji dřeviny soutěží o zdroje. Výchovné a těžební zásahy v porostu upravují kompetiční vztahy za účelem zlepšení produkce. Snížení kompetice způsobuje často náhlé, setrvalé a výrazné zvýšení přírůstu (Fraver and White 2005). Intenzita odpovědi často souvisí s věkem, kdy u mladších jedinců je výrazná, u starších se snižuje. Topol špatně snáší přítomnost dalších jedinců. I slabý boční zástin deformuje jeho růst (Šenkýř 2015). Na uvolnění růstového prostoru odpovídá značným objemovým přírůstem.

Produkční vlastnosti topolu a jejich měření

Díky vysoké produkční schopnosti se topol stal osvědčenou dřevinou lužních stanovišť. Uvádí se, že až 40 % současných lužních evropských lesů je tvořeno převážně topolovými plantážemi (Vybíral and Čupa 2009). Nejvíce vysazovanými jsou klony tzv. euroamerických topolů, tedy kříženců evropského a amerického topolu černého (*Populus x euroamericana* Dode/Guinier). Tyto klony vynikají především rychlým růstem a dobrou kvalitou dřevní hmoty, proto postupně vytlačily naše domácí druhy topolů, které se pro intenzivní způsoby pěstování nehodí pro výrazně horší kvalitativní i kvantitativní vlastnosti. Šlechtitelské úsilí se v zásadě zaměřuje na zlepšení růstových znaků, odolnost

vůči hmyzím škůdcům, houbovým chorobám, zejména listové rzi, a kvalitu dřeva, ale většinou bez ohledu na klimatické vlivy na tyto růstové vlastnosti (Chhin 2010). Tento přístup může posílit vnímavost šlechtěných topolů, které v limitujících podmínkách mají potenciál být ideálním indikačním druhem proměnlivosti prostředí.

Jednou z cest jak sledovat a kvantifikovat růstovou dynamiku je z radiálního přírůstku kmene. Šířka letokruhů uchovává poměrně dobře měřitelný vztah stanovištních podmínek a tloušťkového růstu (Fritts 1976). Základním principem je tvorba širokých letokruhů za vhodných podmínek a úzkých v nepříznivých. Odborné zázemí pro studium letokruhů poskytuje dendrochronologie. Základním postupem používaným v dendrochronologii je letokruhová analýza. Metodický postup pro široké uplatnění popisuje celá řada publikací např. (Cook and Kairiukstis 1990; Drápela and Zach 2000; Schweingruber 1996). Standardním postupem je formulace problému; příprava strategie odběru vzorků; odběr vzorků v terénu v dostatečném množství, délce a kvalitě; proměření šířek letokruhů v laboratoři a jejich datování s přiřazením roku vzniku letokruhu podle posloupnosti; odstranění věkového trendu; statistické a matematické operace, zpracování výsledků a jejich interpretace.

Letokruhové chronologie jsou spolehlivý archiv biologických signálů. Jejich praktické využití vyžaduje společný výskyt stromů. Míra vzájemné podobnosti růstové odezvy je totiž výchozím kritériem pro rekonstrukci stanovištních podmínek. Signál lze zjednodušeně vyjádřit pomocí tzv. Cookova modelu (Cook and Kairiukstis 1990):

$$R_t = A_t + C_t + \delta D_{1t} + \delta D_{2t} + E_t,$$

v němž R_t je výsledná šířka letokruhu v čase t , A_t je věkový trend, C_t je souhrnný signál pro klima, D_{1t} je signál endogenní disturbance, D_{2t} je signál exogenní disturbance společný pro všechny stromy na stanovišti a E_t je náhodná nevysvětlená odchylka, které jsou pro každý strom jedinečné. Prvky A_t , C_t a E_t jsou přítomné v každém letokruhu. K disturbancím nedochází každoročně, proto jsou prvky D_{1t} a D_{2t} opatřeny binárním indikátorem δ , určujícím přítomnost ($\delta = 1$) nebo absenci ($\delta = 0$). Snahou je oddělit signály letokruhové série za účelem získání těch, které souvisejí se změnami v rychlosti růstu způsobené klimatem a rušivými událostmi (Cook and Kairiukstis 1990). Část signálu přitom obsahuje nezajímavý šum způsobený růstovou změnou související s věkem. Odstranění věkového trendu lze provést převedením původních letokruhových hodnot na indexy (Fritts 1976). Provádí se metodami standardizace, jejichž volba musí

splňovat požadavek na zachování maximální proměnlivosti žádoucích signálů. Upravené letokruhové série jsou dále průměrovány a prověřovány testy shody růstové odezvy. Výsledná stanovištní chronologie je připravená pro korelační analýzu s vybranými klimatickými ukazateli (Drápela and Zach 2000).

Přítomné růstové anomálie neboli signatury lze určit jako náhlé změny v intenzitě růstu v období delším než 3 roky. Určují se pomocí prahových hodnot směrodatné odchylky, případně subjektivním rozhodnutím dendrochronologa (Schweingruber 1996). Jejich přítomnost může souviset s extrémními klimatickými podmínkami nebo událostmi způsobené člověkem. Proto se vyhodnocení růstové anomálie neobejde bez znalosti historie lokality (Stoffel and Bollschweiler 2008). Užitečným zdrojem informací jsou například místní kroniky, ročenky, snímky nebo přímá svědectví lidí. Odhalení dominantních růstových stresorů může impulsem k uchování příznivých ekologických poměrů i udržitelnému lesnímu hospodaření v lužních lesích.

Dendrochronologické metody jsou využívány pro výzkum ekologických i hydrologických jevů jsou ve světě hojně využívány a jejich obliba roste i u nás, jak ve svém přehledu uvádí (Šálek 2013). Při dodržení postupů jde o poměrně přesný nástroj, který umožňuje výzkum s velkým prostorovým i časovým rozsahem. V přírodním prostředí je růst velmi komplexní proces a výsledná interpretace výzkumu nemusí být vždy uspokojivá.

Cíle práce

Hlavním cílem této studie je využití dendrochronologie pro zhodnocení citlivosti radiální růstové odezvy topolu kanadského k proměnlivosti klimatu a vodnímu režimu části povodí Benkovského potoka ve snaze posoudit kvalitu prostředí lužního lesa a pochopit některé řídicí mechanismy.

Dílčími cíli jsou:

- Zpracovat přehled o zákonitostech růstu topolu kanadského v abiotické prostředí lužního lesa a možná rizika, zejména s důrazem na klima a vodní režim.
- Zmapovat historický vývoj lokality (z lesnického pohledu), posoudit aktuální stav porostu a předpokládaný další vývoj lokality.
- Vytvořit stanovištní chronologii topolu kanadského ze získaných letokruhových sérií.
- Vyhodnotit míru závislosti mezi ročním radiálním růstem a klimatickými a hydrologickým veličinami.
- Prezentovat dendrochronologickou analýzu jako nástroje stanovení environmentálních limitů a její uplatnění pro managementová opatření.

Materiál

Lokalita

Na soutoku Kobylníku a Benkovského potoka se nachází zhruba hektarový porost topolu kanadského (poloha 0,5 km severovýchodně od železniční stanice Střeň, 16 km severozápadně od Olomouce, 225 m n. m., 49°41'57.719"N, 17°9'47.481"E. Lokalita s místním názvem „Mezi vody“ je lužním lesem, který je součástí CHKO Litovelského Pomoraví. Předmětem ochrany jsou komplexy lužních lesů obklopující vnitrozemskou deltu přirozeně meandrujícího toku řeky Moravy, s vysokou biodiverzitou a ekologickou hodnotou území. Říční niva je důležitá z hlediska přirozené akumulace vod a zásobování olomoucké aglomerace pitnou vodou. Vodohospodářský význam stvrzuje titul Chráněná oblast přirozené akumulace vod Kvartér řeky Moravy. Lužní lesy mají významnou produkční funkci. Širší okolí nivy je intenzivně zemědělsky využíváno. Důležitá je protipovodňová funkce.

Klima

Lokalita patří podle atlasu podnebí do klimatické oblasti T2 (Quitt 1971), s teplým klimatem, mírnou zimou i létem. Průměrná roční teplota je 8,4 °C (stanice Olomouc). Nejchladnějším měsícem je leden (−3,1 °C), teplotní maxima se vyskytují v červenci (19,8 °C). Průměrný roční úhrn srážek (1961–1990) činí zhruba 570 mm (meteorologická stanice Olomouc), v posledních letech jen 450–500 mm (LHP Pomoraví 2000). Nejméně srážek spadne v únoru (23,5 mm), nejvydatněji prší v měsících červen a červenec (79,1 mm). Výjimečný byl červenec 1997 s úhrnem 267,6 mm a následné katastrofické povodně na Moravě. Většina stanic v ČR poslední dvě dekády minulého století a následující roky 21. století dokládá růst teplot vzduchu. Dlouhodoběji teplotně podprůměrná období 1968–1973 a 1976–1981. Teplotně nadprůměrné období zahrnuje roky 1998–2009, mimo rok 2005. Velmi chladný byl jen rok 1996. Rok s maximální roční průměrnou teplotou od počátku instrumentálních měření byl 2008 (10,5 °C). Hodnota 10 °C byla překročena také v letech 1992, 1994, 2000, 2007 a 2009. Velké vegetační období s průměrnou denní teplotou 5 °C a vyšší trvá 220–240 dnů, podíl srážek pro velké vegetační období je 66,3 % ročního úhrnu a na zbývající část roku jen 33,7 %. Rozložení srážek se mění. V teplém půlroce se stávají dlouhodoběji podprůměrné, např. 2003–2009. Růst teplot a delší vegetační období znamenají vyšší potřebu vláhy pro les. Nedostatek srážek umocňuje srážkový stín v závětrí Zábřežské vrchoviny a Úsovské vrchoviny.

Oblast se stává srážkově deficitní. Klimatickým extrémem byla dlouhá zima 1969/1970, která trvala asi 5 měsíců.

Hydrologie

Hydrologie území je řízena jednoduchým odtokovým režimem nivální horský (sněhový) s přesahem do komplexních režimů, podtypu kontinentální Evropa, kde hlavním zdrojem vod je tající sníh v horském masivu Jeseníků a v menší míře letní deště. Charakter dynamiky vodního zdroje se soustředí do středních nebo horských poloh, kde záleží na množství sněhu, rychlosti tání, intenzitě srážek, rychlost odtoku. Stálost průtoků je proměnlivá. Pro průběh hydrologického období jsou typické vysoké průtoky na jaře a nízké průtoky na podzim. Zásoby podzemní vody souvisí s průtoky blízkých toků, Moravy a Oskavy. Povrchové toky Benkovského potoka a Kobylníku díky kolmataci dna jemnými sedimenty komunikují s podložím omezeně. Vlhkostní podmínky půd reagují na dynamiku hladiny podzemní vody. Hladina podzemní vody mělké kvartérní zvodně v oblasti Litovelského Pomoraví kolísá v rozmezí kolem 2 m. Suché periody se projevují 1–2letým postupným poklesem hladiny až o 0,5 m oproti běžnému „chodu“, mokré periody potom podstatně rychlejším vzestupem hladiny a jejím následným návratem do původního stavu během cca 1–2 měsíců (Šeda 2013).

Benkovský potok

Benkovský potok a jeho povodí patří do Hornomoravského úvalu. Pramení u Králové v nadmořské výšce 260 m a u Štěpánova ústí zleva do Moravy v 218 m n. m. Délka toku: 23,7 km; plocha povodí: 45,8 km² průměrný průtok u ústí: 0,09 m³/s (PMO). Podstatná část povodí se využívá pro zemědělství, plocha orné půdy činí 64,5 %, lesní pozemky zabírají 27 %. Hodnoty plošného znečištění povodí ukazují bilanční přebytky dusíku na Benkovském potoce 32,04 kg/ha/rok, fosfor 0,37 kg/ha/rok. Podíl zranitelné plochy je 100 %. Tok je periodický. Stálost průtoků je silně pozměněná zejména převáděním vod z Oskavy. Spojení mezi Oskavou a Benkovským potokem tvoří vodoteče Třetí voda a Kobylník. Původně se jedná o přirozená ramena Oskavy, která dovytvářela síť vnitrozemské delty řeky Moravy. V rámci regulací a plošných meliorací byla Třetí voda napřimena a spádově vyrovnána. Stejná úprava (AOPK 2008) byla provedena v korytě Kobylníku vyjma úseku protékajícím lužními lesy CHKO, která má dosud přirozený charakter. Průtoky z Oskavy se do Třetí vody oddělují bočním jezem Zamykalka (*1914), do Kobylníku přes boční jez Včelínek. Účelem je odlehčení větších průtoků včetně

povodňových stavů na Oskavě, zajištění průtoků pro několik MVE, ochrana lesů a zemědělských pozemků před zaplavením. Původně stavidlové jezy byly v letech 1979 až 1981 přebudovány na pevné s přelivnou hranou bez pohyblivého stavidla. Technický stav jezů neumožňuje přerozdělování nízkých průtoků z Oskavy a koryta Třetí vody a Kobylníku během léta vysychají ($Q_{330} = 0,0 \text{ m}^3/\text{s}$). Negativně se projevují také přístupy péče o vodní toky. Mimo CHKO jsou koryta pročišťována, na území CHKO jsou takové zásahy omezené. Kanálový úsek Kobylníku přechází v lesním úseku do přirozeně meandrujícího s nižším spádem a kapacitou koryta díky sedimentům. Koryto kapacitně nestačí a dochází k přelívání vod do lesního porostu, kde poté stagnuje. Ekologický stav je potencionálně nevyhovující a z hlediska ochrany přírody neakceptovatelný (AOPK 2008; Šeda 2013). Jedná se vůbec o nejzávažnější problém z hlediska řešení bilancí říčních průtoků v CHKO LP.

Oskava

Oskava pramení v Hrubém Jeseníku nedaleko od horského sedla Skřítek, pod vrchem Bílý kamen, 855 m n. m. Úsek v zemědělské oblasti je tvrdě technicky regulovaný, napřímený a ohrazovaný. Podstatná část povodí se využívá pro zemědělství, plocha orné půdy činí 73 %, lesní pozemky 13 %. Hodnoty plošného znečištění povodí ukazují bilanční přebytek dusíku na Oskavě je 32,79 kg/ha/rok, fosfor 0,80 kg/ha/rok. Zdrojem jsou splachy z okolní zemědělsky obdělávané půdy. Nežádoucím jevem je eutrofizace. Podíl zranitelné plochy 75,8 % (povrchové nebo podzemní vody, zejména využívané nebo určené jako zdroje pitné vody). Celkový ekologický stav povodí je nevyhovující.

Podloží nivy vyplňují kvartérní štěrkopísky, které mají vysoké zvodnění a slouží jako zdroje pitné vody. V povodí Benkovského potoka je od roku 1988 provozováno prameniště Pňovice a Březové (č. j. Voda 2556/88-233.1-Bu). Evidence o množství měsíčních a ročních odběrů vod začíná rokem 1985. Čerpání vody probíhá na 30 vrtaných studní. Celková vydatnost jímacího území je 219 l/s, využitelná kapacita 161 l/s, z toho prameniště Březové: max. 58,4 l/s, Pňovice I: max. 58,4 l/s, Pňovice II: max. 43,8 l/s, Pňovice III: max. 58,4 l/s (PRVKÚ ČR, Olomoucký kraj). Z dlouhodobě naměřených dat blízkého vrtu VB0045 Štěpánov je možné vysledovat pokles hladiny podzemní vody s rostoucími objemy čerpaných vod.

Lužní les

Lužní lesy na revíru Střeň, přírodní lesní oblasti č. 34 - Hornomoravský úval. Velká část těchto porostů je pravidelně zaplavována jarní povodně (letní), při povodni v roce 1997 byla zaplavena převážná většina tohoto území. Hlavním zaměřením je produkce dřeva a ochrana přírody (Eichler); hospodaření v lužním lese ve správě LČR, s. p., LS Šternberk ve spolupráci se správou CHKO Litovelské Pomoraví (poloha v II. zóně CHKO, Evropsky významná lokalita, Ptačí oblast). V lužních lesích širšího okolí převládá jasan s dubem, na pravidelně zaplavovaných místech topoly, z převážné míry nepůvodní kříženci. Do charakteru současných stanovištních podmínek a druhové skladby se projevilo hospodaření v lesích i okolní nivě v minulosti. Klasifikačně se zkoumaný topolový porost podle Katalogu Biotopů ČR (Chytrý, Kučera, Kočí, 2001) nejbližší podobá kategorii L.2.3B - Tvrdé luhy nížinných řek. Lesy odpovídají třídě Mezofilní a vlhké opadavé listnaté lesy (Boublík et al. 2013) Svaz: *Alnion incanae* Pawłowski et al. 1928 - Údolní jasanovo-olšové luhy a tvrdé luhy nížinných řek; asociace: *Ficario vernaе-Ulmetum campestris* (Knapp ex Medwecka-Kornas 1952) - Středoevropské tvrdé luhy nížinných řek. V místním měřítku velmi vlhké varianty tvrdého luhu. Typologická klasifikace - 1G1 vrbová olšina lužní (*Saliceto-Alnetum*), s ohledem na lokální zamokření půd (Plíva 1976)

Půda je hluboká. Půdním typem je Glej kambická. Převažuje gleový proces, který souvisí se střídáním zaplavení a vysušení, respektive redukčního a oxidačního prostředí. Ve spodní části půdního profilu jsou patrné stopy trvalejšího zamokření (Zyka 2013). Stanoviště je rovinnaté homogenní se znaky mělké terénní deprese. Porost tvoří skupina 22 hybridních topolů na lesním pozemku s jednotnou velikostní, věkovou a prostorovou strukturou. Vysoko nasazené koruny vytvářejí plný zápoj s lokálním řídnutím. Svoji výškou dosahují nad úroveň okolních porostů. Výsadby topolů kanadských pochází z 50. let minulého století. V praxi je mýtní věk 50 let. Stáří porostu je kolem 70 let, přičemž přítomné stromy dosahují svého růstového i věkového maxima. Současné dimenze paty kmene již vylučují průmyslové zpracování. Přírozená obnova neprobíhá a s umělou obnovou se nepočítá. Zákon zakazuje vysazování geograficky nepůvodní dřevin v chráněných oblastech. Výchova a obnova v místních lužních lesích postupuje podle LHP. Mýtní těžba se provádí pasečným způsobem. Veškeré zásahy do porostní struktury se výrazně projevují v osvětlení korun, dostupnosti vody a živin v půdě.

Podle biologických nároků je topol kanadský světlomilný a teplomilný druh, citlivý na brzké nebo pozdní mrazy, silně závislý na hladině podzemní vody, zejména jsou-li místní roční srážky nižší než 600 mm. Optimální úroveň hladiny podzemní vody se pohybuje mezi 1–2 m. Vyhovují mu půdy hluboké >1m, bohaté na živiny a půdní vápník v kořenové zóně, s neutrální až alkalickou reakcí. Velmi citlivě reaguje na zasolení půd. Nesnáší konkurenci ostatních dřevin. Nejzávažnější fytopatologická rizika topolu jsou rez topolová (*Melampsora larici*); bakterióza topolů neboli korová nekróza (*Xanthomonas populi*), nekrotická skvrnitost listů (*Marssonina brunnea*), dřevokazná houba troudnatec kopytovitý (*Fomes fomentarius*), původce hniloby dřeva a lámání. Hmyzím škůdcem je nesytkva topolová (*Aegeria apiformi*), která poškozují vodivá pletiva kořenů a krčku a způsobilá jejich usychání. Současný zdravotní stav neukazuje na závažné poškození kmene a koruny, bez zjevných projevů houbového napadení.

Data

Dostupný materiál pro dendrochronologickou analýzu pochází z roku 2013, původně vytvořený pro účely zpracování bakalářské práce (Zýka 2013). Sérii tvoří kmenové vývrty z 22 jedinců topolu kanadského, z každého stromu pocházejí 2 vzorky odebrané kolmo k sobě z výčetní části kmene (DBH = 130 cm nad zemí). Pro měření a následné analýzy byly použity pouze kompletní, čitelné a nepoškozené vzorky. Vývrty nedosahují až do středu kmene a nepokrývají celou životní historii. Vstupním datovým souborem je 47letá posloupnost šířek letokruhů pro období 1964–2010, přesnost naměřených šířek letokruhů je 0,01 mm. Délka série je upravována podle délky klimatických a hydrologických dat.

Klimatická data pocházejí z monitorovacích stanic ČHMÚ Mošnov a Olomouc. Použitými veličinami jsou průměry měsíčních maximálních teplot a suma měsíčních úhrnů srážek, obojí za období 1973–2010. Data o stavu hladiny podzemní vody pocházejí z monitorovacího vrtu VB0045 Štěpánov (období 1965–2010) měsíční průměry hodnot.

Přehled ročních objemů čerpaných vod dokládají bilanční záznamy jímacího území Prameniště Březové, Pňovice I–III, poskytnuté s laskavým svolením VÚV TGM, v. v. i., Povodí Moravy, s. p., a MOVO Olomouc. Detailní informace o stanovištních podmínkách a způsobu hospodaření uvádí LHP a Plán péče CHKO. Přehled o charakteru lokálního klimatu doplňují údaje z místní kroniky obce Střeň. Údaje o hydrologii a

vodohospodářských úpravách studovaného území jsou dohledatelné v archivních materiálech Povodí Moravy a lesní správy revíru Střeň.

Metody

Provedené dendrochronologické analýzy dodržují standardní metodické postupy popsané v publikacích autorů Drápely a Zacha (2000), Cook et Kairiukstis (1990), Schweingruber (1996), Fritts (2001), dokumentace analytických dendrologických nástrojů pro R (R Development Core Team 2016).

Zpracování vzorků

Mechanické zpracování vzorků a základní diagnostika proběhla ve spolupráci s Dendrochronologickou laboratoří Ústavu nauky o dřevě MENDELU v Brně. Měření šířek letokruhů bylo provedeno pomocí měřicí lavice TIMETABLE vybavené binokulární lupou, poloautomatickým odčítacím zařízením a PC výstupem pro digitální záznam. Šířky letokruhů byly změřeny s přesností na 0,01 mm. Data byla importována do programu PAST4 pro vizuální a statistické zhodnocení za účelem získání souboru synchronních řad a odstranění poškozených nebo znehodnocených vzorků. Vodítkem pro synchronizaci jsou významné společné růstové znaky a přítomnost prvního podkorního letokruhu. Na základě vizuálního posouzení a míry podobnosti mezi letokruhovými řadami (korelační koeficient, *t*-test) bylo provedeno křížové datování s přidělením letopočtu jednotlivým letokruhům (angl. cross-dating). Synchronní průběh letokruhových řad reprezentuje účinek prostředí a klimatu na růst všech stromů. Tento princip je výchozí oporou pro využití letokruhů jako diagnostického nástroje prostředí.

Pro standardizaci dat, sestavení stanovištní chronologie, zpracování popisné statistiky a grafických výstupů jsem použil statistický software dplR: Dendrochronology Program Library in R (Bunn 2008).

Odstranění věkového trendu (standardizace)

Na šířce letokruhu se významně podílí věk stromu. Rozdílná intenzita růstu během života stromu je zcela přirozenou zákonitostí. Biologické účinky věku ovšem nesouvisí s cílem výzkumu, a proto je nutné je odstranit. Běžnou procedurou je standardizace dat, neboli detrendování či indexování. Jedná se o proces modelování věkového trendu pomocí matematických funkcí. Rozhodujícím kritériem pro výběr vhodné funkce jsou předpokládané vlastnosti trendu, které zpravidla závisí na délce letokruhové řady a zachycené životní fázi stromu.

Chybějící úseky letokruhů se nejčastěji týkají počátečních fází růstu, kdy vývrty nedosahují jádra stromu. V takových případech není možné se řídit vývojem růstu během celého života stromu. Směrodatnou se stává pouze jeho část. Příkladem nekompletních letokruhových řad je zkoumaný soubor vzorků topolu kanadského, v jehož přírůstových křivkách chybí juvenilní fáze. Předpokládaný trend se projevuje exponenciálním poklesem šířek letokruhů. Nastaveným požadavkům nejlépe vyhovuje deterministický odhad negativní exponenciální funkcí "ModNegExp".

Na modelování trendu navazuje porovnání původních a modelových (očekávaných) hodnot tloušťkového přírůstu. Poměrem obou hodnot se původní hodnoty převádí na letokruhové indexy jakožto bezrozměrné růstové indikátory. Výsledkem procesů jsou stacionární časové řady letokruhových indexů (ring-width index, RWI), které je možné objektivněji porovnávat s ostatními vlivy. Součástí procedur je generování grafů pro vizualizaci výstupů. Souhrnný přehled vlastností řad poskytují základní popisné statistiky.

Úprava letokruhových řad

K řešení daného problému jsou žádoucí spolehlivé chronologie s dostatečným množstvím vzorků. Spolehlivost je možné vyjádřit pomocí EPS (angl. Expressed Population Signal, vyjádřený populační signál). EPS vyjadřuje kvalitu signálu, který je společný pro všechny letokruhové série. V principu jde o průměrnou korelaci mezi všemi sériemi, která vyjadřuje míru společné variability. Interval hodnot je od nuly do jedné. Doporučeným prahem spolehlivosti chronologie je hodnota 0,85. Nižší hodnoty znamenají nejistotu v signálu způsobenou variabilitou v jednotlivých sériích, která je odrazem individuálních růstových reakcí každého stromu.

Výpočet EPS se provádí se všemi sériemi napříč každým rokem. Pro každý rok tedy platí jedna hodnota EPS. Problém představují roky, pro které není dostatek opakujících sérií. Tímto nedostatkem trpí zejména počátky chronologií, které souvisí s jejich různou délkou. Příčinou bývá krátký vrták pro odběr vzorků z jádra kmene stromu. Finální stanovištní chronologie by kvůli nízkým opakováním sérií směrem do minulosti nemohla poskytovat kvalitní signál. Objektivním řešením je odstranit nespolehlivé části chronologie nastavením kritické hodnoty EPS. Funkce `rwi.stats.running` vyhledává slabé úseky podle podprahových hodnot EPS v posuvném 30letém korelačním oknu. Ořezávání

chronologie je možné pouze v případě, kdy pokles hodnot EPS souvisí s nižším souborem sérií v minulosti.

Sestavení stanovištní chronologie

Jednotlivé řady letokruhových indexů jsou dále průměrovány za účelem vytvoření stanovištní chronologie. Postup průměrování probíhá mezi všemi indexy napříč roky. Pro výpočet v programu dplR slouží funkce `chron`, která standardně používá Tukey's Biweight Robust Mean. Tato metoda odstraní ze signálu nežádoucí efekty růstových odchylek na úrovni jedinců. Výsledkem je standardní stanovištní chronologie, která má poskytnout maximální úroveň společného signálu pro zkoumaný porost. Jistým omezením je přítomnost autokorelace (závislost určité časové hodnoty v řadě na hodnotách předchozích). Dodatečné užití autoregresních modelů odstraní vlivy autokorelace mezi sousedními letokruhy. Získaná reziduální chronologie je vhodnějším formátem pro některé typy analýz.

Funkce pro odpověď a korelaci

V úvodním vyhodnocování vztahu mezi tvorbou a šířkou letokruhu a klimatickými veličinami a jejich charakteristikami (Fritts 1976) jsem použil statistické funkce odpovědi a korelace (angl. Response and Correlation Function), odvozené z technik mnohonásobné regrese, které jsou vhodné pro statistické testování více proměnných (Cook a Kairiukstis 1990, Fritts 1976). Účelem těchto technik je užší výběr klimatických proměnných z původní rozsáhlé řady.

V prostředí R lze využít funkci `Response and correlation function analysis` jako součást balíčků `bootRes` a `treeclim`. Soubor vstupních proměnných tvoří reziduální chronologie, měsíční průměry maximálních teplot vzduchu, měsíční úhrny srážek a úroveň hladiny podzemní vody. Obecnému předpokladu závislosti růstu na podmínkách předešlé sezóny lze přizpůsobit výběr testovaného období specifikací vstupních parametrů výpočtu (např. Drápela a Zach 1995). Výchozím obdobím je červen předchozího roku až září roku následujícího. Označení měsíců využívá klasický formát celých čísel. Měsíce předchozí sezóny jsou označeny záporným znaménkem. Testovaným obdobím jsou roky 1973–2009.

Response funkce vytvoří modely odhadující letokruhové indexy na základě hodnot dosazených klimatických parametrů. Vypočtené response koeficienty vyjadřují účinek

konkrétní klimatické proměnné na modelovanou růstovou odpověď. Spolehlivost výpočtu zajišťuje opakované převzorkování podle integrovaného bootstrapping schématu. Velikost a znaménko koeficientů reprezentují míru odezvy přirůstání s přidělenou hladinou významnosti. Výběr proměnných vhodných pro rekonstrukci klimatu probíhá na základě dosažené hodnoty významnosti.

Korelační funkce

Funkční vztahy mezi proměnnými jsou měřeny pomocí korelačních koeficientů. Dovolují posuzovat podobnost odhadů letokruhových indexů vytvořených modelem s původními letokruhovými indexy. Sílu statistické podobnosti vyjadřuje Pearsonův korelační koeficient v intervalu od -1 do 1 .

Rekonstrukce klimatické variability pomocí modelů

Použitým nástrojem pro analýzu standardizovaných růstových reziduí pomocí generalizovaných lineárních smíšených modelů je balík lme4 (Bates a Maechler 2009) a balík nlme (Pinheiro *et al.* 2009)

Statisticky korektní zpracování předpokládá letokruhové řady očištěné od biologického účinku věku a autokorelace, se zachovaným souhrnným klimatickým signálem. Cílem je nalézt správný model, kterým je možné vysvětlit růstovou variabilitu. Výběr modelů a validačních postupů zohledňuje relativně malé množství a velikost vzorků a nezávislost jednotlivých klimatických proměnných.

Pro tento účel jsem použil generalizované smíšené lineární modely (GLMM) založené na regresní analýze. Vysvětlující proměnnou, neboli prediktorem, jsou předem vybrané měsíční klimatické charakteristiky. Pomocí prediktorů, neboli vysvětlujících proměnných, je možné odhadnout standardizované hodnoty chronologie, které jsou závislou, neboli vysvětlovanou proměnou modelu (tzv. prediktant). Od modelu se požaduje optimální vysvětlení variability růstové křivky, minimalizace náhodné chyby nevysvětlenou modelem a nejjednoduššího možné řešení.

Každý GLMM obsahuje kromě fixních efektů (např. klimatické vlivy) ještě náhodné efekty, které označují skupiny, v rámci kterých jsou měření korelovaná (tj. nejsou nezávislá). V modelech jsem použil dva náhodné efekty na intercept: (1) rok, který vyjadřuje skutečnost, že data sbíraná v rámci stejného roku nejsou nezávislá, a (2) identita jedince topolu, který vyjadřuje skutečnost, že opakovaná pozorování na stejném stromu

nejsou nezávislá, tj. mají tendenci si být více podobná než pozorování z různých stromů. Parametrickou regresní analýzu pomocí GLMM jsem doplnil generalizovanými aditivními smíšenými modely (GAMM) z balíku mgcv. Jde o neparametrickou regresi, kterou jsem použil ke znázornění účinků klimatických vlivů. Tyto modely současně testovaly, že efekty jsou lineární.

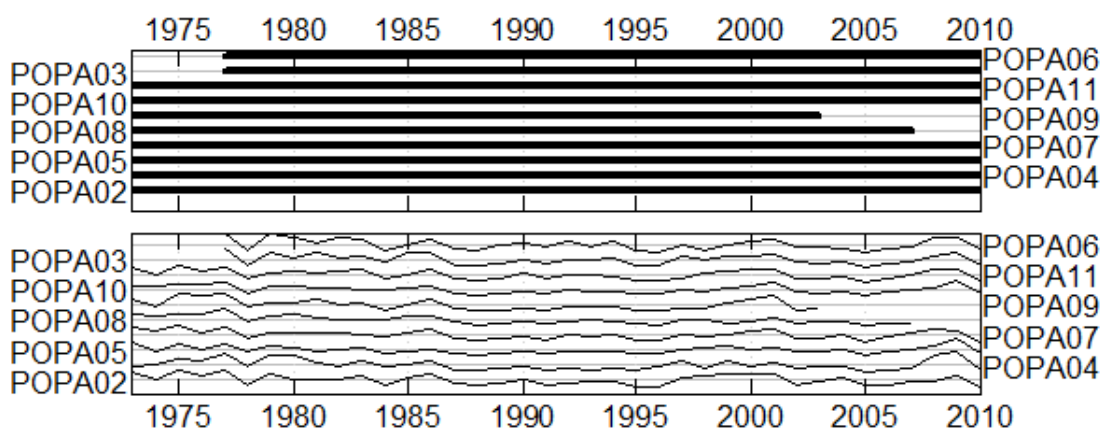
Možným postupem je vytvoření více modelů s různým výběrem prediktorů. Za nejlepší model jsem považoval model s nejnižší hodnotou AIC_c (Akaikeho informační kritérium, angl. Akaike Information Criterion), což je dnes běžný nástroj pro výběr modelů. Jedná se analytickou validační techniku, kterou se porovnávají rozdíly mezi modelem s prediktory a hypotetickým modelem bez prediktorů. Procedura AIC zároveň penalizuje počet proměnných v modelu. Tím se kombinují požadavky na spolehlivost i jednoduchost modelu. Přednost dostává model s nejnižší hodnotou AIC_c , tedy pro nejjednodušší model s největším množstvím vysvětlující informace. Rozdíl v AIC_c mezi nejlepším a druhým nejlepším modelem větší než 2 jsem považoval za jednoznačnou podporu pro nejlepší model.

Výsledky

Diagnostika vzorků topolu a synchronizace

Původní soubor vzorků obsahoval vždy 2 vývrty z celkem 22 stromů. Nepodařilo se zpracovat všechny vzorky kvůli poškození, postižení vývojovou poruchou či špatné čitelnosti záznamu. Takové vzorky bylo nutné odstranit. Z digitalizovaných letokruhových dat jsem vytvořil letokruhové řady a jejich křivky (obr. 1). Celkem 10 letokruhových řad původem z 10 stromů vyjadřuje dostatečně synchronní průběh bez výrazných individuálních reakcí, které vytvářejí objektivní předpoklad účinků klimaticky podmíněných vlivů prostředí na růst.

Společným nedostatkem letokruhových řad byla různá délka. Vysoká variabilita délek počátečních úseků neposkytovala dostatek záznamů pro jednotlivé roky. Požadovanou přesnost dat jsem získal úpravou délky podle úrovně společné variability vyjádřenou hodnotami EPS a nastaveným prahem 0,85. Společný pokles EPS a počtu záznamů směrem do minulosti byl dostatečným předpokladem pro aplikaci postupu. Slabé úseky, které nepřekračují nastavené kritérium EPS, byly odstraněny.



Obr. 1. Letokruhové řady (nahore) znázorňující individuální rozdíly v délce a synchronizované časové řady letokruhových indexů po odstranění exponenciálního věkového trendu (dole)

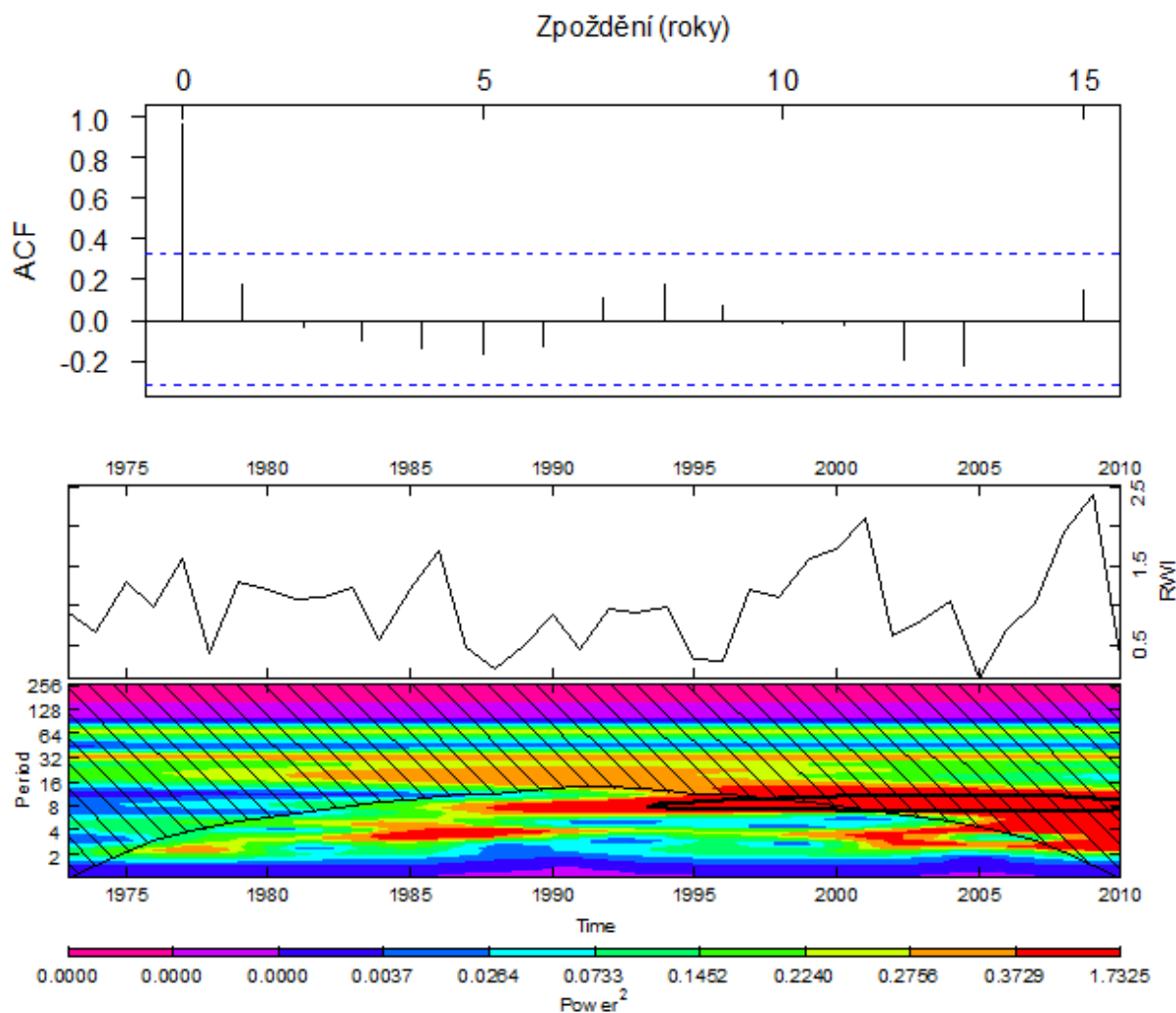
Růstové charakteristiky a trendy

Růstové charakteristiky sledované skupiny topolů informují o průměrném radiálním přírůstu 4,9 mm za rok společně s poměrně vysokou odchylkou 3,1 mm. Křivky jednotlivých řad zachycují životní fáze rané dospělosti až stáří. Pro zaznamenané životní období je typický exponenciální pokles růstu související s věkem. Průběh věkového

trendu biologicky definuje negativní exponenciální funkce. Standardizačními postupy jsem převedl letokruhové šířky na indexy. Touto procedurou se odstranil nežádoucí biologický účinek věku a autokorelace (obr. 1). Průměrováním indexových řad bylo možné odfiltrout individuální růstové odchylky a v konečné fázi vytvořit průměrnou stanovištní a reziduální chronologii. Výsledné chronologie jsou časové řady s délkou 38 let, s počátkem roku 1973 a koncem 2010 (obr. 3). Výsledné stanovištní a reziduální chronologie splňují požadavek stacionarity a zanedbatelných autokorelací mezi sousedními letokruhy.

Tabulka 1. Přehled základních charakteristik letokruhových dat a získaných chronologií

Základní parametry datového souboru	Charakteristiky
Původní data	
Maximální délka letokruhových řad (roky)	47
Zachycené časové období	1964–2010
Počet stromů	22
Velikost vzorku	44
Upravená synchronní data	
Maximální délka zkrácených letokruhových řad (rok)	38
Zachycené časové období	1973–2010
Počet stromů	10
Velikost vzorku	10
Letokruhové řady	
Průměrná šířka letokruhu (mm)	4,9
Směrodatná odchylka	3,1
Standardizovaná chronologie	
Průměrný letokruhový index	0,99
Směrodatná odchylka	0,54
Reziduální chronologie	
Průměrný letokruhový index	0,986
Směrodatná odchylka	0,497



Obr. 2. Autokorelační struktura ACF stanovištní chronologie topolu kanadského a zobrazení frekvenční variability signálu stanovištní chronologie ve vlnovém (wavelet power) spektru. Červené pole s černým obrysem představuje 95% úroveň spolehlivosti výsledku. Křížově šrafované pole vyjadřuje nízké frekvenční rozlišení signálu limitované velikostí vzorku. Signál je tedy bez jednoznačné periody.

Růstové charakteristiky doplňuje rozbor výskytu period v letokruhové chronologii. Existence period v letokruhovém signálu může upozorňovat na určitou provázanost růstu s klimatickými cykly. Výsledky kontinuální vlnkové (angl. wavelet) transformace časové řady naznačují 8letý cyklus. Spolehlivému potvrzení a interpretaci periody brání nízký počet vzorků, délka chronologie i produkční funkce lesa, která může znamenat zkreslení klimatické periody cyklem obnovy porostu.

Výsledky analýzy vztahu růstu a hydro-klimatických podmínek

K vyjádření vztahů bylo možné využít kompletní časové řady teplot, srážek a hladiny podzemní vody platné pro danou oblast za období 1973–2010. Přehled průměrných charakteristik uvádí tab. 2.

Hydro-klimatické prostředí charakterizuje celkem 48 proměnných pro každý měsíc v meziročním intervalu. Použitá funkce pro odpověď a korelaci vyhodnotily vliv každé proměnné na chronologii. Výsledné responsivní a korelačních koeficienty umožnily stanovit podíl vlivu jednotlivých proměnných. Charakteristiky s významným vlivem na chronologii bylo možné uplatnit jako zdroj potenciálních proměnných vhodných pro vytvoření modelu rekonstrukce klimatu (tab. 3).

Tabulka 2. Průměrné měsíční charakteristiky úrovně hladiny podzemní vody (HPV), maximální teploty (T) a úhrnů srážek (P) za období 1973–2010. HPV je vzdálenost hladiny od povrchu měřená v m.

Proměnná	Měsíc											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
HPV	2,3	2,2	2,0	2,1	2,2	2,4	2,6	2,6	2,7	2,6	2,5	2,4
T	1,2	3,3	8,3	14,1	19,7	22,4	24,4	24,4	19,3	13,8	6,9	2,3
P	26,4	25,7	29,8	44,1	71,4	79,1	71,2	59,2	58,4	37,3	43,2	30,7

Tabulka 3. Přehled koeficientů responsivní a korelační funkce. Sledované období začíná v červnu předchozího roku (označené $t-1$) a končí zářím daného aktuálního roku. Přehled neobsahuje měsíce zimní dormance. Responsivní (Resp.) a korelační (Corr.) koeficienty označené * patří proměnným, které tvoří významnou složku klimatického signálu.

Měsíc	HPV		Teplota (T)		Srážky (P)	
	Resp. koef.	Corr. koef.	Resp. koef.	Corr. koef.	Resp. koef.	Corr. koef.
Červen $t-1$	0,314*	0,313	0,082	0,149	0,051	0,068
Červenec $t-1$	0,005	0,135	-0,192	-0,357*	0,195	0,428*
Srpen $t-1$	-0,191	-0,010	-0,071	-0,163	0,127	0,186
Září $t-1$	0,001	0,082	-0,060	-0,082	0,231	0,261
Říjen $t-1$	0,018	-0,009	-0,108	-0,181	-0,046	0,136
Březen	-0,362*	-0,293*	0,010	0,070	0,169	0,415*
Duben	-0,207	-0,124	0,224	0,176	-0,010	-0,064
Květen	0,197	0,181	0,154	0,246	-0,165	-0,312*
Červen	0,183	0,145	-0,060	-0,008	0,047	0,338*
Červenec	0,010	0,023	-0,123	-0,185	0,035	0,270
Srpen	-0,205	-0,183	0,077	0,063	-0,113	-0,026
Září	-0,040	-0,047	-0,102	0,061	-0,062	-0,065

Obecně se jedná o klimatické proměnné s dlouhodobým účinkem na růst pro konkrétní měsíc v aktuálním nebo předešlém roce. Soubor vybraných proměnných obsahoval

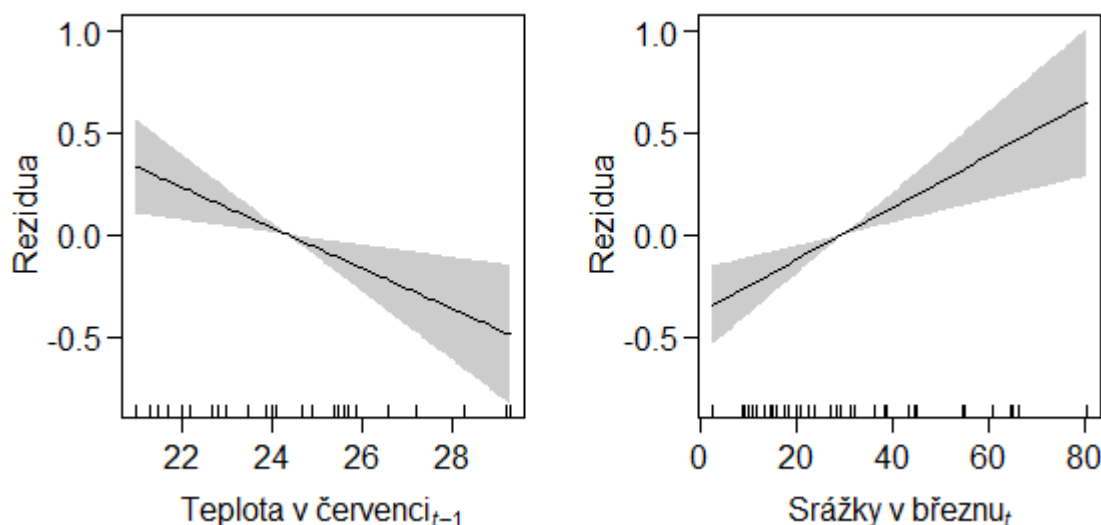
průměrnou úroveň hladiny podzemní vody pro červen v předešlém roce ($HPV.cerven_{t-1}$) a březen v aktuálním daném roce ($HPV.brezen$), dále maximální průměrné teploty pro červenec v předešlém roce ($T.cervenec_{t-1}$) a úhrny srážek pro měsíce červenec z předchozího roku ($P.cervenec_{t-1}$) a březen, květen a červenec v aktuálním roce ($P.brezen$, $P.kveten$, $P.cervenec$).

Schématem pro tvorbu sady kandidátních modelů byly výsledky předchozí analýzy a logická struktura. Vytvořené modely byly porovnávány na základě rozdílu hodnot informačního kritéria AICc, které vyjadřují různou úspěšnost odhadu relevantní informace. Nejnižší a tedy nejlepší informační skóre $AICc = 286$ získal model s fixními efekty proměnných $T.cervenec_{t-1}$ a $P.mar$.

Podle tohoto modelu se na růstu významně podílí loňské červencové teploty a aktuální březnové úhrny srážek. Detailnější pohled vyjadřuje negativní závislost mezi růstem a zvyšujícími se červencovými teplotami v předchozím roce (obr. 3). Naopak pozitivní efekt na růst souvisí s rostoucím množstvím březnových srážek. V obou případech platí lineární vztah.

Tabulka 4. Sada kandidátních modelů použitá pro statistickou analýzu ke stanovení významu vybraných klimatických proměnných pro letokruhovou chronologii. Každý model obsahuje klimatická data jako fixní efekty. Součástí modelů jsou náhodné vlivy roku ID stromu na intercept. T = průměrná měsíční maximální teplota; P = měsíční úhrn srážek, HPV = průměrná měsíční úroveň hladiny podzemní vody; t-1 = předchozí rok. Tabulka představuje 5 nejlepších modelů řazených podle velikosti rozdílu hodnot AICc a srovnání s modelem 1 (pouze intercept, bez prediktorů).

Model	AICc	$\Delta AICc$
$T.cervenec_{t-1}+P.brezen$	286,27	0,00
$T.cervenec_{t-1}+P.brezen+HPV.cerven_{t-1}$	287,94	1,68
$T.cervenec_{t-1}+P.brezen+HPV.brezen$	288,02	1,76
$P.cervenec_{t-1}$	292,97	6,70
$T.cervenec_{t-1}+P.cervenec_{t-1}$	292,98	6,72
1	313,73	27,47

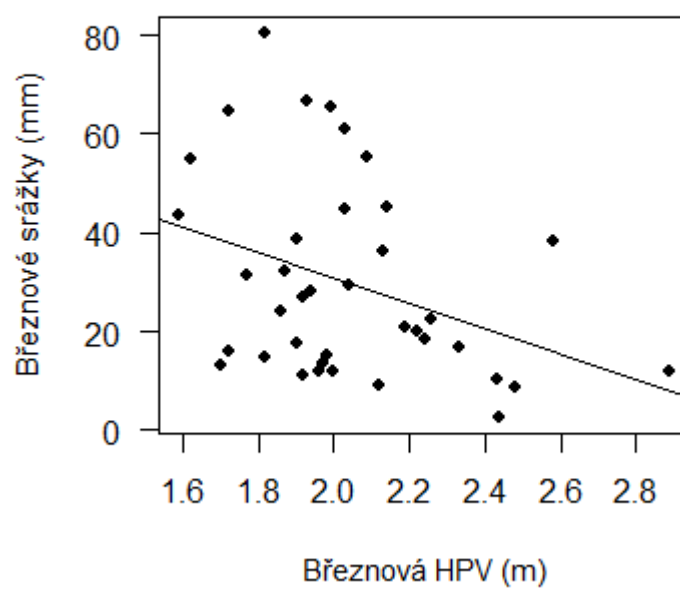


Obr. 3. Výsledný model předpovědi červencových teplot minulé sezóny a množství březnových srážek odhadnutý pomocí generalizovaného aditivního smíšeného modelu se stejnou strukturou náhodných efektů jako GLMM. Tento model současně ukazuje, že efekty klimatických proměnných jsou lineární.

Výsledný klimatický model neobsahuje parametr HPV. Srážky představují silnější prediktor než HPV a společně s teplotou vysvětlují podstatnou část variability signálu. Platnost závěru vyplývá z 2. a 3. modelu, kde parametr HPV nezlepšil skóre AICc, protože nepřináší novou informaci, která by vysvětlila zbylou variabilitu signálu. Rozdíly mezi nejlepšími modely jsou tak v podstatě řízeny stupni volnosti, které se zvyšují s počtem parametrů modelu.

Zajímavé je srovnání modelu $T.cervenec_{t-1}+P.cervenec_{t-1}$ s modelem $P.cervenec_{t-1}$. Rozdíl mezi modely je nepatrný a projevuje se zde podobný efekt jako v předchozím případě. Podle tohoto srovnání je účinek červencové teploty velmi slabý a podstatnou část variability signálu vysvětlují pouze červencové srážky.

Nízký efekt HPV a silný efekt srážek napovídá o možné interakci obou faktorů. Mezi HPV a srážkami skutečně existuje korelace, která platí zejména mezi březnovým úhrnem srážek, kdy s množstvím úhrnů roste výška hladiny podzemní vody (obr. 4). Výsledek je důkazem důležitosti srážek jako zdroje obnovy zásob podzemní vody a vláhý pro růst topolu.



Obr. 4. Vliv březnového srážkového úhrnu na hladinu podzemní vody (vzdálenost v metrech od měrného bodu)

Diskuze

Ve své diplomové práci jsem se zabýval letokruhovým přírůstem topolu kanadského a jeho srovnáním s hydro-klimatickými daty pro danou oblast. Výsledky ukazují na těsný vztah s některými klimatickými veličinami. Topol nejcitlivěji reagoval na březnové srážky a červencové teploty. Výsledek této práce odráží dostupné zázemí a možnosti výzkumu. Proces růstu je velmi komplexní a samotný letokruhový záznam neposkytuje jednoznačnou příčinu.

Těsný vztah růstu topolu a množství březnových srážek vyjadřuje zvýšenou potřebu vláhy na počátku nové vegetační sezóny. Březnové srážky příznivě ovlivňují půdní vlhkost. V jarním období dochází k doplňování zásob podzemních vod z tajícího sněhu při nízké intenzitě výparu. Hladiny podzemních vod dosahují svého maxima. V průběhu sezóny s rostoucí teplotou a intenzitou evapotranspirace zásoby podzemních vod a půdní vláhy klesají. Dosycení stanoviště vodou významnými srážkovými úhrny v březnu může být prevencí vůči nedostatku vody před vrcholem růstové sezóny (Prax et al. 2006; Šeda 2013).

Negativní účinky vysokých červencových teplot pravděpodobně nesouvisí s teplotním stresem a poškozováním listových pletiv, ale spíše indikují citlivost topolu na nedostatek vláhy. Horká léta jsou stále běžnější. Častější je výskyt vysokých až velmi vysokých teplot. S tím souvisí nízké úhrny srážek, nižší relativní vlhkost vzduchu, zmenšená oblačnost a vysoký počet hodin slunečního svitu. Důsledkem je vysoká evapotranspirace, která zvyšuje nedostatek vody v půdě a současně prohlubuje dopady sucha. To má přirozený vliv na transpiraci a asimilaci fotosyntetických produktů, které jsou nezbytné pro růst a reprodukci (Bagar et al. 2001; Pokladníková et al. 2008)

Výsledná šířka letokruhu na konci růstové sezóny se projevuje jako výsledek dvou procesů oddělených v čase. Radiální přírůst u topolů začíná po rašení pupenů. To znamená, že zásobní látky z předchozí sezóny jsou investovány nejdříve do tvorby prýtů a listů (pionýrská povaha) a až poté pro tvorbu a diferenciaci pletiv kmene. Účinnost procesů se projevuje v úzkém rozsahu dostatečného zásobování vodou, na kterém se březnové srážky pravděpodobně podílejí. Počáteční činnost kambia podpořená množstvím zásobních látek z předešlé sezóny a vody určuje kapacitu vybudovaných vodivých pletiv a nepřímo produkční potenciál celé sezóny (Richardson et al. 2014; Špinlerová 2014).

Produkční potenciál je řízen transpirací, která je limitována dostatečným množstvím vody a kapacitou vodivých pletiv. Z toho je možné vyvodit výhodu nižších červencových teplot, které jsou nejčastěji doprovázené deštivějším charakterem počasí. Výskyt intenzivních atmosférických srážek může dokonce dočasně zvrátit klesající trend hladiny podzemní vody a podpořit transpiraci a současně asimilaci živin pro následující sezónu. Fyziologická odpověď neodporuje známým mechanismům růstu (Stettler 2009; Špinlerová 2014). K velmi podobným výsledkům dospěla ve své práci Skolaut (2012).

Převažující pozitivní efekt srážek lze vysvětlit jako ekologický benefit. Proměnlivé HPV se topol dokáže účinně do jisté míry přizpůsobovat (Singer et al. 2012) bez výrazných projevů na diametrálním růstu. Srážky na jaře nebo v létě poté mohou působit jako pozitivní stimulant růstu.

V chronologii topolu jsou patrné některé krátkodobé výkyvy, které je obtížné interpretovat. Mohou souviset s výskytem místních klimatických extrémů nebo se změnou sociálního postavení a konkurenční vztahy uvnitř porostu. Možný vliv čerpání vod nebylo možné prokázat. Odběry vody z jímacího území Pňovice – Březové vyvolávají snížení hladiny asi 0,5 m s dosahem zóny ovlivnění pod 1 km. Vzdálenost studované lokality se sledovanými topoly od jímacího území je kolem 2 km.

Práce svým měřítkem představuje úvodní vhled do procesů, které platí pro konkrétní oblast. Zjištěné výsledky mají význam pro orientaci mezi klíčovými faktory růstu podmíněných klimatem. Konkrétně vyjadřují důležitost vody pro existenci, růst a vývoj topolů. Tyto závěry se mohou stát vodítkem např. pro vodárenské nakládání s vodami s respektem k ekologickým potřebám lužního lesa. Vedlejší ambicí práce je prezentovat dendrochronologii jako klasickou metodu hodnocení stavu lesa. V kombinaci se stále výkonnějším softwarem představuje jeden z nejpřesnějších nástrojů pro výzkum nejen životního prostředí, ale také příčin a efektů extrémních jevů. Fungující lesnictví i ochrana přírody takové nástroje potřebuje.

Převažují experimentální studie nad terénními. Zásadní jsou ovšem práce pro reálné prostředí (Marron et al. 2014). České studie zaměřené na topoly a jejich ekologii v přirozeném prostředí téměř nejsou. Dominují práce zabývající energetickým využitím topolů. Skromným cílem této práce je rozšířit povědomí o biologii topolu kanadském, který nese označení ochránářsky nežádoucí, ekonomicky nezajímavé dřeviny, ale dodnes plní důležitou roli stabilizace břehů (Baroš et al. 2013).

Možnost dalšího studia představuje vyhodnocování růstových period a případných souvislostí s klimatickými cykly. Nutnou podmínkou jsou dostatečně dlouhé letokruhové záznamy z více stromů a z rozsáhlejší oblasti. Účinky periodických hospodářských aktivit je možné eliminovat výběrem lokalit s přirozeným vývojem lesa.

Závěr

Zpracování signálu extrahovaného ze šířek letokruhů dovoluje nahlédnout do některých přírodních procesů, které ovlivňovaly růst v minulosti, jsou zodpovědné za stav v přítomnosti, a které jistě budou určovat směr dalšího vývoje v budoucnosti. Letokruhový záznam topolu kanadského ukazuje 38letý vývoj podmíněný zejména množstvím březnových srážek a teplotou v červenci minulé růstové sezóny. Z růstové strategie topolu dohromady s těsnou vazbou na uvedené klimatické charakteristiky vyplívá jeho citlivost na dostatečné zásobování vodou. Dominantním zdrojem vláhy se zdají být srážky, u kterých je současně patrná korelace s hladinou podzemní vody. Podrobná znalosti dynamiky vod v lužním lese si pro další studium vyžádá kvalitnější dlouhodobá měření hydro-klimatických charakteristik. Detailnější rozbor účinků abiotického prostředí nejen na růst topolu kanadského může poskytnout pouze dlouhodobý monitoring pomocí sítě automatických stanic s pravidelným měřením hladiny podzemní vody, teploty a vlhkosti půdy, teploty a vlhkosti vzduchu, s měřením srážek a průtoků na řekách (Hadaš et al. 2006). Jemnější rozlišení růstových reakcí je možné stanovit z rozdílné hustoty mezi jarním a letním dřevem, anatomické stavba letokruhu nebo obsah stabilních izotopů uhlíku ($\delta^{13}\text{C}$) a kyslíku ($\delta^{18}\text{O}$) z celulózy buněčných stěn. Každá metoda nachází různé uplatnění podle zadání, rozpočtu a dalších potřeb výzkumu. Rostoucí význam těchto metod bude odrážet potřebu vyhodnocovat rozmary měnícího se klimatu i různých zájmů člověka na stav lesa.

Souhrn

Zpracovaná diplomová práce se zabývá studiem proměnlivosti klimatu a vodního režimu v lužním lese nedaleko Střene v CHKO Litovelské Pomoraví a jejich vlivu na vitalitu topolu kanadského na základě analýzy růstu letokruhů. Získané výsledky lze shrnout do následujících bodů:

1. Dostatečné zásobení vodou se jeví jako klíčové pro příznivý růst topolu kanadského.
2. Přísun vláhy v březnu na počátku sezóny se jeví jako zásadní stimulant růstu.
3. Nepříznivé účinky rostoucích červencových teplot často souvisejí s vodní deficitem, které naopak mohou být zmírněny dostatečným množstvím srážek.
4. Nejsou patrné dlouhodobé trendy růstu, které by průkazně souvisely s výskytem klimatických extrémů ani hydrologických poruch v lokalitě.
5. Modelované odhady nejsou v rozporu s biologií topolu a věrně vysvětlují reálné jevy a procesy.

Literatura

- Amlin NM, Rood SB. 2002. Comparative tolerances of riparian willows and cottonwoods to water table decline. *Wetland. Wetlands* 22:338-346.
- AOPK. 2008. Rozbory chráněné krajinné oblasti litovelské pomoraví. Litovel:Správa Chráněné krajinné oblasti Litovelské Pomoraví
- Bagar R, Klimánek M, Klimánková Z. 2001. Sucho, nezdar zalesnění a nahodilé těžby v jihomoravském regionu. In: Sucho, hodnocení a predikce, (Rožnovský J, Janouš D, eds). Brno:Ústav pro hospodářskou úpravu lesů.
- Baroš A, Bulíř P, Černý K, Franková I, Holub V, Hrubá T, et al. Břehové porosty vodních toků. In: Proceedings of the Břehové porosty vodních toků, 2013. Průhonice, (Baroš A ed)Výzkumný ústav Silva Taroucy pro krajinu a okrasné zahradnictví, v. v. i.
- Blinka P. 2009. Klimatologické hodnocení sucha na území čech a moravy v letech 1875-2002 Praha:Univerzita Karlova.
- Boeck HJD, Dreesen FE, Janssens IA, Nijs I. 2010. Climatic characteristics of heat waves and their simulation in plant experiments. *Global Change Biology* 16:1992-2000.
- Boublík K, Douda J, Hédl R, Chytrý M. 2013. Vegetace české republiky 4. Lesní a křovinná vegetace. Praha:Academia.
- Braatne JH, Rood SB, Heilman PE. 1996. Life history, ecology, and conservation of riparian cottonwoods in north america. In: Biology of populus and its implications for management and conservation, (Stettler RF, Bradshaw HD, Heilman PE, Hinckley TM, eds). Ottawa:NRC Research Press, 57-86.
- Bunn A. 2008. A dendrochronology program library in r (dplR). *Dendrochronologia* 26:115-124.
- Burken JG, Schnoor JL. 1998. Predictive relationships for uptake of organic contaminants by hybrid poplar trees. *Environ Sci Technol*:3379-3385.
- Celjak I. 2010. Pěstování topolů pro energetické účely – 1.
- Cook E, Kairiukstis L. 1990. Methods of dendrochronology. Applications in the environmental sciences. Dordrecht:Kluwer Academic Publishers and International Institute for Applied Systems Analysis.

- Čermák P. 2013. Ochrana lesa a dřevinné vegetace [Internet]. akela.mendelu.cz: [citováno 5. 3. 2016]. Dostupné na:
https://akela.mendelu.cz/~xcepl/inobio/inovace/Ochrana_lesa_a_drevinne_vegetace/
- Černý R. 2010. Tůňe nivy řeky lužnice - dynamika vývoje a změny po povodních Živa 58:55-59.
- Demek J. 1988. Obecná geomorfologie. Praha:Academia.
- Demeritt ME. 2016. Poplar hybrids (populus spp.) [Internet]. na.fs.fed.us: [citováno 5. 4. 2016] Available:
http://na.fs.fed.us/pubs/silvics_manual/volume_2/populus/populus.htm.
- Dickmann DI, Kuzovkina J. 2008. Poplars and willows of the world, with emphasis on silviculturally important species. In: Poplar and Willows in the World, (Commission IP, ed). Rome:FAO, 134.
- Dohnanský T, Kotek K, Lidický V, Morávek F, Novák J, Půlpán L, et al. 2015. Program trvale udržitelného hospodaření v lesích. Hradec Králové:Lesy České republiky.
- Douda J. 2009. O vegetační proměnlivosti a původu současných lužních lesů. Živa 2.
- Drápela K, Zach J. 2000. Dendrometrie (dendrochronologie). Brno:Mendelova zemědělská a lesnická univerzita.
- Eckenwalder JE. 1996. Systematics and evolution of populus. In: Biology of populus and its implications for management and conservation, (Stettler RF, Bradshaw HD, Heilman PE, Hinckley TM, eds). Ottawa:NRC Research Press, 7-32.
- EPA. 1999. Biological aspects of hybrid poplar cultivation on floodplains in western north america: A review. Seattle.
- Francis RA, Gurnell AM, Petts GE, Edwards PJ. 2005. Survival and growth responses of populus nigra, salix elaeagnos and alnus incana cuttings to varying levels of hydric stress. Forest Ecology and Management 210:291-301.
- Fraver S, White AS. 2005. Identifying growth releases in dendrochronological studies of forest disturbance. Canadian Journal of Forest Research 35:1648-1656.
- Fritts H. 1976. Tree rings and climate. London:Academic Press.

- Hadaš P, Rojas Galvis JJ, Kulhavý J. 2006. Monitoring abiotických faktorů ekosystému lužních lesů v oblasti jižní moravy. Brno:Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně.
- Hybler V. 2010. Voda jako určující faktor zdravého lužního lesa. Brno:Mendelova zemědělská a lesnická univerzita.
- Chhin S. 2010. Influence of climate on the growth of hybrid poplar in michigan. *Forests* 1:209-229.
- Chuman T, Lipský Z, Matějček T. 2008. Stav poznání o vlivu extrémních záplav na vegetaci údolních niv. In: *Změny v krajině a povodňové riziko*, (Langhammer, ed). Praha:Univerzita Karlova, 226–232.
- Chytrý M, Kučera T, Kočí M, Grulich V, Lustyk P, eds. 2010. Katalog biotopů české republiky. Praha:Agentura ochrany přírody a krajiny ČR.
- IPCC. 2007. Summary for policymakers. In: *Climate change 2007: The physical science basis contribution of working group i to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, (Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, et al., eds). Cambridge:Cambridge University Press, 18.
- Kevan P. 2011. Confusing cottonwoods Ontario Arborist
- Lytle DA, Merritt DM. 2004. Hydrologic regimes and riparian forests: A structured population model for cottonwood. *Ecology* 85: 2493-2503.
- Mahoney JM, Rood SB. 1998. Streamflow, requirements for cottonwood seedling recruitment - an integrative model. *Wetlands* 18:634–645.
- Marron N, Gielen B, Brignolas F, Jian G, Johnson JD, Karnosky DF, et al. 2014. Abiotic stresses. Rome:FAO.
- Matějček T. 2009. Rozšíření invazních neofytů v břehové vegetaci vodních toků. Praha:Univerzita Karlova.
- Míchal I. 1994. *Ekologická stabilita*. Brno:Veronika.
- Níkl M, Soušek Z. 2015. *Pěstování a využití biomasy lesních dřevin pro další zpracování a energetické účely Brandýs nad Labem*:Ústav pro hospodářskou úpravu lesů.
- Pilipovic A, Orlovic S, Nikolic N, Galic Z. 2006. Investigating potential of some poplar (populus sp.) clones for phytoremediation of nitrates through biomass production. *Novi*

Sad:University of Novi Sad, Faculty of Agriculture, Institute of Lowland Forestry and Environment.

Plíva K. 1976. Typologický systém úhúl Brandýs nad Labem.

Poff LN. 1997. The natural flow regime. Fort Collins:American Institute of Biological Science.

Pokladníková H, Rožnovský J, Mužíková B. 2008. Vybrané argoklimatické charakteristiky české republiky na základě klimatických dat v gridu 10 km. In: Bioklimatologické aspekty hodnocení procesů v krajině, (Rožnovský J, Litschmann T, eds). Mikulov:Český hydrometeorologický ústav.

Pokorný R. 1999. Lesy ve změněných klimatických podmínkách. Životné prostredie 33:130-134.

Prax A, Hybler V, Kloupar M. 2006. Hydrologický a vlhkostní režim půd lužního lesa. Brno:Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně.

Richardson J, Isebrands JG, Ball JB. 2014. Ecology and physiology of poplars and willows. Roma:FAO.

Rood SB, Braatne JH, Hughes FMR, . 2003. Ecophysiology of riparian cottonwoods: Stream flow dependency, water relations and restoration. Tree Physiology 23:1113-1124.

Rood SB, Ball DJ, Gill KM, Kaluthota S, Letts MG, Pearce DW. 2013. Hydrologic linkages between a climate oscillation, river flows, growth, and wood $\Delta^{13}\text{C}$ of male and female cottonwood trees. Plant, Cell and Environment 36:984-993.

Schweingruber FH. 1996. Tree rings and environment: Dendroecology. Bern:Paul Haupt.

Singer MB, Stella JC, Dufour S, Piégay H, Wilson RJS, Johnstone L. 2012. Contrasting water-uptake and growth responses to drought in co-occurring riparian tree species. Ecohydrology 6:402–412.

Skolaut KM. 2012. The use of tree rings to study the impacts of stream flow and climate variability on native and invasive woody species along a semi-arid riparian ecosystem in the great plains, USA. Lincoln:University of Nebraska.

Skořepa H. 2006. Přírodní skvosty prostějovska. Prostějov:Regionální sdružení Iris.

Smolová I, Vitek J. 2007. Základy geomorfologie. Vybrané tvary reliéfu. Olomouc:Univerzita Palackého.

- Stettler RF. 2009. Cottonwood and the river of time: On trees, evolution, and society. Seattle:University of Washington Press.
- Stoffel M, Bollschweiler M. 2008. Tree-ring analysis in natural hazards research. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 8: 187–202.
- Šálek O. 2013. Aplikace dendrochronologických metod v hydrologii a fluviální geomorfologii. Praha:Univerzita Karlova.
- Šeda S, ed. 2013. Bilanční studie podzemních vod na území chko litovelské pomoraví. Ústí nad Orlicí:Agentura ochrany přírody a krajiny ČR
- Šenkýř M. 2015. Vliv nepůvodních listnatých dřevin na diverzitu bylinného patra. Brno:Masarykova univerzita.
- Špinlerová Z. 2014. Ekofyziologie dřevin. Brno:Mendelova univerzita v Brně.
- Šrámek V, Novotný R, Uhlířová H, Bednářová E, Hůnová I. 2007. Vliv ozonu na lesní porosty - mechanismus působení, vliv na dřeviny, ukazatele poškození. *Zprávy lesnického výzkumu* 52:138-147.
- Štěrbá O, Kubíček F, Měkotová J, Bednář V, Řehořek V, Šarapatka B, et al. 2008. Říční krajina a její ekosystémy. Olomouc:Univerzita Palackého v Olomouci.
- Vavřínek M. 2004. Používané posypové materiály a jejich vliv na životní prostředí. Pardubice:Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice.
- Vybíral J, Čupa P. 2009. Vliv tradičních krajinných profesí na vývoj lužních lesů v nivě moravy a dyje. In: Lužní les v nivě moravy a dyje, (Čupa P, ed). Břeclav:Biosférická rezervace Dolní Morava.
- Willms CR, Pearce DW, Rood SB. 2006. Growth of riparian cottonwoods: A developmental pattern and the influence of geomorphic context. *Trees* 20:210-218.
- Wu ZY, Raven PH, eds. 1999. Flora of china. Beijing
St. Louis:Science Press
Missouri Botanical Garden Press.
- Zheng W, ed. 1985. Sylva sinica. Beijing:China Forestry Publishing House.
- Zýka M. 2013. Růstová odpověď topolu kanadského na dynamiku hladiny podzemní vody. Olomouc:Katedra ekologie a životního prostředí PřF UP v Olomouci.

