

MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ

Lesnická a dřevařská fakulta

Ústav nauky o dřevě

Hodnocení stavu stromu na základě dendrometrických veličin

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno 2016

Maňák Vladimír

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem práci: Hodnocení stavu stromu na základě dendrometrických veličin zpracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b Zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací. Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona. Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předemtná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně dne:.....

Maňák Vladimír

.....

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu své diplomové práce prof. Dr. Ing. Petru Horáčkovi za jeho odborné vedení, doporučené studijní materiály a čas, který mi věnoval. Dále chci poděkovat Ing. Andree Szórádové, Ph.D. a firmě SAFE TREES s.r.o. za poskytnutí potřebných dat pro zhotovení této práce.

Děkuji.

ABSTRAKT

Jméno posluchače: Maňák Vladimír

Název diplomové práce: Hodnocení stability stromu na základě dendrometrických veličin.

Hlavní náplní této práce je navrhnout analytické vztahy popisující stabilitu stromů v závislosti na dendrometrii a odvodit alometrické koeficienty z dendrometrických veličin a z teorie mechaniky proti porušení zlomem a vývratem na úrovni rodů. Pro účely této práce bylo pracováno s jedinci z rodu javor, bříza, buk, jasan, dub a lípa, kteří se nacházejí v městském prostředí v Prostějově. Na základě měření těchto jedinců jsou navrženy alometrické vztahy, které vycházejí z dendrometrických veličin jako je průměr, výška těžiště, plochy koruny atd. a z mechaniky jako je pevnost dřeva, modul pružnosti dřeva, kořenů a půdy, náklonu stromů atd. Ze vztahů mezi dendrometrickými veličinami byl vypočítán věk. Alometrické koeficienty pro hodnocení stromů ve fázi dospělosti jsou druhově podmíněné a stabilita stromu nelze posuzovat jen podle průměru a výšky těžiště, musí do toho být zahrnuta i náporová plocha koruny. Pro hodnocení stromů nelze uvažovat jen s geometrií stromu, ale musí do toho být zahrnuty i materiálové vlastnosti. Z alometrických vztahů pro zlom, vývrat a vzpěr považuji za nejužitečnější vztah pro zlom, protože využívá i náporovou plochu koruny a materiálové vlastnosti.

Klíčová slova: alometrie, stabilita, strom

ABSTRACT

Name: Maňák Vladimír

Title: Tree stability assessment based on dendrometric parameters

The main concern of this work is to propose analytical relations describing the stability of trees depending on the dendrometry. Further, the aim is to derive allometric coefficients of breakage and windthrow failure based on dendrometric quantities and theory of mechanics. Selected individuals of the genus maple, birch, beech, ash, oak and linden are located in urban areas of Prostějov. The allometric relationships are based on the dendrometric measurements of these individuals (a diameter, center of gravity height, crown area etc.) and on mechanics (wood strength; modulus of elasticity of wood, roots and soil; inclination etc). Tree age was calculated from the relationship between the dendrometric variables. The allometric coefficients for tree assessment in the phase of maturity conditioned by tree species and the stability of the tree can not be evaluated only according to the diameter and height of the center of gravity but also according to sail area of the crown. When assessing trees not only the geometry but also material properties should be considered. Of allometric relationships for breakage, windthrow and buckling I find most useful the relationship for the breakage because it uses also the sail area and material properties.

Key words: allometry, stability, tree

Obsah

1. Úvod.....	8
2. Cíl práce.....	9
3. Literární přehled	10
3.1. Provozní bezpečnost	10
3.1.1. Stabilita stromu	10
3.1.1.1. Materiál	12
3.1.1.2. Zatížení	14
3.1.1.3. Tvar.....	16
3.2. Hodnocení stavu stromů	17
3.2.1. Alometrie jako nástroj pro popis růstu dřevin	19
4. Materiál.....	22
5. Metodika	25
5.1. Věk.....	25
5.2. Fyziologické stáří	25
5.3. Plocha koruny.....	26
5.4. Výška těžiště.....	26
5.5. Odvození vztahů.....	26
5.5.1. Pevnostní mechanický model.....	26
5.5.1.1. Namáhání větrem – ohybové namáhání	26
5.5.1.2. Namáhání větrem a vlastní hmotností– tlakové namáhání	28
5.5.2. Elastický mechanický model.....	29
5.6. Shrnutí	30
5.7. Porovnání	31
6. Výsledky	32
6.1. Věk.....	32
6.2. Plocha koruny.....	38
6.3. Výška těžiště.....	38
6.4. Závislost věku na průměru, výšce a ploše koruny.....	39
6.4.1. <i>Acer campestre</i> L.	39
6.4.2. <i>Acer platanoides</i> L.	40
6.4.3. <i>Acer pseudoplatanus</i> L.	42
6.4.4. <i>Betula pendula</i> Roth.....	43
6.4.5. <i>Fagus sylvatica</i> L.....	44

6.4.6. <i>Fraxinus excelsior</i> L.....	46
6.4.7. <i>Quercus robur</i> L.	47
6.4.8. <i>Quercus rubra</i> L.	48
6.4.9. <i>Tilia cordata</i> Mill.....	50
6.4.10. <i>Tilia platyphyllos</i> L.	51
6.5. Výpočet alometrických vztahů pro odolnost stromů na základě dendrometrických veličin	53
6.5.1. Javor	54
6.5.2. Bříza	55
6.5.3. Buk.....	56
6.5.4. Jasan	57
6.5.5. Dub	58
6.5.6. Lípa	59
6.6. Obalové křivky.....	60
6.7. Výpočet alometrických vztahů pro odolnost stromů na základě mechaniky	65
6.8. Porovnání obalové křivky s hodnotou výpočtu.....	65
6.9. Srovnání obalových křivek.....	77
7. Diskuze	80
8. Závěr	82
9. Summary	85
10. Použitá literatura	88
11. Seznam příloh na CD	92

1. Úvod

V městském prostředí jsou stromy cenným prvkem, které plní funkce biologické, meliorační, asanační, kulturní, estetické, naučné, rekreační a produkční. V mnoha městech ovšem není dostatek prostoru pro veřejnou zeleň, která nejen pozitivně ovlivňuje životy lidí, ale také nabízí útočiště mnoha druhům živočichů a rostlin. A proto je nutné o městskou zeleň pečovat, chránit ji a zamezit zbytečnému kácení. Stromy se nachází v místech, která jsou přeplněna lidmi a různými stavbami, které ovlivňují jejich existenci na stanovišti, a proto je nezbytně nutné zajistit jejich provozní bezpečnost. Pro její posouzení je nutné zabývat se stabilitou a současně tím, koho nebo co by mohl svým případným pádem ohrozit (Szórádová, 2006).

Biomechanika rostlin integruje principy rostlinné biologie a techniky s cílem lépe porozumět tomu, jak organismy, jako jsou stromy rostou a setrvávají na stanovišti v průběhu času. Jednou z důležitých funkcí sekundárního růstu stromů je poskytování mechanické opory pro kmen a větve stromů proti konstantnímu zatížení, které způsobuje vlastní váha stromu a proti periodicky působícímu zatížení, které způsobuje například vítr. Většina prací v rostlinné biomechanice se soustřeďuje na stromy v lesním prostředí, kde mechanické selhání vede k zániku jedince s menším rizikem pro okolí v důsledku jeho pádu než u jedince, který se vyskytuje mimo lesní prostředí. Proto se tato práce zabývá stromy, které rostou v intravilánu měst.

2. Cíl práce

- 1) Pro hodnocení stability stromů zvolit některé rody významné z pohledu sídelní zeleně. Pro hodnocení využít databázi již naměřených dendrometrických údajů z inventarizace dřevin ve městech Stromy pod kontrolou.
- 2) Na základě teorie mechanického chování stromů navrhnout analytické vztahy popisující stabilitu stromů v závislosti na jejich dendrometrii.
- 3) Z analytických vztahů odvodit a vypočítat alometrické koeficienty odolnosti dřevin proti jejich porušení zlomem a vývratem. Výpočet provést pro jednotlivé dřeviny vybraných rodů (a) z dendrometrických veličin a (b) z teorie mechaniky.
- 4) Oba přístupy porovnat a hodnoty alometrických koeficientů včetně závislostí zejména na rodu dřevin a fyziologické fázi zobecnit.
- 5) O dosažených výsledcích diskutovat a navrhnout jejich případné využití v hodnocení stavu stromů v arboristické a krajinářské praxi.

3. Literární přehled

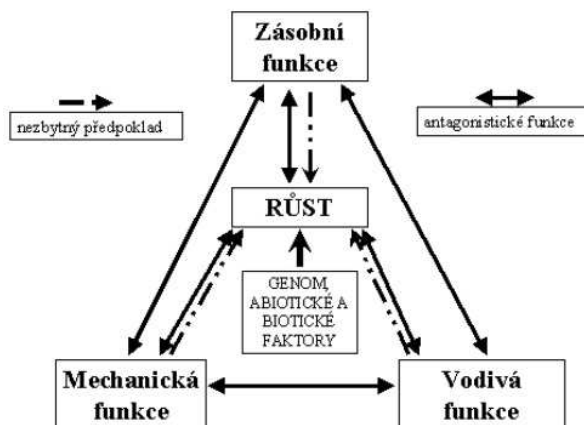
3.1. Provozní bezpečnost

V mimolesním prostředí je zeleň významným prvkem, která plní funkci především mimoprodukční. V mnoha městech, ale není dostatečné množství prostoru pro veřejnou zeleň, která nejen pozitivně ovlivňuje životy lidí, ale také umožňuje život mnoha rostlinným a živočišným druhům, které jsou na ni vázány. Proto je nezbytně nutné o zeleň v intravilánech měst pečovat a chránit ji. Tato zeleň, tvořící i stromy, se nachází v místech, která jsou přeplněna lidmi a různými stavbami, které ovlivňují jejich život. Z toho důvodu je nezbytně nutné zajistit jejich provozní bezpečnost. Pod provozní bezpečností chápeme odhad rizika existence stromu s přihlédnutím k jeho stabilitě a rizikům spojených s pádem a poškozením zdraví nebo majetku. Pro posouzení provozní bezpečnosti je nutné zabývat se nejenom stabilitou stromu, ale také tím, koho nebo co by mohl svým případným pádem ohrozit (Szórádová, 2006).

3.1.1. Stabilita stromu

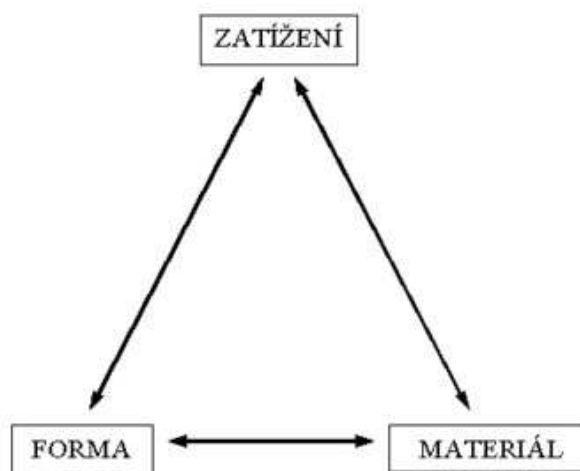
U živých organismů je potřeba stabilitu pochopit, spíše jako stav dynamické rovnováhy, ve které se živý organismus na základě získaných informací dokáže přizpůsobit změnám vnějšího prostředí. Stromy se dokáží přizpůsobit změnám vnějšího prostředí například růstem adaptačním, popřípadě optimalizací tvaru. Z hlediska mechaniky stromu můžeme stabilitu vysvětlit jako stav, kdy působením vnějších a vnitřních faktorů nehrozí jeho selhání vyvrácením, zlomením kmene a větví, popřípadě odlomením části koruny, která ohrožuje přetrvání jedince na daném místě (Kolařík et al., 2010).

Stromy zajišťují mechanickou stabilitu, ale musí zabezpečit i mnoho dalších jiných funkcí - zisk a transport asimilátů a vody, zásobní funkce, rozmnožování apod. Stavba stromu a jeho vnitřní struktura je tedy vyváženým kompromisem mezi těmito funkcemi. Především se jedná o funkci vodivou, která mu zajistí vedení vody a v ní rozpuštěných minerálních látek z kořenového systému k listům a fotosyntátů zpět ke kořenům. Další významnou funkcí je funkce zásobní, kde kmen a větve představují místo, kde se tyto zásobní látky shromažďují a ukládají. Nesmíme zapomenout také na funkci mechanickou, která musí zajišťovat dostatečnou stabilitu stromu a také musí asimilační aparát vynést nad ostatní vegetaci (Kolařík et al., 2010).



Obrázek 1– trojúhelník propojení funkcí stromu (Mosbrugger, 1990)

Experimentálně zajistit stabilitu stromu je značně obtížné, a to z důvodů velkých rozměrů a sil naněj působících. Samotná stabilita stromu se skládá ze tří složek: zatížení, materiál a forma neboli tvar. Jednou složkou stability stromu je zatížení; to představuje vliv větru, vlastní rozměry stromu a další přídatnou zátěž, kterou je například sníh nebo námraza. Zatížení, které působí na strom a síly přitom vznikající, musí být z koruny stromu převedeny větvemi a kmenem do kořenové soustavy, kde se třením o půdu přemění na tepelnou energii a rozptýlí. Strom na působící zatížení dokáže reagovat tak, že optimalizuje svůj tvar. Pro přenos napětí, které vzniká v korunách stromů působením sil, je nezbytná dostatečná nosnost kmene a větví. Ta je dána materiálem a rozměry kmene a větví (Kolařík et al., 2010).



Obrázek 2– trojúhelník stability (Wessolly, 1992)

3.1.1.1. Materiál

Při hodnocení stability stromů je velmi opomíjeno zjišťování mechanických vlastností a použití této znalosti v rámci průběhu hodnocení. Dřevo jako mechanický materiál je složité charakterizovat. Můžeme ho označit jako vláknitý biokompozit. Na vzájemné orientaci elementů dřeva a působících sil závisí určitá tuhost a pevnost. Při přechodu ze zatěžování ve směru vláken do zatěžování ve směru kolmém na jeho vlákna, se plynule mění vlastnosti dřeva. Dřevo tedy můžeme považovat za anisotropní materiál, to znamená, že nemá rovinu souměrnosti vlastností. V závislosti na stavbě dřeva je reakce dřeva rozdílná na různé způsoby namáhání. Zjednodušeně bychom mohli říct, že když je dřevo namáháno různými způsoby, pokaždé se chová jako jiný materiál (Praus, 2006).

Pro potřeby analýzy je takový materiálový model zjednodušen na materiálové konstanty, které se zjišťují pro tři základní směry, kterými jsou podélný, radiální a tangenciální (Praus 2000, Praus, Horáček, 2005, in Praus, 2006).

K hodnocení stability stromu je potřeba znát dva základní parametry materiálu, jeho pevnost a tuhost (tabulka č. 1 a č.2). Charakteristikou pevnosti materiálu je jeho odolnost proti trvalému porušení. Je nutné si uvědomit základní princip stavby dřeva, strukturu vláknitého kompozitu a závislost vlastností na směru zatížení. Pevnost ve směru vláken je větší než pevnost ve směru kolmém na vlákna. Jedním z parametrů, kterým je ovlivněna pevnost buněk a tím také pevnost celého pletiva je tloušťka buněčné stěny a jejich jednotlivých vrstev. Dalším parametrem, který ovlivňuje pevnost dřeva je úhel uložení vláken v jednotlivých vrstvách, způsob uložení jednotlivých buněk vůči směru vznikajícího napětí, ale také podíl jednotlivých chemických vazeb (Kolařík et al., 2010).

Tabulka 1 – Pevnost vybraných druhů dřev (v MPa) v čerstvém stavu (dle Lavers, 1983)

	Javor	Bříza	Buk	Jasan	Dub	Lípa
Pevnost	25	26	27	27	28	24

Tuhost materiálu je vnitřní odpor proti přetvoření (Požgaj et al. 1997). Pokud chceme kvantifikovat tuhost, musíme znát tyto koeficienty. Smykový modul pružnosti G , který vyjadřuje tuhost při smykovém namáhání a normálový modul pružnosti E , jenž ukazuje tuhost při normálovém namáhání. Modul pružnosti určuje sílu, kterou je potřebné působit na těleso, aby se prodloužilo nebo zkrátilo o jednotkovou délku. Můžeme ho určit

z pracovního diagramu jako podíl mezi působícím napětím a vzniklou deformací (Kolařík et al., 2010).

Tabulka 2 – Průměrné moduly pružnosti dřeva u vybraných druhů dřeva (v MPa) v čerstvém stavu (Lavers, 1983)

	Javor	Bříza	Buk	Jasan	Dub	Lípa
Modul pružnosti	8400	9900	9800	9800	9200	7200

Pro zjištění materiálových konstant potřebujeme měření pomocí přístrojového vybavení, popřípadě je možné se odkázat na dříve provedená měření. Dále můžeme využít přístrojů založených na měření rychlosti šíření zvukového signálu (Fakopp, Picus, Arborsonic Decay Detector), nebo také tahovou zkoušku, která je založena na měření napětí, které vzniká při uměle tvořeném zatížení (Sinn, Wessolly, 1989, in Praus, 2006).

3.1.1.1.1. Dřevo jako mechanická konstrukce

Dahle a Grabovsky (2009) uvádějí, že je důležité znát, jak dřevo dokáže získat tuhost a pevnost, což je důležité k pochopení toho, jak stromy odolávají zatížení. Dřevo je ortotropní konstrukce, vykazující odlišné vlastnosti materiálů vzhledem k rovině aplikovaného zatížení (Panshin and de Zeeuw, 1980). Dřevo je silnější v tahu než v tlaku (Panshin a de Zeeuw, 1980). Na rozdíl od syntetických materiálů dřevo udržuje určitou mechanickou pevnost nad elastickým rozsahem, což může vysvětlovat, proč stromy mohou zůstat stát po té, co jsou vystaveny extrémnímu zatížení (Koehler a Telewski, 2006).

Modul pružnosti (E) je vlastnost dřeva, která popisuje odolnost vůči ohybu a běžně se vyskytuje u mnoha konstrukčních vzorců. U modulu pružnosti byla zjištěna pozitivní korelace (kladná závislost, když jedna veličina roste, druhá také) kmene s věkem (Niklas, 1997, Groom et al. 2002), snižuje se s výškou kmene (Reiterer et al., 1999, Brüchert et al., 2000) a mění se podle průměru (Spatz a Brüchert, 2000). Hodnota modulu pružnosti běle je o 35% menší než v jádrovém dřevě, což značí, že mladší kmeny a větve složené z běle jsou pružnější než rostliny složené převážně z jádrového dřeva (Niklas 1997, Spatz a Brüchert, 2000). Hodnoty pro modul pružnosti v kvalitě čerstvého dřeva (>28% vlhkost) a suchého dřeva (12% vlhkost) jsou k dispozici v literatuře např. Forest products laboratory's (FPL) Wood handbook (Green et al., 1999).

Uváděné vlastnosti materiálu v dokumentech, jako je FPL Wood Handbook jsou odvozeny z řeziva kvalitního dřeva, které nemají vady a jsou často větší než obvyklé stromy (Dahle, 2009). Proto musí být tyto údaje využívány velmi opatrně. Lepší variantou k určení materiálových vlastností je dojít k nim experimentálně. Toto může být provedeno s použitím zařízení na ohybové zkoušky na malých vzorcích (Wagner et al., 1998).

Dominantním faktorem u ohybové pevnosti je poloměr kmene nebo nosníku. Brüchert et al. (2000) uvádí, že ohybová pevnost se snižuje s výškou. Proto hrají celkové rozměry a tvar kmene nebo větví důležitou roli v odolávání proti zatížení. Modul pružnosti není možné ignorovat (Brüchert et al., 2000), protože se s rostoucím věkem mění výška a průměr stromu (Niklas, 1997).

3.1.1.2. Zatížení

3.1.1.2.1. Zatížení stromu vlastní hmotností

Strom působí na plochu průřezu kmene hmotností koruny, větví a asimilačního aparátu. Jelikož se jedná o zatížení trvalé, nelze vliv těchto parametrů opomíjet. Sílu, která vzniká při působení váhy vlastního těla stromu lze vyjádřit pomocí vztahu:

$$F_g = m \cdot g \quad (1)$$

kde m je hmotnost nadzemní části stromu (kg), g je gravitační rychlení ($m \cdot s^{-1}$).

Výše uvedená síla způsobuje zejména zatížení tlakové (při působení na plochu kmene) a ohybové. Strom je na tlakové zatížení vytvářené vlastní hmotností uzpůsoben (Mattheck a Breloer 1995). Z mechanických vlastností dřeva je zřejmé, že pevnost v tlaku ve směru vláken je v porovnání se ostatními typy zatížení vysoká. Zatížení vlastní hmotností může být dočasně zvýšeno působením přídatné zátěže, tvořené sněhem, ledem apod.

3.1.1.2.2. Zatížení působením větru

Vzhledem k frekvenci působení a velikostem napětí je nejvýznamnějším přirozeným zdrojem zatížení vítr. Velikost této síly je nejčastěji v literatuře popisována vztahem, který detailně vysvětluje Niklas (1992) a Vogel (1994). Rovnice je založena na Newtonově pohybovém zákonu:

$$F = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot c_w \cdot v^2 \quad (2)$$

kde A je plocha koruny (m^2), ρ je hustota vzduchu (většinou uváděna $1,278 \text{ kg} \cdot m^{-3}$), c_w je aerodynamický koeficient a v je rychlost větrného proudění ($m \cdot s^{-1}$).

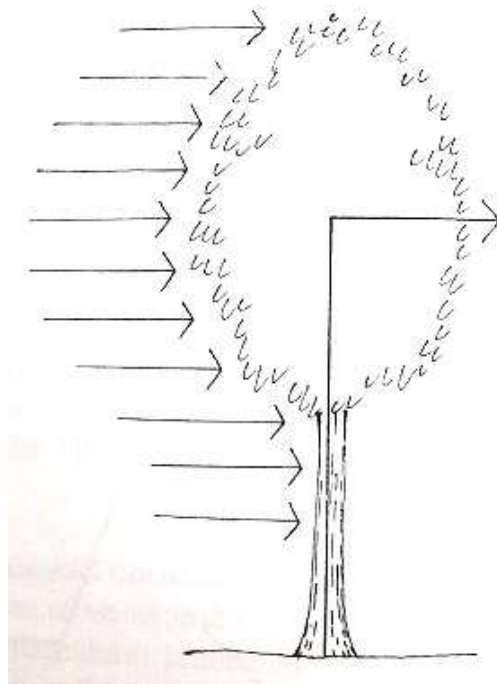
Tento konvenční model rovnice horizontálního zatížení předpokládá, že se síla mění s druhou mocninou rychlosti větru. Podle literatury se však mnoho vědců domnívá, že síla (F) roste s rychlostí větru lineárně, tzn. s jeho první mocninou. Tuto skutečnost potvrzují jak výzkumy prováděné ve větrných tunelech (Mayhead 1973, Grace 1978), tak i pokusy z terénu (Lai 1955, Kane a Smiley 2006).

Dle Xaviera et al. (2010) se strom chová jako rigidní systém pouze do působení rychlosti větru U_t (mezní rychlost proudění větru, u topolů $0,5 \text{ m/s}^{-1}$). Po překročení této mezní rychlosti (U_t) se strom stává systémem flexibilním.

Zatížení vznikající na bázi kmene je potom dána velikostí síly F a délkou ramene, na něž působí:

$$M = F \cdot t \quad (3)$$

kde F je síla vznikající působením větru a t je výška těžiště.



Obrázek 3 – Ohybový moment působící na strom vlivem větru (Kolařík et al., 2010)

3.1.1.2.2.1. Změna rychlosti větru v závislosti na výšce

Rychlost větru se mění s rostoucí výškou nad terénem. V přízemních vrstvách je rychlost proudění zpomalena třením o povrchy a pronikáním vegetací nebo zástavbou. Tato skutečnost je zohledňována pomocí parametru nazývaného „drsnost terénu“. Na základě drsnosti jsou potom stanoveny kategorie terénu, které se liší dle použitého standardu. V České republice je pro účely výpočtu střední rychlosti větru (v_m) ve výšce (z)

využíván ve stavebnictví nebo při zátěžové analýze při použití tahové zkoušky standard EUROCODE 1. Pro účely této práce je maximální rychlost považována za konstantu ($v = 32 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).

3.1.1.2.2. Aerodynamický koeficient c_w

Stávající stav poznání týkající se aerodynamického koeficientu přináší ve své práci Szórádová (2014). Aerodynamický koeficient často označovaný jako koeficient aerodynamického odporu, vyjadřuje odpor koruny vůči pronikání vzduchu. Ve vědeckých pracích, zabývajících se jeho určením pro různé druhy dřevin (např. Sinn a Wessolly 1989, Wood 1995, Grant a Nickling 1998, Kerzenmacher a Gardiner 1998) bývá nejčastěji definován jako:

$$C_w = \frac{F}{\frac{\rho}{2} \cdot (v^2) \cdot (A)} \quad (4)$$

Limitující pro výpočet c_w dle výše uvedené rovnice je však skutečnost, že není možné určit plochu koruny při aktuálním proudění vzduchu (Kane a Smiley, 2006). Bell et al. (1990) určovali aerodynamický koeficient jako poměr „aktuální“ síly F a síly vypočtené podle rovnice 3. Jiní autoři se přiklání k přímému určení c_w jeho měření (Mayhead 1973, Freeman et al. 2000, Kane a Smiley 2006). Aerodynamický koeficient c_w klesá s rostoucí rychlostí větru (Mayhead 1973, Koizumi et al. 2008, aj.). Dalším ovlivňujícím parametrem je stav olistění. Koizumi (2008) uvádí průměrnou hodnotu c_w 0,133 pro stromy bez listů při rychlosti proudění větru 10 m/s. V olistěném stavu měli stejné exempláře hodnotu c_w vyšší. Koizumi (2008) předpokládá, že propustnost korun je u dřevin listnatých vyšší než u jehličnanů. Jako důvod uvádí větší pružnost listů a řapíků ve srovnání s jehlicemi. Koeficient prodouvavosti se výrazně liší i mezi druhy (Mayhead et al. 1975, Rudnicki et al. 2004, Vollsinger et al. 2005, Kane a Smiley 2006). V literatuře je udávána hodnota od 0,2 - 0,45 (Niklas 1992, Wessolly a Erb 1998, Peltola et al. 2000).

3.1.1.3. Tvar

Tvar neboli geometrie stromu obsahuje kvalitativní a kvantitativní složku. Kvalitativní složka nám udává optimalizované rozložení v prostoru, tím se může podstatně zvýšit nosnost stromu i jeho stabilita. Kvantitativní složka nám určuje množství materiálu, který je k dispozici pro přenos zatížení. Čím více je materiálu tím větší je nosná kapacita. (Kolařík et al., 2010).

Cílem existence stromu je na co nejdelší dobu obsadit určitý prostor a zajistit jeho reprodukci. Součástí této strategie je zajistit dostatečnou mechanickou stabilitu stromu. Proto nelze z pohledu stromu označit excentrický růst jako negativní, naopak se jedná spíše o geometrickou optimalizaci (Mattheck, 1991). Tvar stromu i jednotlivých částí můžeme považovat za výsledek optimalizačního procesu a je to kompromis mezi požadavky plněných funkcí (Mattheck, Bethge, 1991, in Kolařík et al., 2010)

Mechanická stabilita stromu lze zajistit tvarovou optimalizací. Tvar stromu a jeho částí je výsledkem zejména mechanického namáhání. Tvar stromu můžeme popsat velikostí a tvarem koruny, výškou stromu, výškou těžiště, tloušťkou kmene a velikostí kořenového balu. Koruna je rozvětvená část dřevin a skládá se z větví a listů. Rostlinám slouží k získání dostatečně velké plochy pro příjem slunečního záření. Drápela (2008) definuje výšku stromu jako vzdálenost dvou rovnoběžných rovin kolmých k ose kmene, z nichž dolní prochází patou kmene a horní vrcholem stromu. Těžiště je působíště tíhové síly působící na těleso. Pojem tloušťka kmene definuje Simon (2008) jako vzdálenost mezi dvěma tečnami vedenými rovnoběžně v protilehlých bodech příčného řezu kmene. Kořenový bal tvoří kořeny rostlin spolu s okolní zeminou (Simon, 2008).

3.2. Hodnocení stavu stromů

V současné době existuje řada metod, kterými lze hodnotit stav stromu. Dle Horáčka (2012) lze navrhnout postup vizuálního hodnocení stromů. Ten by měl být založen na hodnocení jednotlivých parametrů v následujícím pořadí:

1. základní charakteristiky stromu – určení taxonu, změření dendrometrických parametrů, určení fáze ontogenie dřeviny (fyziologický věk), apod.
2. současný (příp. minulého) stav stanoviště – působící převažující abiotické faktory (stresory), stopy stavební činnosti v okolí, vodní režim na stanovišti a půdní typ, převažující směr a rychlost proudění vzduchu, vliv zástavby, apod.
3. zdravotní stav – strukturální změny vegetačních orgánů stromu (listy, prýty, kmen a kořeny) – habituální defekty a poškození
4. vitalita – reakce stromu na stresory na úrovni ohraničeného (listy a prýty) a neohraničeného (kmen) růstu

5. stabilita – identifikace nejpravděpodobnějších a nejdůležitějších problémů na/ve stromě spojených s jeho selháním

Vizuální hodnocení je zaměřeno na stav stromu, který určují tři základní parametry, kterými jsou zdravotní stav, vitalita a stabilita stromu. Na toto základní vizuální hodnocení mohou navazovat další specializovaná šetření:

1. hodnocení stavu stromu
 - speciální metodiky vizuálního hodnocení (VTA, SIA, WLA, EHT)
 - přístrojové metody hodnocení
2. specializovaná (expertní) hodnocení funkce stromu
 - provozní bezpečnost
 - sadovnická hodnota
 - biologická / ekologická funkce
 - další funkce

Interpretace vizuálního hodnocení stavu stromu

Vizuální hodnocení stavu stromu vychází ze základního axiomu, že stromy reagují na jakýkoliv stresor růstem, který umožňuje modifikovat tvar jednotlivých vegetačních orgánů včetně vzájemných orgánových korelací. Stromy optimalizují svůj tvar adaptačním růstem, přičemž optimálního, rovnovážného stavu je dosaženo v okamžiku, kdy je lokální působení stresoru rovnoměrně rozloženo po povrchu nebo průřezu dotčených orgánů. Pokud je strom vychýlen z optimálního stavu, je tento obnoven např. excentrickým růstem v místech maximálního působení stresoru. Stresová reakce stromu je nejaktivnější v místech nejvyššího lokálního působení stresoru. Tato místa, která jsou nejnáchylnější k porušení, jsou obnovována nejrychleji a nejdříve. Optimalizačním kritériem je vždy princip spotřeby minimálního množství materiálu (asimilátů), což platí pro jakýkoliv orgán.

3.2.1. Alometrie jako nástroj pro popis růstu dřevin

Alometrie je studium proměnlivých proporcí rozměrů organismů, v našem případě stromů, spojených se změnou jejich velikosti, a to buď v rámci jejich individuálního růstu, nebo ve srovnání s příbuznými organismy různých velikostí (Černý, 2016).

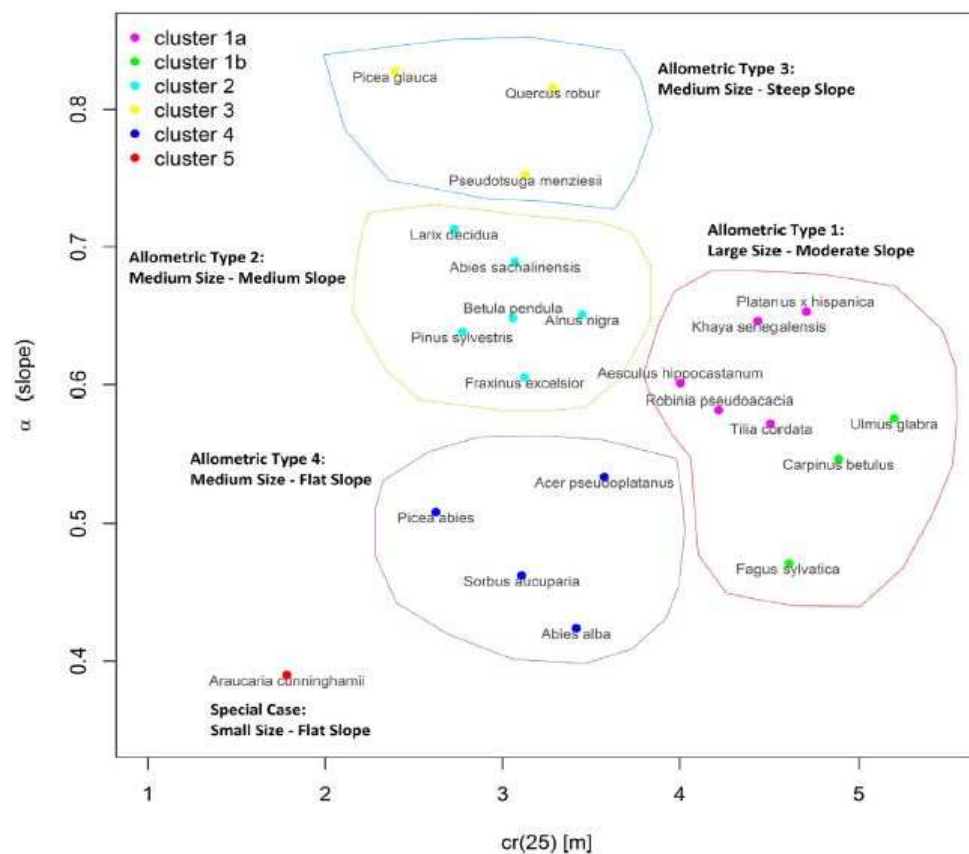
3.2.1.1. Využití alometrie ve světě

Studiu alometrických rovnic pro jasanů rostoucí v městském prostředí (Jižní Ontario, Canada) se věnoval Peper et al. (2014). V rovnicích vycházejí ze standardních dendrometrických údajů stromu, jako je výška, průměr a průměr koruny. Rovnice vycházejí z regresních závislostí mezi těmito veličinami a mají empirický charakter.

Pretzsch et al. (2015) analyzovali 22 nejdůležitějších dřevin rostoucích ve městech na celém světě a zabývali se závislostí mezi průměrem koruny a výčetní tloušťkou. Na základě směrnice logaritmické regresní rovnice provedli clusterovou analýzu v rámci které zmíněných 22 druhů dřevin seskupili do čtyř skupin na základě podobnosti. Z pohledu alometrie jako podobné habity dřevin považuje například:

- a) Buk, jilm, habr, lípu, akát a platan
- b) Smrk, jedli, jeřáb, javor
- c) Borovici, modřín, břízu, jasan, olši
- d) Douglasku, dub

Z výsledků vyplývá, že uvedené alometrické vztahy jsou víceméně druhově podmíněny a vždy existuje přímá úměra mezi průměrem koruny a výčetní tloušťkou.



Obrázek 4 - Schéma rozdělení dřevin do čtyř skupin (Pretzsch et al., 2015)

Dahle a Grabovsky (2009) analyzovali závislost průměru větve po její délce u jedinců druhu *Acer platanoides* L.. Zajímalo je, do jaké míry je možné zobecnit běžně užívanou závislost poměru mezi výškou a tloušťkou větve. Zjistili, že tato závislost v zásadě odpovídá tvaru výtvarnice. Dále zjistili, že se tyto závislosti liší podle míry oslunění větví. Potvrdili také, že pro alometrickou závislost větví je použitelný elastický mechanický model.

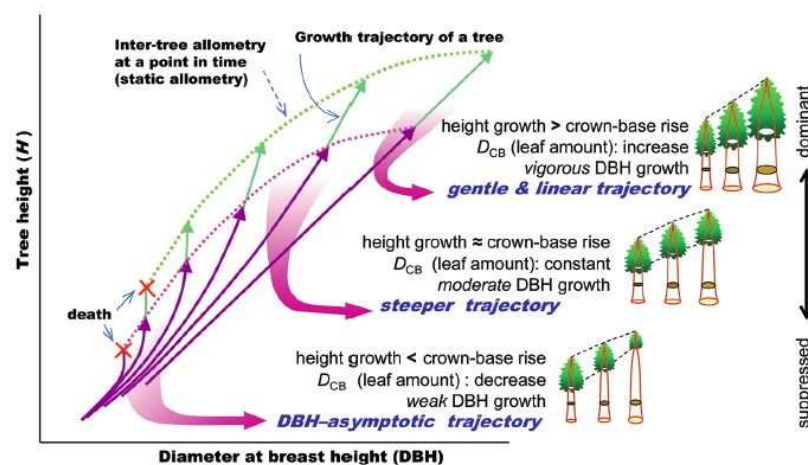
McPherson a Peper (2012) uvádějí přehled aktuálních modelů používaných pro popis růstu dřevin ve městech. Modely dělí v zásadě na empirické a analytické. Empirické modely jsou založeny na statických závislostech mezi dendrologickými veličinami a popisují vztahy mezi výčetní tloušťkou, výškou a velikostí koruny. V některých případech zahrnují i informace o stanovištních podmínkách. Pro lesní dřeviny jsou stovky takových modelů. Pro městskou zeleň se nejčastěji používají modely dva:

- a) I – tree (Nowak et al., 2008)
- b) L – systems (Prusinkewicz a Lindenmayer, 1990)

Analytické modely na druhou stranu vycházejí z kauzálních závislostí a dávají růst do souvislosti se stresovou fyziologií dřevin. Popisují růstovou reakci vyjádřenou morfologií orgánu na působící abiotické a biotické stresory (dostatek vody, minerálních látek, radiace atd.). Řadíme sem model L – Peach (Allen et al., 2005, Da Silva et al., 2011). Do stejné skupiny řadíme i modely hybridní, kterými se dále budu v této práci zabývat. Tyto modely využívají jak empirických, tak analytických modelů.

Rust (2013) se obsáhle věnuje teoretickým a praktickým otázkám použití štíhlostního koeficientu vyjádřeného poměrem výška ku výčetní tloušťce pro hodnocení stavu stromu z pohledu jeho stability. Vychází jak z empirických modelů, tak i z experimentálního ověření závislosti stability stromu na štíhlostním koeficientu a dochází k závěru, že tento parametr není vhodný pro hodnocení stability stromů. Dále konstatuje, že navržený poměr výška ku výčetní tloušťce větší jak 50 (Mettheck, 2002) neodpovídá stromům rostoucím ve městech. Dále poukazuje na skutečnost, že výše uvedený vztah nezohledňuje vývin dřevin k různé věkové fázi.

Tyto závěry potvrzuje také Sumida et al. (2013) s tím, že závislost mezi výškou a výčetní tloušťkou se liší mezi jedinci téhož druhu a taktéž podléhá závislosti na věku.



Obrázek 5 - Vztah mezi výškou a výčetní tloušťkou a trajektorie jednotlivých vývojových fází stromů (Sumida et al., 2013)

4. Materiál

Pro účely této práce byly vybrány některé druhy ze skupiny listnatých dřevin s kruhovitě pórovitou stavbou dřeva a druhy ze skupiny listnatých dřevin s roztroušeně pórovitou stavbou dřeva. U skupiny s kruhovitě pórovitou stavbou dřeva jde o rod *Fraxinus* L., přičemž vybraní jedinci jsou druhu *Fraxinus excelsior* L. a o rod *Quercus* L. jehož jedinci jsou druhu *Quercus robur* L. a *Quercus rubra* L.. Ze skupiny dřevin s roztroušeně pórovitou stavbou dřeva se jedná o zástupce rodu *Acer* L., *Betula* L., *Fagus* L. a *Tilia* L. Z rodu *Acer* L. se jedná o zástupce druhu *Acer campestre* L., *Acer platanoides* L. a *Acer pseudoplatanus* L. Z rodu *Betula* L. jde o zástupce druhu *Betula pendula* Roth. U rodu *Fagus* L. se jedná o jedince druhu *Fagus sylvatica* L. a u rodu *Tilia* L. jde o zástupce druhu *Tilia cordata* Mill. a *Tilia platyphyllos* L..

V následujících tabulkách (tabulka č. 3 – 10) budou popsány základní charakteristiky použitých dřevin, každý jedinec zde uvedený se nacházel v městském prostředí ve městě Prostějov a bylo uvažováno s tím, že tito jedinci jsou bez defektů. Naměřená základní data byla poskytnuta firmou SAFE TREES, s. r. o.

Město Prostějov je největší město regionu Prostějovsko a nachází se v nadmořské výšce 223 m., leží v severní části Hornomoravského úvalu, východně od Dražanské vrchoviny, v rovině, která se nazývá Haná. Podnebí je přechodné, mezi západoevropským přímořským a východoevropským vnitrozemským. Prostějov patří do oblasti teplé s mírnou zimou. Teplotní poměry jsou dány v závislosti na nízké nadmořské výšce a horskou hradbou Jeseníků ze severu (Prostějov.eu, 2016).

Tabulka 3 – *Acer campestre* L. – pro měření bylo použito 93 jedinců tohoto druhu

<i>Acer campestre</i> L.	Výška v m	Průměr v cm	Nasazení koruny v m	Průmět koruny v m
Minimum	3	3	0	1
Maximum	26	53	16	20
Průměr	11,9	17,9	3,7	5,4

Tabulka 4 – *Acer platanoides* L. - pro měření bylo použito 1499 jedinců tohoto druhu

<i>Acer platanoides</i> L.	Výška v m	Průměr v cm	Nasazení koruny v m	Průmět koruny v m
Minimum	2	2	0	1
Maximum	28	87	18	24
Průměr	10,7	26,6	2,9	6,6

Tabulka 5 – *Acer pseudoplatanus* L. – pro měření bylo použito 735 jedinců tohoto druhu

<i>Acer pseudoplatanus</i> L.	Výška v m	Průměr v cm	Nasazení koruny v m	Průmět koruny v m
Minimum	2	3	0	1
Maximum	30	83	21	20
Průměr	12,2	28,8	3,0	7,4

Tabulka 6 – *Betula pendula* Roth. – pro měření bylo použito 1405 jedinců tohoto druhu

<i>Betula pendula</i> Roth.	Výška v m	Průměr v cm	Nasazení koruny v m	Průmět koruny v m
Minimum	1	1	0	1
Maximum	31	70	27	15
Průměr	13,4	24,2	2,5	6,2

Tabulka 7 – *Fagus sylvatica* L. - pro měření bylo použito 55 jedinců tohoto druhu

<i>Fagus sylvatica</i> L.	Výška v m	Průměr v cm	Nasazení koruny v m	Průmět koruny v m
Minimum	10	11	1	3
Maximum	32	89	10	18
Průměr	22,6	55,9	4,4	9,2

Tabulka 8 – *Fraxinus excelsior* L. - pro měření bylo použito 653 jedinců tohoto druhu

<i>Fraxinus excelsior</i> L.	Výška v m	Průměr v cm	Nasazení koruny v m	Průmět koruny v m
Minimum	3	1	0	0
Maximum	37	100	22	20
Průměr	14,7	30,7	4,4	6,7

Tabulka 9 – *Quercus robur* L. - pro měření bylo použito 185 jedinců tohoto druhu

<i>Quercus robur</i> L.	Výška v m	Průměr v cm	Nasazení koruny v m	Průmět koruny v m
Minimum	2	1	0	1
Maximum	34	115	20	23
Průměr	12,9	29,9	3,5	6,6

Tabulka 10 – *Quercus rubra* L. - pro měření bylo použito 34 jedinců tohoto druhu

<i>Quercus rubra</i> L.	Výška v m	Průměr v cm	Nasazení koruny v m	Průmět koruny v m
Minimum	4	3	2	1
Maximum	26	59	12	14
Průměr	11,9	24,0	3,0	6,9

Tabulka 11 – *Tilia cordata* Mill. - pro měření bylo použito 1366 jedinců tohoto druhu

<i>Tilia cordata</i> L.	Výška v m	Průměr v cm	Nasazení koruny v m	Průmět koruny v m
Minimum	0	2	0	1
Maximum	31	108	9	20
Průměr	11,2	29,8	2,6	6,7

Tabulka 12 – *Tilia platyphyllos* L. - pro měření bylo použito 996 jedinců tohoto druhu

<i>Tilia platyphyllos</i> L.	Výška v m	Průměr v cm	Nasazení koruny v m	Průmět koruny v m
Minimum	1	2	0	0
Maximum	29	104	11	17
Průměr	10,8	33,3	2,7	6,5

5. Metodika

Ze základních dendrometrických údajů, které byly poskytnuty firmou SAFE TREES s.r.o. bylo provedeno několik na sebe navazujících výpočtů. Základními dendrometrickými charakteristikami jsou výška stromu, průměr kmene v 1,3 m, výška nasazení koruny a průmět koruny. Na základě těchto údajů byly provedeny všechny ostatní výpočty.

5.1. Věk

Jedním z prvních výpočtů, který byl proveden, je zjištění věku. Tento výpočet byl proveden na základě použití vzorce dle Kolaříka et al. (2010), který využil k odhadu věku křivky růstového modelu.

Vzorec pro výpočet věku je následující:

$$V=B2. (d/(B1 - d))^{(1/B3)} \quad (5)$$

kde **d** je průměr kmene a parametry B1, B2 a B3 jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 13 – Parametry pro výpočet věku stromů pomocí křivky růstového modelu

	B1	B2	B3
<i>Acer campestre</i> L.	0,68580255	61,04789407	1,469931425
<i>Acer platanoides</i> L.	1,411762058	117,754075	1,391021959
<i>Acer pseudoplatanus</i> L.	1,04216082	67,8607267	1,597654508
<i>Betula pendula</i> Roth.	1,035387177	78,94523663	1,323967989
<i>Fagus sylvatica</i> L.	1,127751682	89,54917226	1,822249828
<i>Fraxinus excelsior</i> L.	1,07083777	64,37679716	1,958532282
<i>Quercus robur</i> L.	1,318856439	82,00124315	2,015373902
<i>Quercus rubra</i> L.	0,877413513	45,25045885	1,849218256
<i>Tilia cordata</i> Mill.	1,208821031	73,29228522	1,513496042
<i>Tilia platyphyllos</i> L.	1,993393	109,198347	1,345320019

Vzhledem ke skutečnosti, že se v dalších částech této práce pracuji s věkem, byly vytvořeny histogramy pro zjištění četností jedinců v určitých věkových intervalech.

5.2. Fyziologické stáří

Jednotlivé dřeviny byly seřazeny dle věku a u každého rodu byly rozděleny do třískupin dle fyziologické fáze na:

- a) Juvenilní fázi

- b) Fázi dospělosti
- c) Fázi senescence

Toto rozdělení bylo provedeno na základě věku, kde pro juvenilní fázi to byly stromy ve věku od 1 do 20 let. Toto rozmezí bylo vytyčeno v závislosti na fyziologii a to konkrétně do doby, kdy začínají jedinci různých rodů v průměru plodit (Úradníček, 2009). Fáze dospělosti byla označena jako rozmezí věku od 20 let do 80 let. Horní hranice pro fázi dospělosti byla vymezena na základě výškového přírůstu stromů, kdy jedinci již nemají tendenci zvyšovat svou výšku. A fáze senescence byla vymezena ve věku 80 let a více.

5.3. Plocha koruny

Dalším výpočtem, který byl proveden bylo zjištění plochy koruny. Pro účely této práce byla plocha koruny zjednodušena na tvar elipsy. A tato plocha byla následně vypočítána z výšky koruny a průmětu koruny. Vzorec pro výpočet obsahu elipsy byl použit následující:

$$S = \pi \cdot a \cdot b \quad (6)$$

kde **a** je 1/2 výšky koruny a **b** je 1/2 průmětu koruny.

5.4. Výška těžiště

Výška těžiště byla počítána s předpokladem symetrické koruny a rovně rostoucího kmene a byla vypočítána z následujícího vzorce:

$$l = h - a \quad (7)$$

kde **h** je výška stromu a **a** je 1/2 výšky koruny.

5.5. Odvození vztahů

Odvození vztahů pro popis odolnosti stromů proti selhání.

5.5.1. Pevnostní mechanický model

5.5.1.1. Namáhání větrem – ohybové namáhání

Toto namáhání je označováno jako ohybové a nebere do úvahy vlastnosti kořenového balu. Napětí ve kmeni v důsledku ohybového namáhání větrem se vypočítá na základě tohoto vzorce:

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad (8)$$

kde **M** je ohybový moment (N.m) a **W** je průřezový modul (m³).

Ohybový se vypočítá ze vzorce:

$$M = F \cdot l, \quad (9)$$

kde **F** je síla větru (N) a **l** je výška těžiště koruny (m).

Průřezový modul vypočítáme z tohoto vzorce:

$$W = \frac{\pi \cdot d^3}{32} \quad (10)$$

kde **d** je tloušťka kmene (m).

Sílu větru vypočítáme ze vzorce:

$$F = 0,5 \cdot \rho \cdot c \cdot A \cdot v^2, \quad (11)$$

kde **A** je náporová plocha koruny (m²), **v** je maximální rychlost větru (m . s⁻¹), **c** je aerodynamický odpor vzduchu a **ρ** je hustota vzduchu (kg . m⁻³).

Po dosazení jednotlivých parametrů vznikne tento vztah:

$$\sigma = \frac{32 \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot c \cdot A \cdot v^2 \cdot l}{\pi \cdot d^3} \quad (12)$$

Po vytknutí dendrometrických veličin nám vznikne tato rovnice:

$$\frac{\sqrt[3]{A \cdot l}}{d} = \sqrt[3]{\frac{\pi \cdot \sigma}{16 \cdot \rho \cdot c \cdot v^2}} \quad (13)$$

kde **σ** je pevnost dřeva závislá na druhu dřeviny, **ρ** je 1,2 – 1,3 (kg*m⁻³), což se liší v závislosti na teplotě vzduchu a nadmořské výšce, **c** je 0,15 – 0,35, které závisí na druhu dřeviny a fyziologické fázi.

5.5.1.2. Namáhání větrem a vlastní hmotností– tlakové namáhání

a) Štíhlostní koeficient se vypočítá ze vzorce:

$$\lambda = \frac{l}{\sqrt{\frac{I}{A}}} \quad (14)$$

kde I je moment setrvačnosti (m^4), A je plocha kmene (m^2) a l je výška těžiště koruny.

Moment setrvačnosti se vypočítá ze vzorce:

$$I = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \quad (15)$$

kde d je průměr kmene.

Plocha kmene se vypočítá ze vzorce:

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (16)$$

Po dosazení nám vznikne:

$$\lambda = \frac{l}{\sqrt{\frac{4 \cdot \pi \cdot d^4}{64 \cdot \pi \cdot d^2}}} = \frac{l}{\sqrt{\frac{d^2}{16}}} = \frac{4l}{d} \quad (17)$$

b) Kritická štíhlost (štíhlostní poměr) z mechaniky:

$$\lambda_{\text{krit}} = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \quad (18)$$

$$\sigma_{\text{krit}} = \frac{E \cdot \pi^2}{\lambda^2} \quad (19)$$

kde E je modul pružnosti dřeva (MPa), přičemž “ σ_{krit} “ znamená že je kmen namáhán na vzpěr nikoliv na tlak.

c) Dosazením a) do b) vznikne:

$$\sigma_{krit} = \frac{E \cdot \pi^2}{\left(\frac{4l}{d}\right)^2} \quad (20)$$

Po vytknutí dendrometrických veličin nám vznikne tato rovnice:

$$\frac{l}{d} = \sqrt{\frac{E \cdot \pi^2}{16 \cdot \sigma_{krit}}} \quad (21)$$

kde $\sigma_{krit} = 0,5 - 0,6 \sigma$

σ – pevnost dřeva (MPa).

5.5.2. Elastický mechanický model

Tento model je označován jako elastický a bere do úvahy vlastnosti kořenového balu. Napětí ve kmeni v důsledku ohybového namáhání větrem se vypočítá na základě tohoto vzorce:

$$\phi = \frac{\alpha \cdot M}{t^3 \cdot E_{koř}} \quad (22)$$

kde M je ohybový moment na bázi kmene, α je tvarový koeficient, který se vypočítá poměrem mezi poloměrem kmene a poloměrem kořenového balu, jehož hodnota je rovna 2,5.

Ohybový moment na bázi kmene se vypočítá ze vzorce:

$$M = F \cdot l, \quad (23)$$

po dosazení do tohoto vzorce nám vznikne:

$$M = 0,5 \cdot c \cdot \rho \cdot t \cdot v^2 \cdot l,$$

kde t se vypočítá ze vzorce:

$$t = \frac{d}{2} \quad (24)$$

kde d je tloušťka kmene (m).

Modul pružnosti kořenového balu se vypočítá podle následujícího vzorce:

$$E_{kořenového\ balu} = V_k \cdot E_k + (1 - V_k) \cdot E_p \quad (25)$$

kde E_k je modul pružnosti kořenů (MPa), který je roven $0,3-0,5E_d$ (E_d – modul pružnosti dřeva), E_p je modul pružnosti půdy (MPa) a V_k je podíl kořenů v kořenovém balu.

Po dosazení nám vznikne rovnice:

$$\phi = \frac{2,5 \cdot 0,5 \cdot c \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot l}{\left(\frac{d}{2}\right)^3 \cdot E_{kb}} \quad (26)$$

Následuje úprava, kde po vytknutí dendrometrických veličin vznikne rovnice:

$$\frac{\sqrt[3]{A \cdot l}}{d} = \sqrt[3]{\frac{\phi \cdot E_{KB}}{10 \cdot c \cdot \rho \cdot v^2}} \quad (27)$$

Kde $\phi_{\max} = 2,5^\circ$ (0,035 RAD), (Wessolly, 1998).

5.6. Shrnutí

Po dosazení do vzorců nám vznikly tři základní rovnice:

a) Pro zlom:

$$\frac{\sqrt[3]{A \cdot l}}{d} = \sqrt[3]{\frac{\pi \cdot \sigma}{16 \cdot \rho \cdot c \cdot v^2}}$$

b) Pro vzpěr:

$$\frac{l}{d} = \sqrt{\frac{E \cdot \pi^2}{16 \cdot \sigma_{krit}}}$$

c) Pro vývrat:

$$\frac{\sqrt[3]{A \cdot l}}{d} = \sqrt[3]{\frac{\phi \cdot E_{KB}}{10 \cdot c \cdot \rho \cdot v^2}}$$

Na levé straně každé z těchto rovnic jsou dendrometrické parametry, které můžeme získat měřeními a na pravé straně rovnice jsou hodnoty, které se musíme dosadit ze vzorců na základě mechaniky.

5.7. Porovnání

Dále pak byly výsledky z levé strany rovnice a pravé porovnávány a zjišťovány závislosti pro různé parametry v závislosti na věku, přičemž byly vytvořeny obalové křivky pro maxima a spočítán bezpečnostní faktor (SF).

Bezpečnostní faktor pro zlom byl vypočítán ze vzorce:

$$\frac{\sqrt[3]{\frac{\pi \cdot \sigma}{16 \cdot \rho \cdot c \cdot v^2}}}{\frac{\sqrt[3]{A \cdot l}}{d}} 100 \quad (28)$$

Bezpečnostní faktor pro vzpěr byl vypočítán ze vzorce:

$$\frac{\sqrt{\frac{E \cdot \pi^2}{16 \cdot \sigma_{krit}}}}{\frac{l}{d}} 100 \quad (29)$$

Bezpečnostní faktor pro vývrat byl vypočítán ze vzorce:

$$\frac{\sqrt[3]{\frac{\phi \cdot E_{KB}}{10 \cdot c \cdot \rho \cdot v^2}}}{\frac{\sqrt[3]{A \cdot l}}{d}} 100 \quad (30)$$

6. Výsledky

6.1. Věk

V následující tabulce můžeme vidět základní statistické charakteristiky výsledných výpočtů pro věk podle rovnice č. 5.

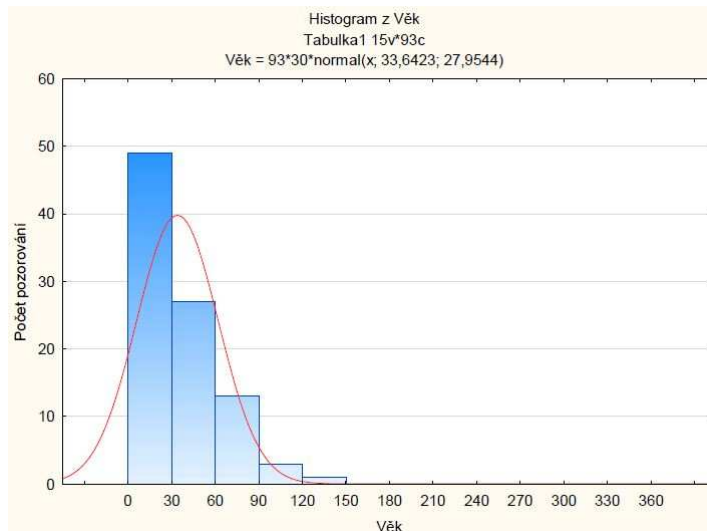
Tabulka 14 – Popisné charakteristiky pro věk

Taxon	Minimum	Maximum	Průměr	n
<i>Acer campestre</i> L.	7,49	140,41	33,64	93
<i>Acer platanooides</i> L.	5,58	165,52	42,11	1499
<i>Acer pseudoplatanus</i> L.	7,50	159,37	38,44	735
<i>Betula pendula</i> Roth.	2,39	137,62	33,21	1405
<i>Fagus sylvatica</i> L.	26,41	184,78	96,62	55
<i>Fraxinus excelsior</i> L.	5,95	248,75	42,52	653
<i>Quercus robur</i> L.	7,30	212,44	44,50	185
<i>Quercus rubra</i> L.	7,43	66,76	27,35	34
<i>Tilia cordata</i> Mill.	4,93	298,67	36,98	1366
<i>Tilia platyphyllos</i> L.	3,60	116,49	33,40	996

K jednotlivým jedincům daných taxonů můžeme vidět jednotlivé výsledky v příloze na CD.

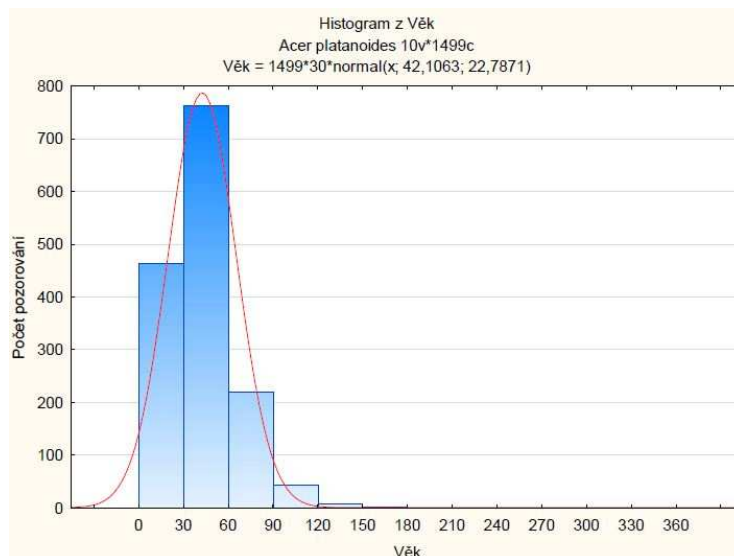
Vzhledem ke skutečnosti, že se v dalších částech této práce pracuje s věkem, byly vytvořeny histogramy pro zjištění četností jedinců v určitých věkových intervalech, které můžeme vidět v následujících grafech.

V grafu č. 1 pro jedince druhu *Acer campestre* L. můžeme vidět četnost zastoupení v různých věkových třídách. Data jsou levostranně rozdělená a nejčastěji se zde nachází mladí jedinci, kteří se řadí do juvenilní fáze. Nejmenší zastoupení zde mají jedinci kteří patří do senescentní fyziologické fáze.



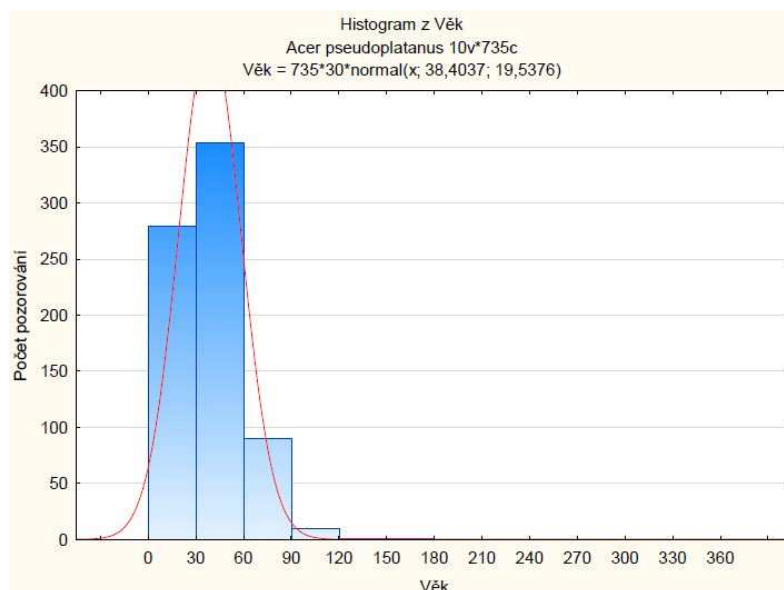
Graf 1 – Histogram pro *Acer campestre* L.

V grafu č. 2 pro jedince druhu *Acer platanoides* L. můžeme vidět četnost zastoupení v různých věkových třídách. Data jsou normálně rozdělená a nejčastěji se zde nachází dospělí jedinci, kteří se řadí do fáze dospělosti. Hojně je zde i zastoupení jedinců patřících do juvenilní fáze. Nejmenší zastoupení zde mají jedinci, kteří patří do senescentní fyziologické fáze.



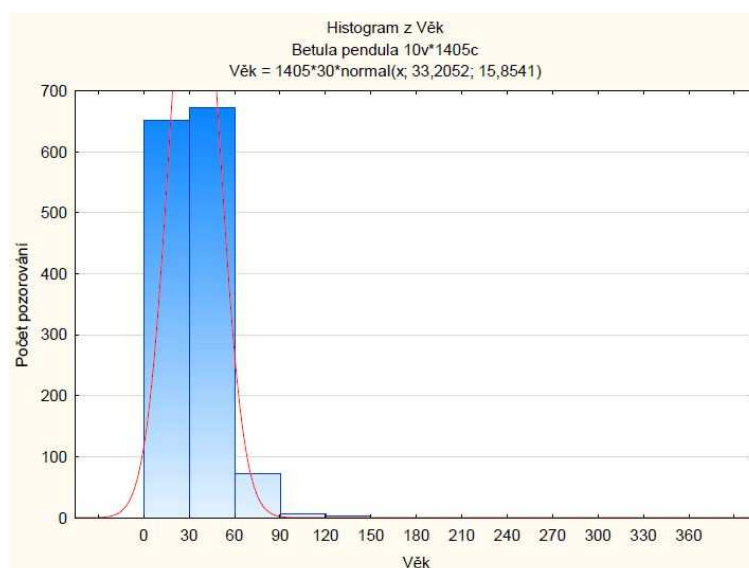
Graf 2 – Histogram pro *Acer platanoides* L.

V grafu č. 3 pro jedince druhu *Acer pseudoplatanus* L. můžeme vidět četnost zastoupení v různých věkových třídách. Data jsou normálně rozdělená a nejčastěji se zde nachází jedinci patřící do fáze dospělosti. Hojně je zde i zastoupení jedinců patřících do juvenilní fáze. Nejmenší zastoupení zde mají jedinci, kteří patří do senescentní fyziologické fáze.



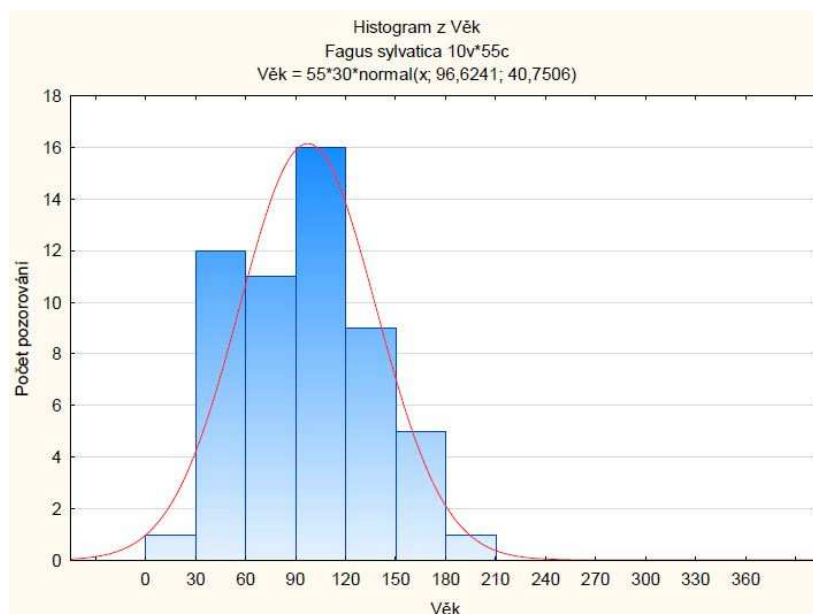
Graf 3 – Histogram pro *Acer pseudoplatanus* L.

V grafu č. 4 pro jedince druhu *Betula pendula* Roth. můžeme vidět četnost zastoupení v různých věkových třídách. Nejčastěji se zde nachází jedinci patřící do fáze dospělosti a do juvenilní fáze. Naopak jedinci patřící do senescentní fyziologické fáze se zde téměř nevyskytují.



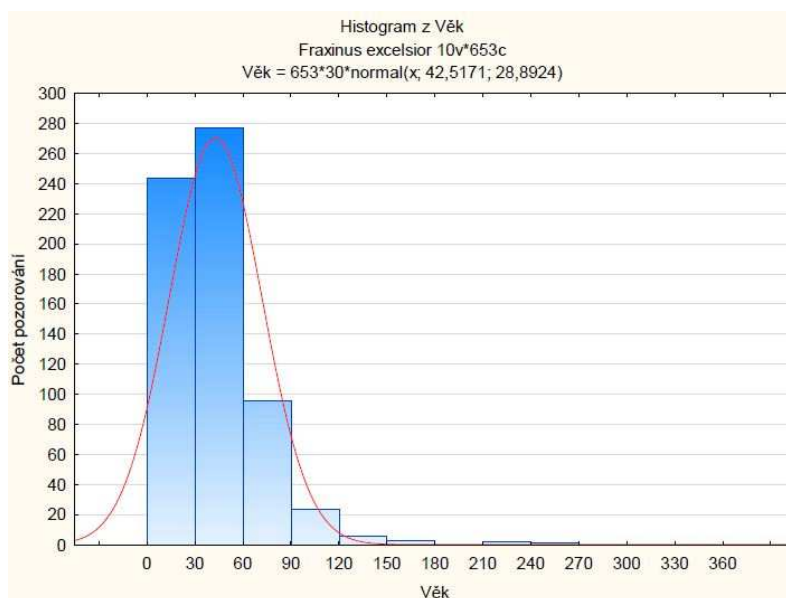
Graf 4 – Histogram pro *Betula pendula* Roth.

V grafu č. 5 pro jedince druhu *Fagus sylvatica* L. můžeme vidět četnost zastoupení v různých věkových třídách. Data jsou pravostranně rozdělená. Nejčastěji se zde nachází jedinci patřící do senescentní fáze a fáze dospělosti. Naopak jedinci patřící do juvenilní fáze se zde téměř nevyskytují.



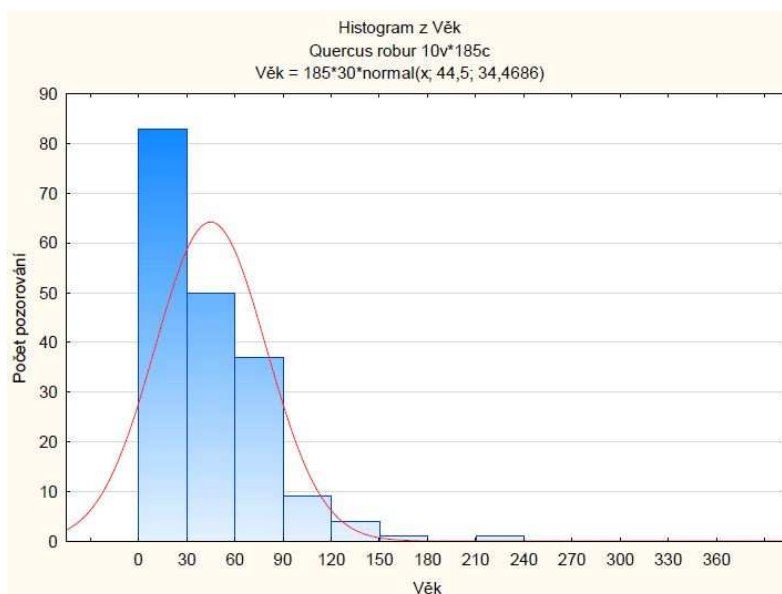
Graf 5 – Histogram pro *Fagus sylvatica* L

V grafu č. 6 pro jedince druhu *Fraxinus excelsior* L. můžeme vidět četnost zastoupení v různých věkových třídách. Nejčastěji se zde nachází jedinci patřící do fáze dospělosti a juvenilní fáze. Naopak jedinci patřící do senescetní fáze se zde téměř nevyskytují.



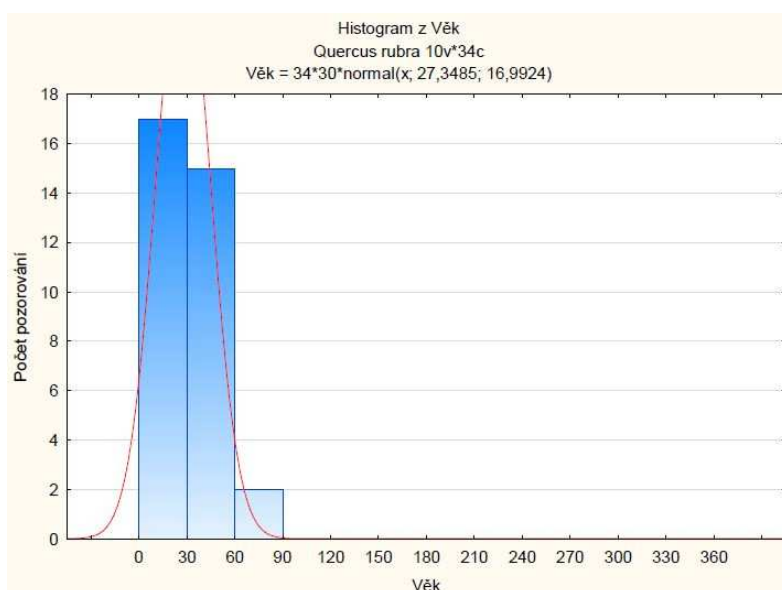
Graf 6 – Histogram pro *Fraxinus excelsior* L.

V grafu č. 7 pro jedince druhu *Quercus robur* L. můžeme vidět četnost zastoupení v různých věkových třídách. Data jsou levostranně rozdělená. Nejčastěji se zde nachází jedinci patřící do juvenilní fáze, časté zastoupení je i ve fázi dospělosti. Jedinců patřících do senescetní fáze se zde nachází nejméně.



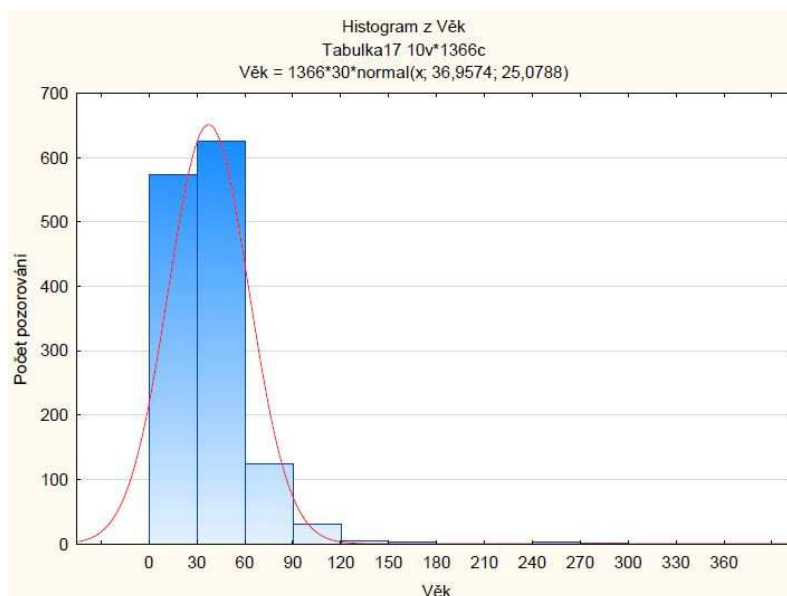
Graf 7 – Histogram pro *Quercus robur* L.

V grafu č. 8 pro jedince druhu *Quercus rubra* L. můžeme vidět četnost zastoupení v různých věkových třídách. Data jsou levostranně rozdělená. Nejčastěji se zde nachází jedinci patřící do juvenilní fáze, časté zastoupení je i ve fázi dospělosti. Jedinci patřící do senescentní fáze se zde téměř nevyskytují.



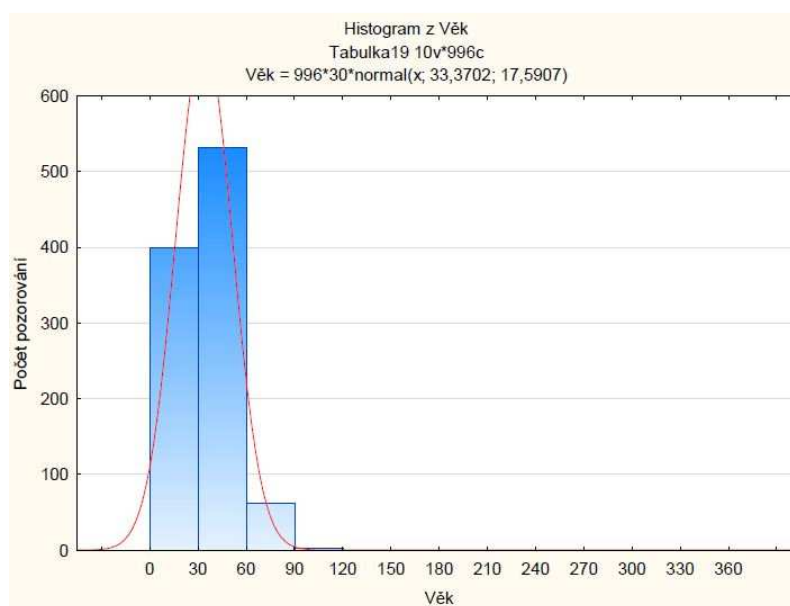
Graf 8 – Histogram pro *Quercus rubra* L.

V grafu č. 9 pro jedince druhu *Tilia cordata* Mill. můžeme vidět četnost zastoupení v různých věkových třídách. Nejčastěji se zde nachází jedinci patřící do fáze dospělosti a do juvenilní fáze. Nejmenší zastoupení zde mají jedinci, kteří patří do senescentní fyziologické fáze.



Graf 9 – Histogram pro *Tilia cordata* Mill.

V grafu č. 10 pro jedince druhu *Tilia platyphyllos* L. můžeme vidět četnost zastoupení v různých věkových třídách. Nejčastěji se zde nachází jedinci patřící do fáze dospělosti a do juvenilní fáze. Nejmenší zastoupení zde mají jedinci, kteří patří do senescentní fyziologické fáze.



Graf 10 – Histogram pro *Tilia platyphyllos* L.

6.2. Plocha koruny

V tabulce č. 15 můžeme vidět základní statistické charakteristiky výsledných výpočtů pro plochu koruny, která je uváděna v m².

Tabulka 15 – Popisné charakteristiky pro plochu koruny (m²)

Taxon	Minimum	Maximum	Průměr
<i>Acer campestre</i> L.	0,79	306,94	51,57
<i>Acer platanoides</i> L.	0,00	329,70	51,77
<i>Acer pseudoplatanus</i> L.	0,79	283,39	62,02
<i>Betula pendula</i> Roth.	0,00	274,75	58,36
<i>Fagus sylvatica</i> L.	25,12	346,97	137,20
<i>Fraxinus excelsior</i> L.	0,00	439,60	70,25
<i>Quercus robur</i> L.	0,00	433,32	79,00
<i>Quercus rubra</i> L.	1,57	189,97	66,77
<i>Tilia cordata</i> Mill.	0,79	381,51	56,51
<i>Tilia platyphyllos</i> L.	0,79	301,44	52,84

Jednotlivé výsledky pro plochu koruny k jednotlivým jedincům daných taxonů můžeme vidět v příloze na CD.

6.3. Výška těžiště

V tabulce č. 16 můžeme vidět základní statistické charakteristiky výsledných výpočtů pro výšku těžiště, která je uváděna v m.

Tabulka 16 – Popisné charakteristiky pro výšku těžiště (m)

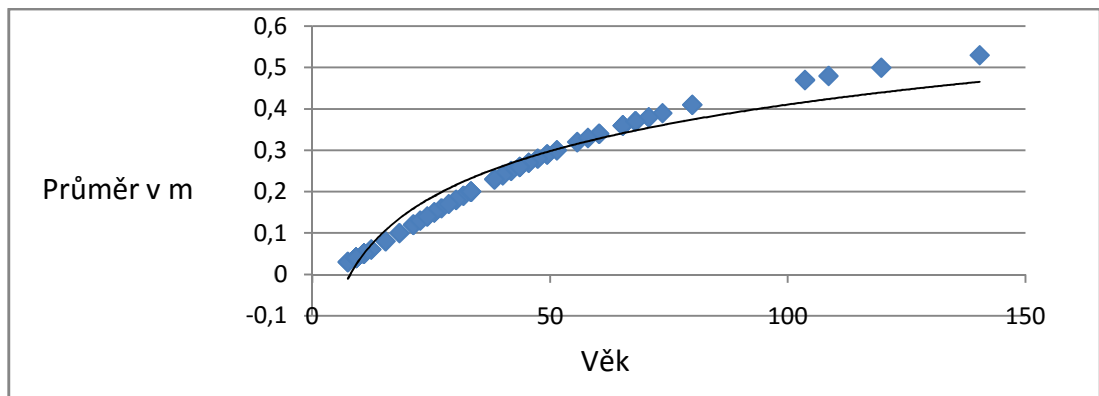
Taxon	Minimum	Maximum	Průměr
<i>Acer campestre</i> L.	2,50	19,50	7,81
<i>Acer platanoides</i> L.	2,00	21,50	6,80
<i>Acer pseudoplatanus</i> L.	1,00	20,00	7,60
<i>Betula pendula</i> Roth.	1,00	21,00	7,99
<i>Fagus sylvatica</i> L.	6,00	20,00	13,49
<i>Fraxinus excelsior</i> L.	2,00	29,50	9,55
<i>Quercus robur</i> L.	1,00	25,00	8,23
<i>Quercus rubra</i> L.	3,00	19,00	7,44
<i>Tilia cordata</i> Mill.	1,00	18,00	2,55
<i>Tilia platyphyllos</i> L.	1,50	16,00	6,77

Jednotlivé výsledky pro výšku těžiště k jednotlivým jedincům daných taxonů můžeme vidět v příloze na CD.

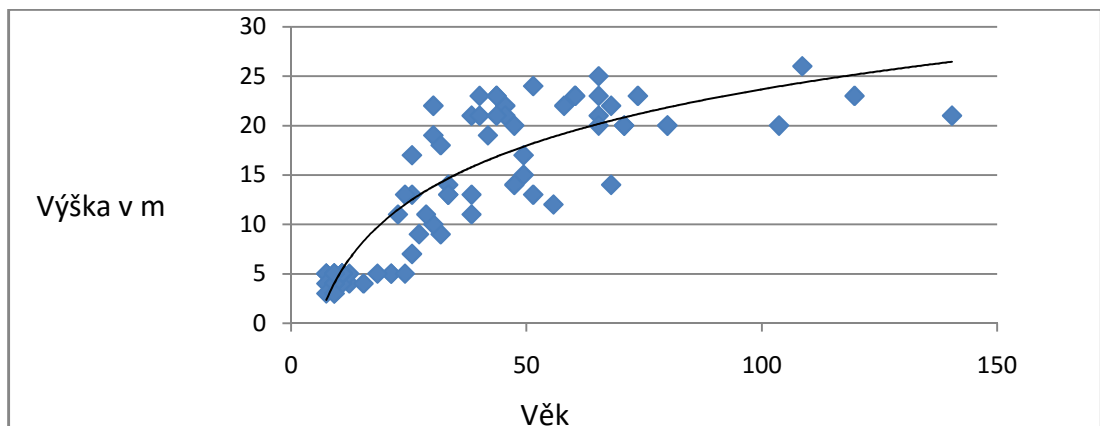
6.4. Závislost věku na průměru, výšce a ploše koruny

Následující grafy byly vytvořeny pro zjištění závislosti věku jednotlivých druhů dřevin na průměru kmene, výšce stromu a ploše koruny. Tyto výsledky korelují v podobném tvaru v našem případě logaritmickém. Všechny tyto závislosti mohou být ovlivněny biotechnickými zásahy. Nepopisují optimální morfologii, ale to, jak tyto jedinci vypadají ve městech.

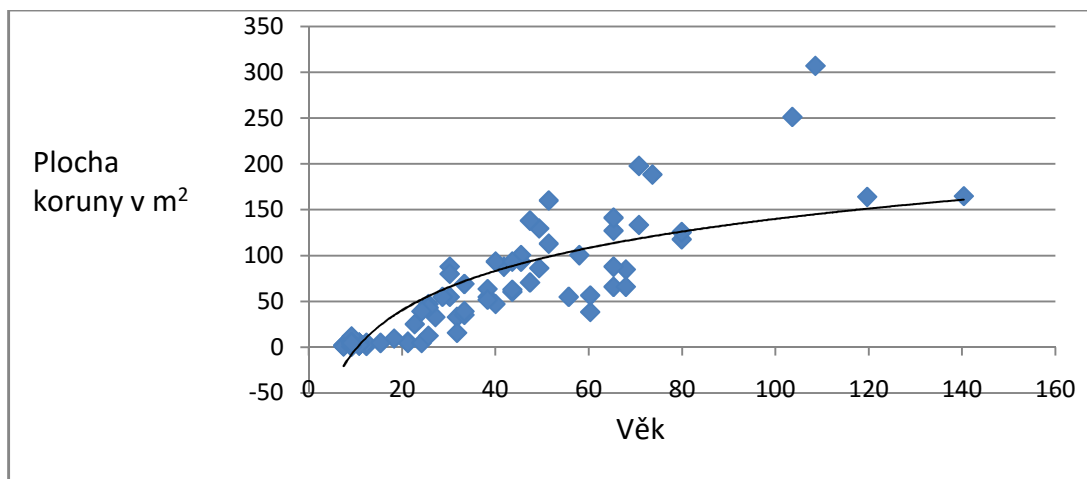
6.4.1. *Acer campestre* L.



Graf 11 – Závislost věku na průměru



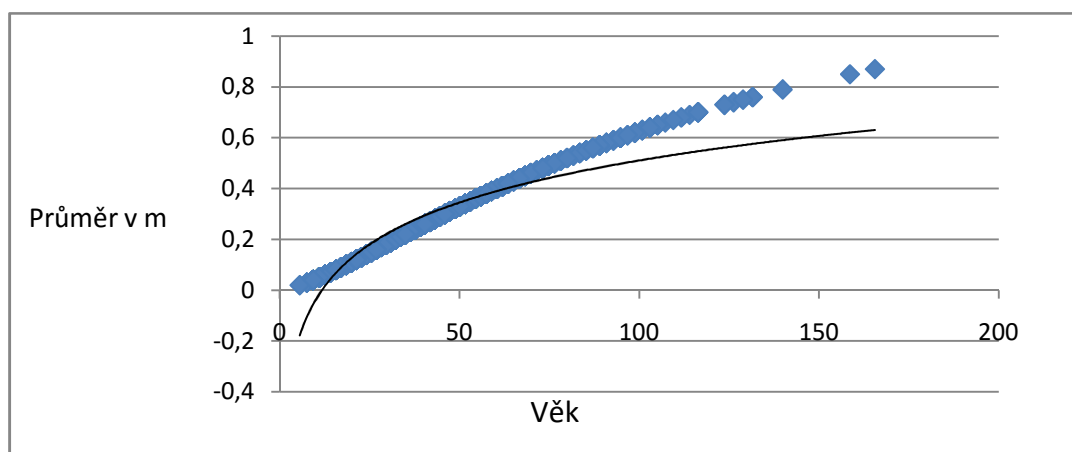
Graf 12 – Závislost věku na výšce



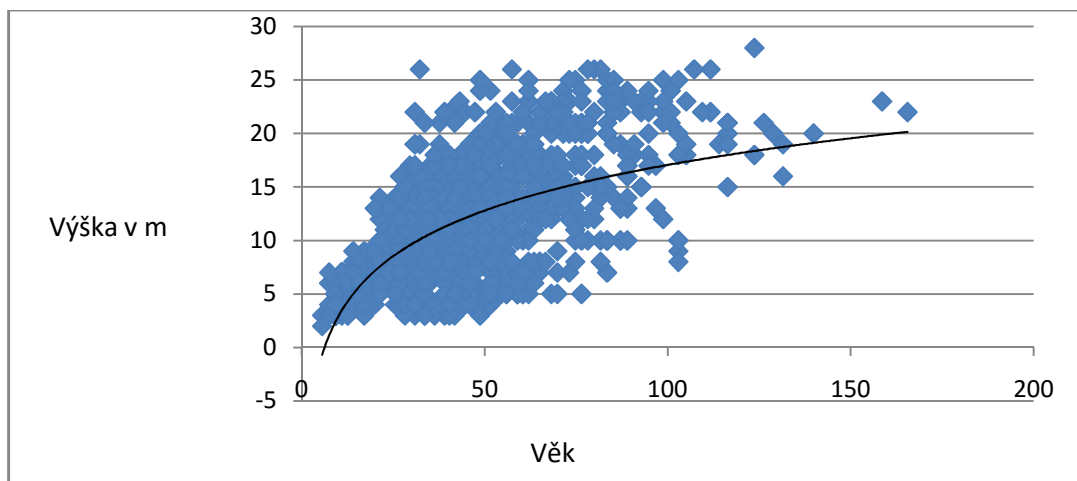
Graf 13 – Závislost věku na ploše koruny

V grafu číslo 11 můžeme vidět, že maximální průměr odpovídá asymptotické veličině s ohledem na průběh funkce, která se pohybuje kolem 50 cm. To znamená, že průměr u jedinců druhu *Acer campestre* L. bude ve výjimečných případech větší než 50 cm. Dle grafu č. 12 odpovídá maximální výška do 25 m. Tomu odpovídá z grafu č. 13 plocha koruny, která se pohybuje do 200 m².

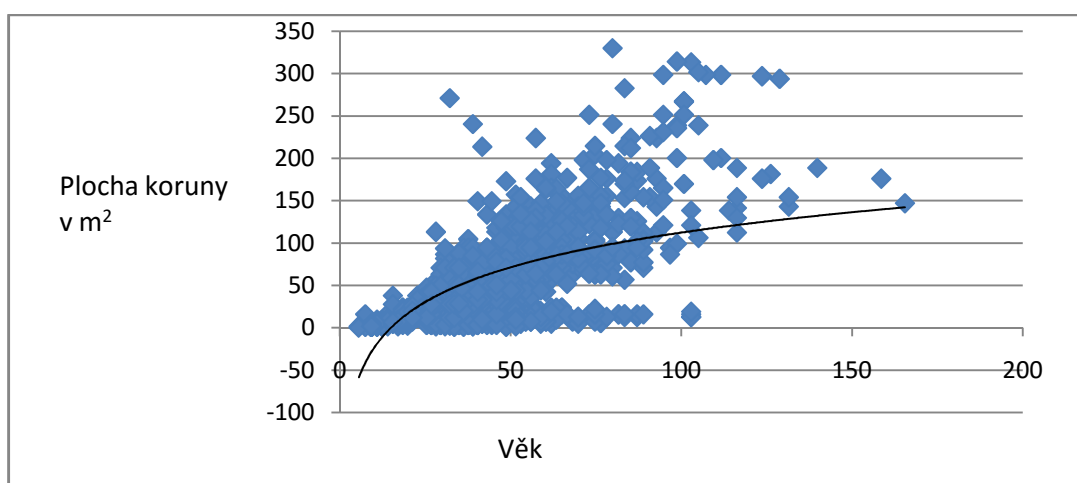
6.4.2. *Acer platanooides* L.



Graf 14 – Závislost věku na průměru kmene



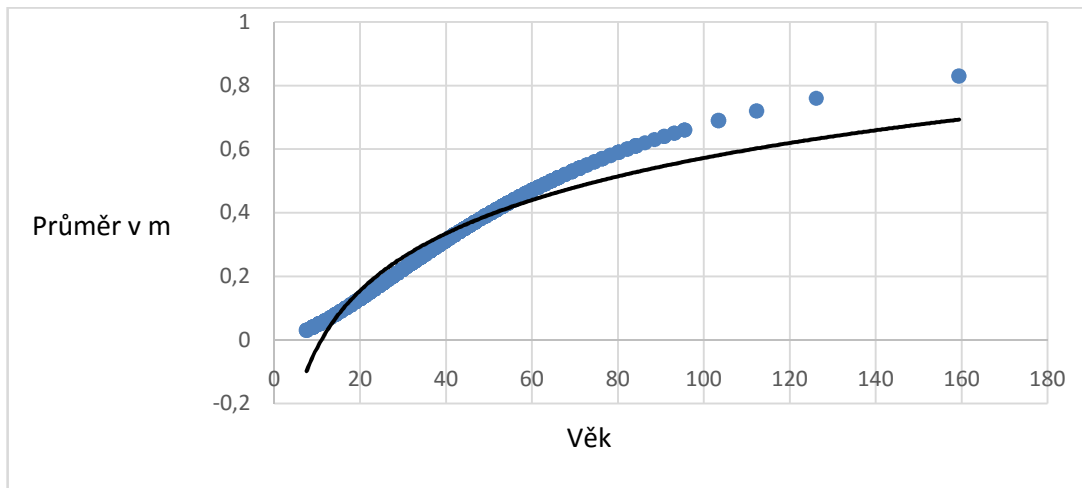
Graf 15 – Závislost věku na výšce stromu



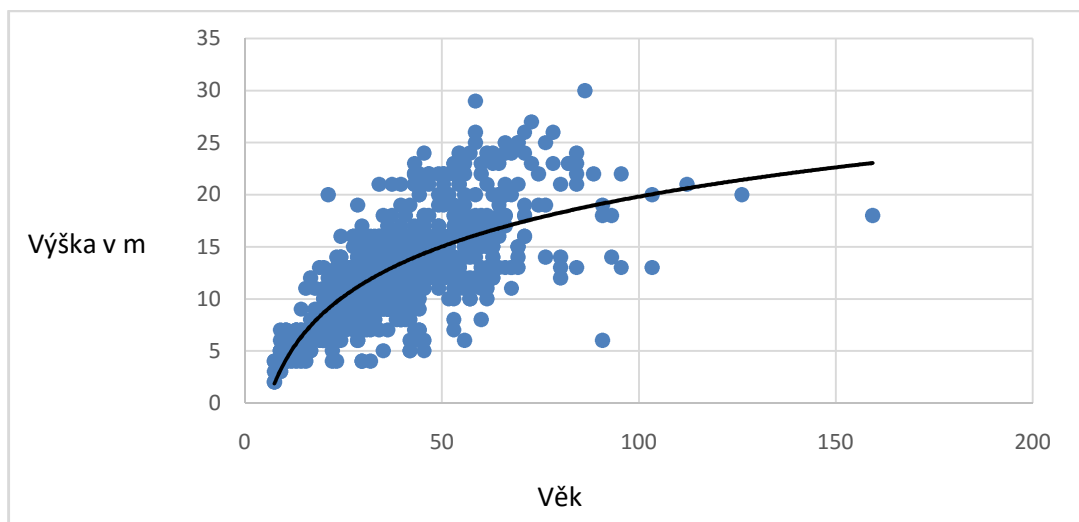
Graf 16 – Závislost věku na ploše koruny

V grafu číslo 14 můžeme vidět, že maximální průměr u jedinců druhu *Acer platanoides* L. se pohybuje kolem 80 cm. Dle grafu č. 15 odpovídá maximální výška do 25 m. Tomu odpovídá z grafu č. 16 plocha koruny, která se pohybuje do 300 m².

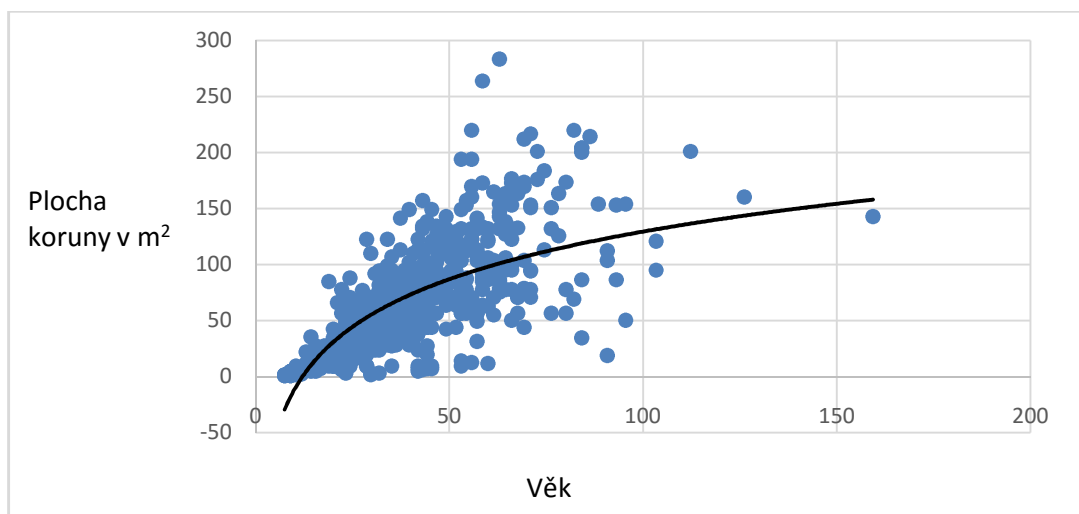
6.4.3. *Acer pseudoplatanus* L.



Graf 17 – Závislost věku na průměru kmene



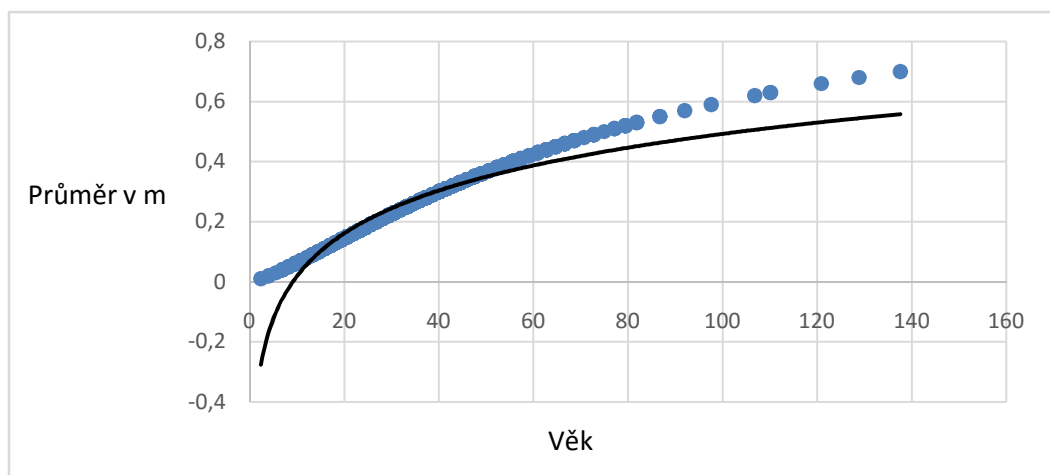
Graf 18 – Závislost věku na výšce stromu



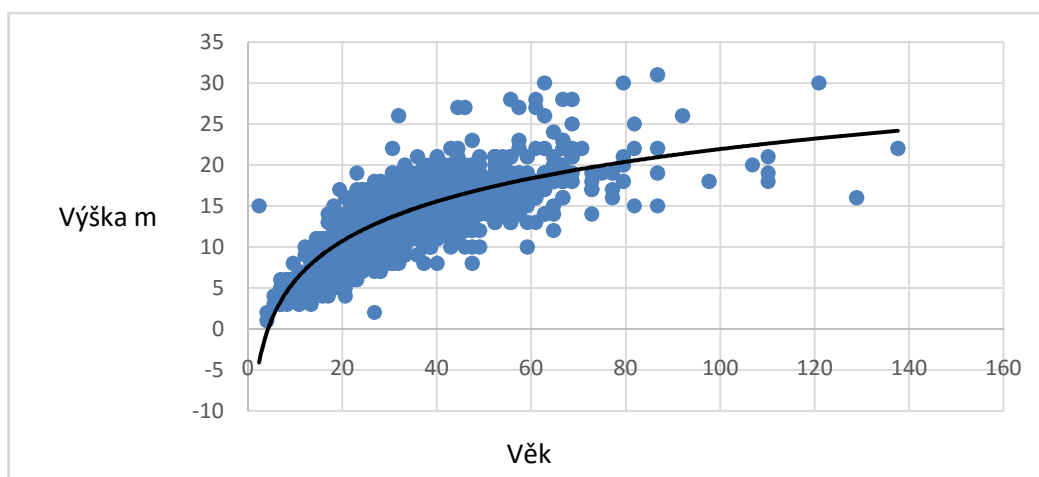
Graf 19 – Závislost věku na ploše koruny

V grafu číslo 17 můžeme vidět, že maximální průměr u jedinců druhu *Acer pseudo-platanus* L. se pohybuje kolem 80 cm. Dle grafu č. 18 odpovídá maximální výška kolem 25 m. Tomu odpovídá z grafu č. 19 plocha koruny, která se pohybuje kolem 200 m².

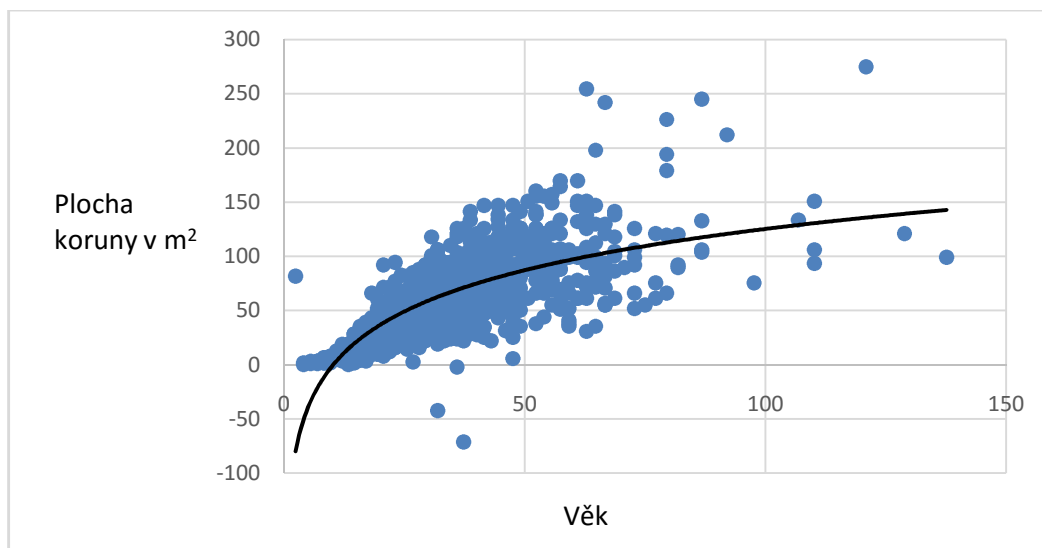
6.4.4. *Betula pendula* Roth.



Graf 20 – Závislost věku na průměru kmene



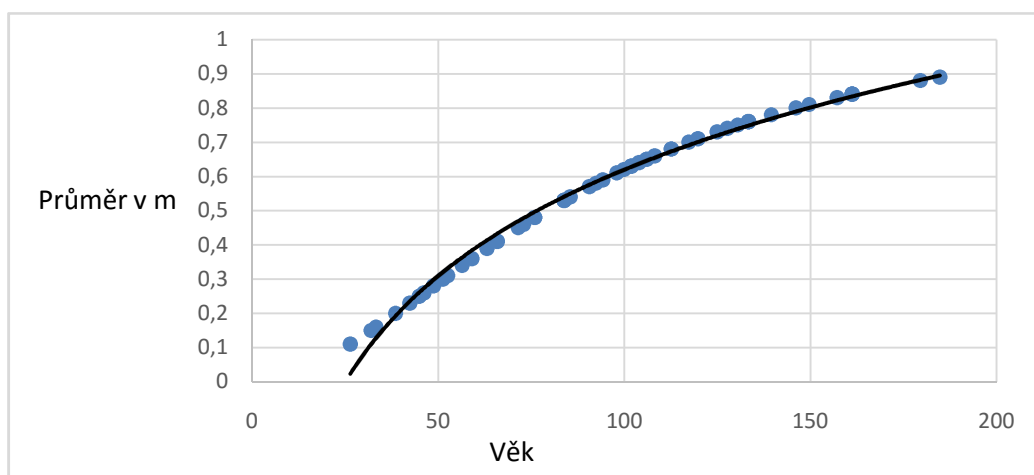
Graf 21 – Závislost věku na výšce stromu



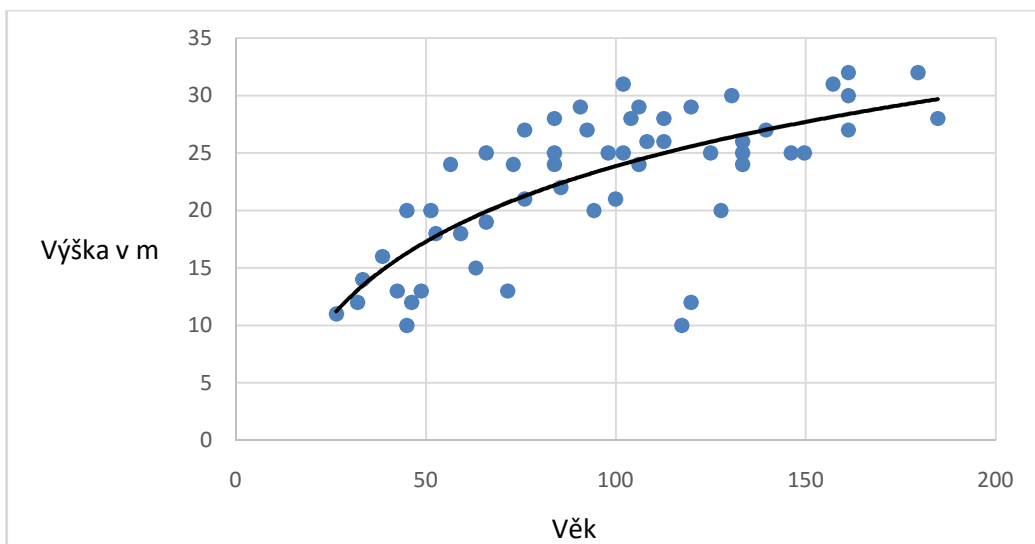
Graf 22 – Závislost věku na ploše koruny

V grafu číslo 20 můžeme vidět, že maximální průměr u jedinců druhu *Betula pendula* Roth. se pohybuje kolem 70 cm. Dle grafu č. 21 je maximální výška do 30 m. Tomu odpovídá z grafu č. 22 plocha koruny, která se pohybuje kolem 250 m².

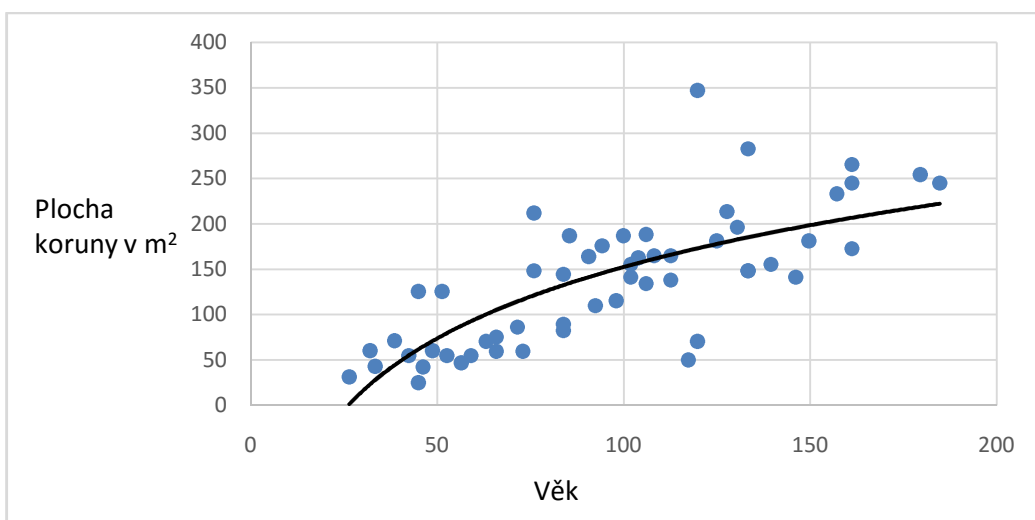
6.4.5. *Fagus sylvatica* L.



Graf 23 – Závislost věku na průměru kmene



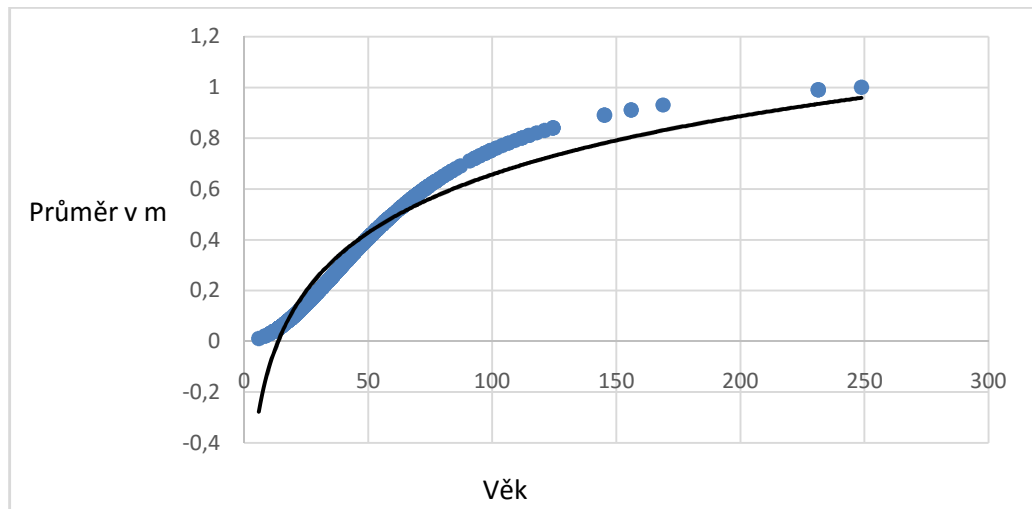
Graf 24 – Závislost věku na výšce stromu



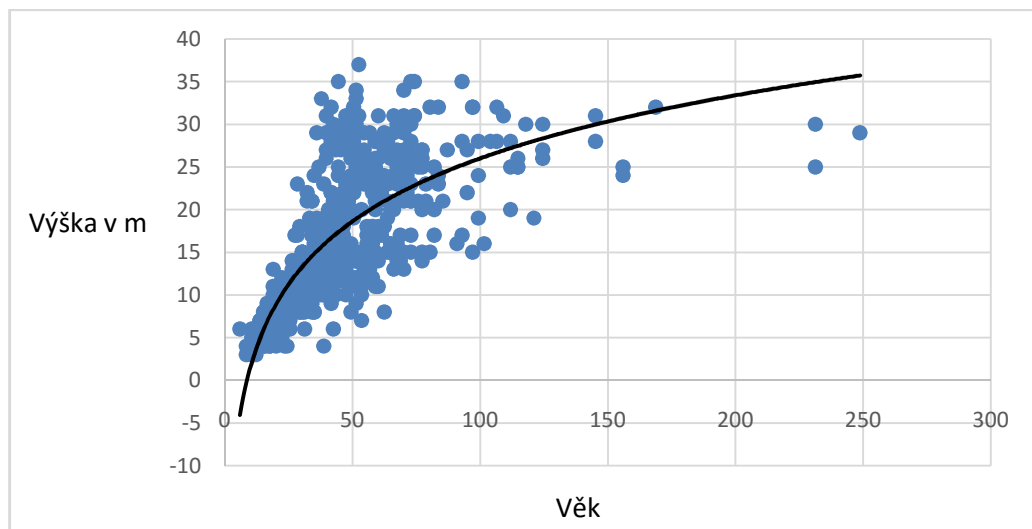
Graf 25 – Závislost věku na ploše koruny

V grafu číslo 23 můžeme vidět, že maximální průměr u jedinců druhu *Fagus sylvatica* L. se pohybuje kolem 90 cm. Dle grafu č. 24 odpovídá maximální výška kolem 30 m. Tomu odpovídá z grafu č. 25 plocha koruny, která se pohybuje kolem 250 m².

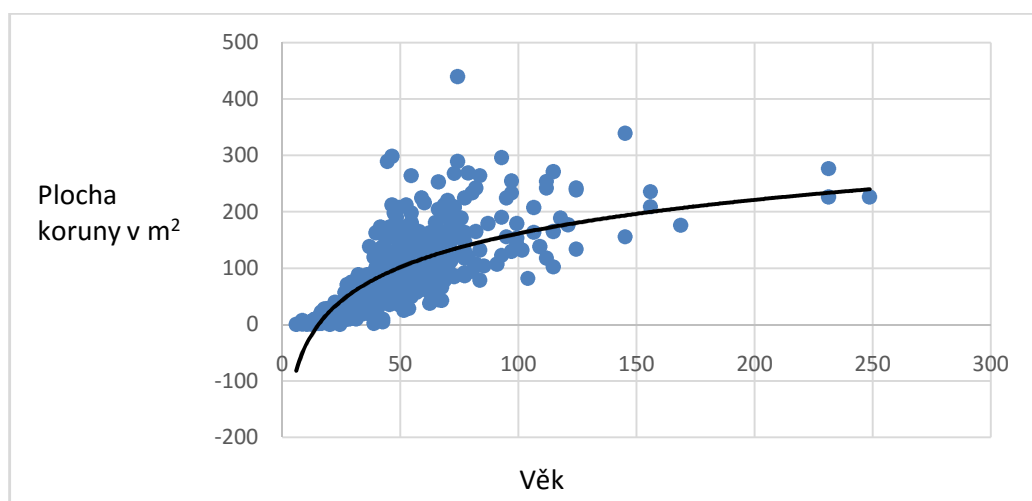
6.4.6. *Fraxinus excelsior* L.



Graf 26 – Závislost věku na průměru kmene



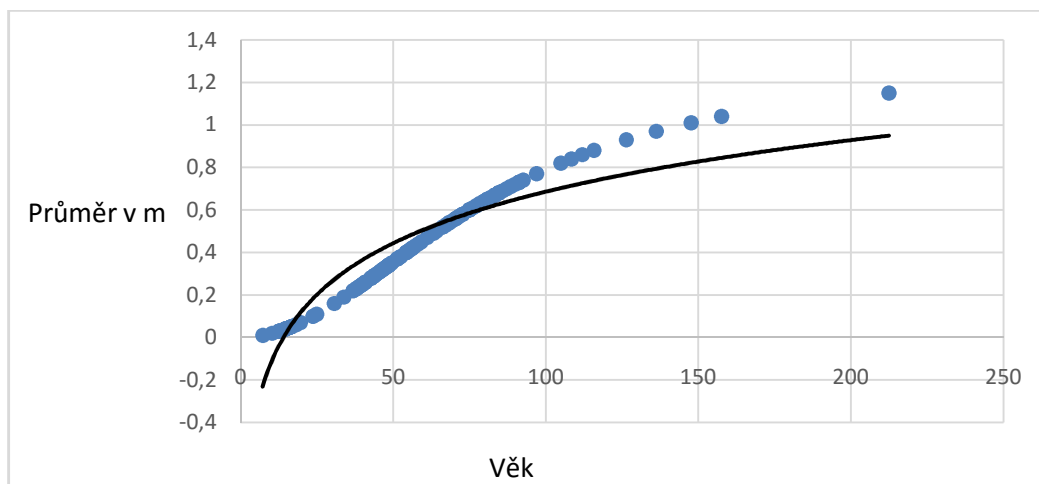
Graf 27 – Závislost věku na výšce stromu



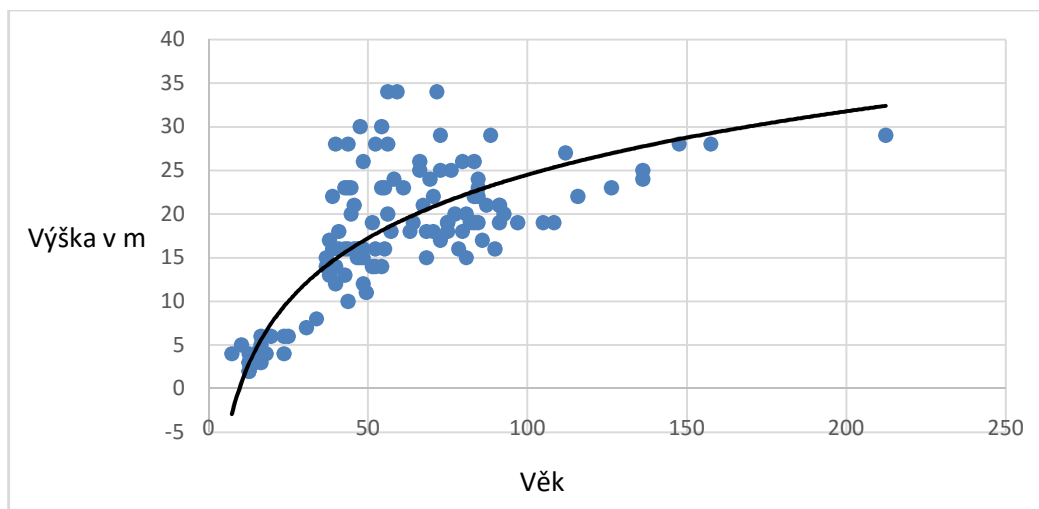
Graf 28 – Závislost věku na ploše koruny

V grafu číslo 26 můžeme vidět, že maximální průměr odpovídá asymptotické veličině s ohledem na průběh funkce, která se pohybuje kolem 100 cm. To znamená, že průměr u jedinců druhu *Fraxinus excelsior*L. bude ve výjimečných případech větší než 100 cm. Dle grafu č. 27 odpovídá maximální výška kolem 35 m. Tomu odpovídá z grafu č. 28 plocha koruny, která se pohybuje kolem 300 m².

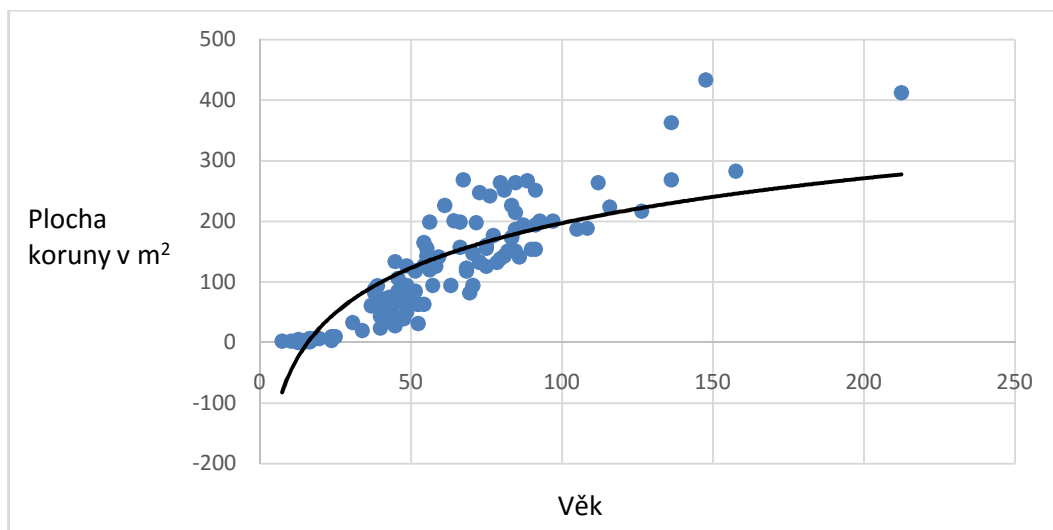
6.4.7. *Quercus robur* L.



Graf 29–Závislost věku na průměru kmene



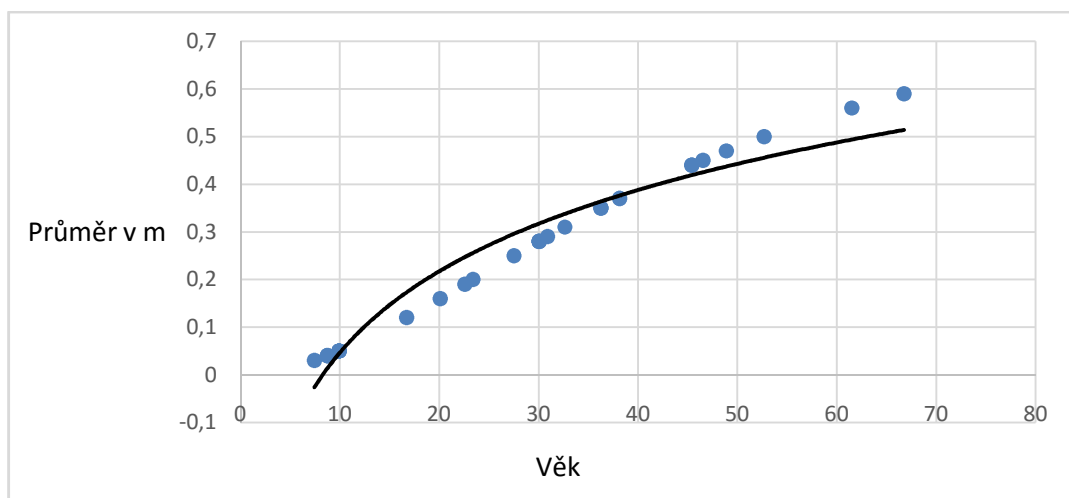
Graf 30 – Závislost věku na výšce stromu



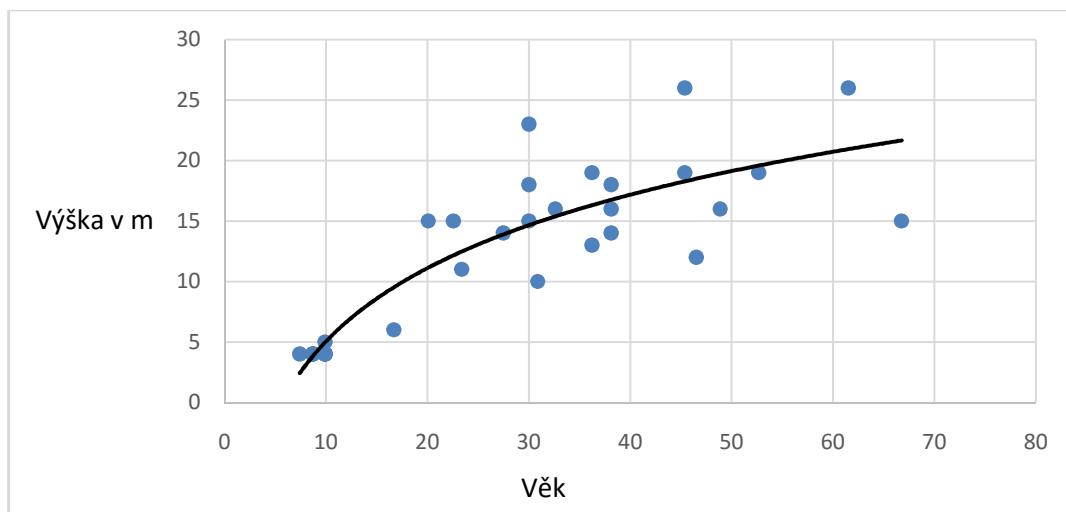
Graf 31 – Závislost věku na ploše koruny

V grafu číslo 29 můžeme vidět, že maximální průměr u jedinců druhu *Quercus robur* L. se pohybuje do 120 cm. Dle grafu č. 30 odpovídá maximální výška do 35 m. Tomu odpovídá z grafu č. 31 plocha koruny, která se pohybuje kolem 300 m².

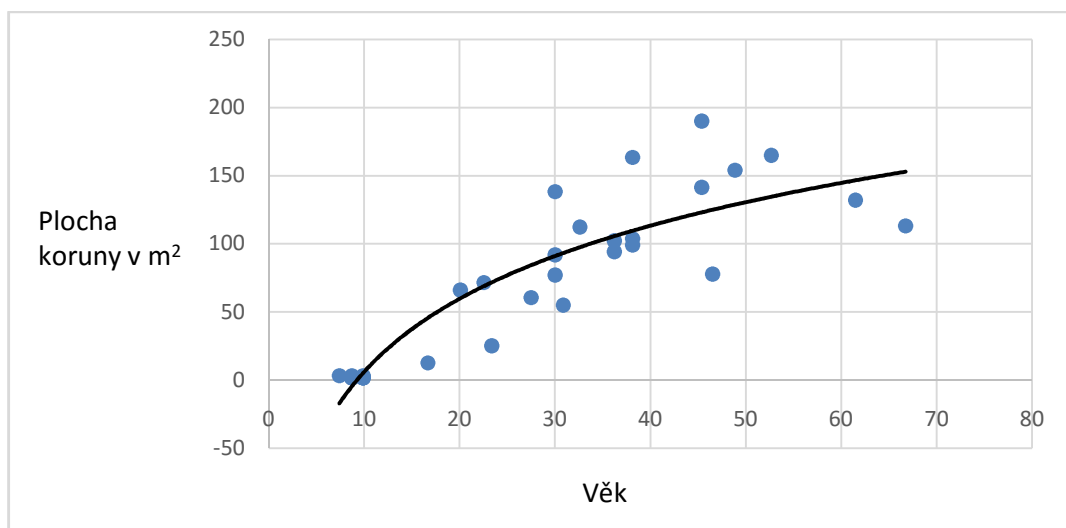
6.4.8. *Quercus rubra* L.



Graf 32 – Závislost věku na průměru kmene



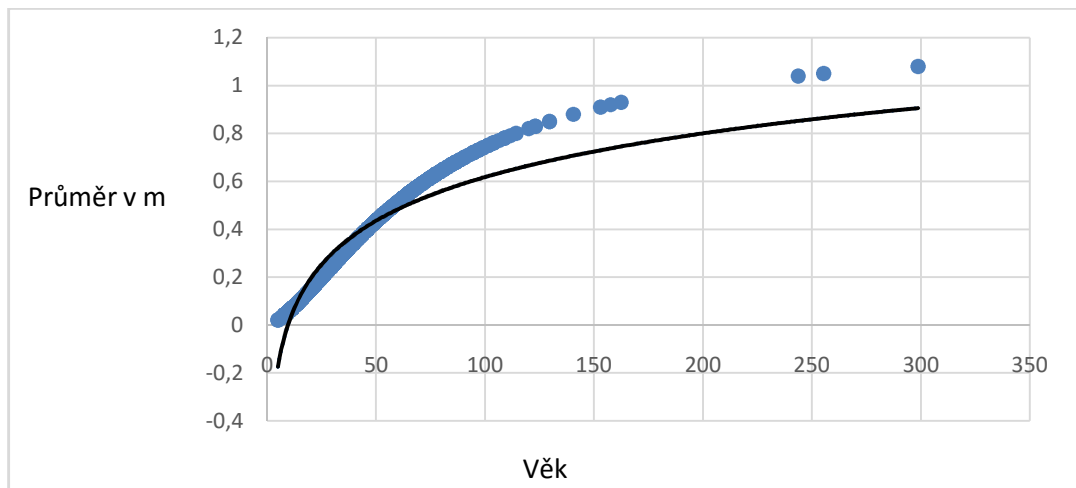
Graf 33 – Závislost věku na výšce stromu



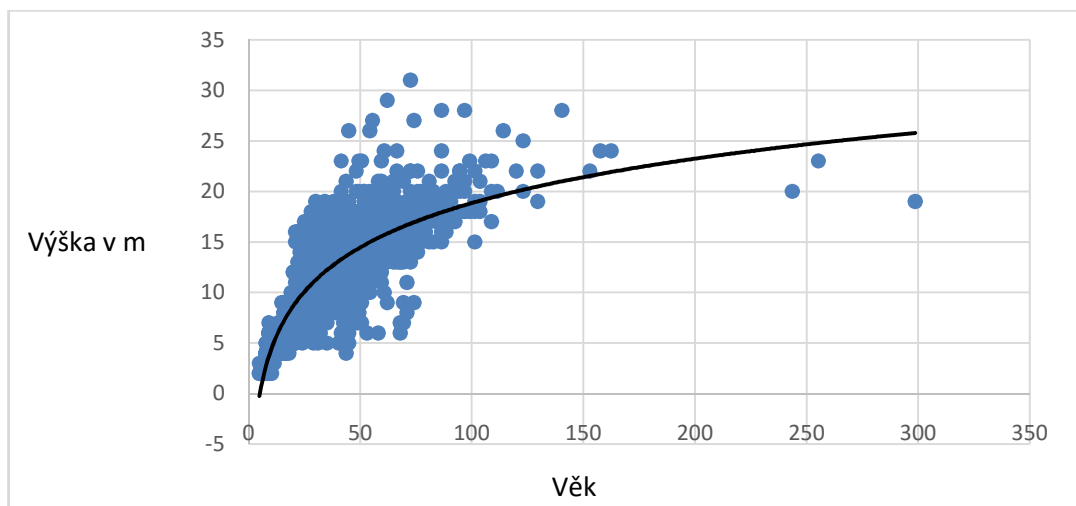
Graf 34 – Závislost věku na ploše koruny

V grafu číslo 32 můžeme vidět, že maximální průměr u jedinců druhu *Quercus rubra* L. se pohybuje kolem 60 cm. Dle grafu č. 33 odpovídá maximální výška kolem 25 m. Tomu odpovídá z grafu č. 24 plocha koruny, která se pohybuje kolem 150 m².

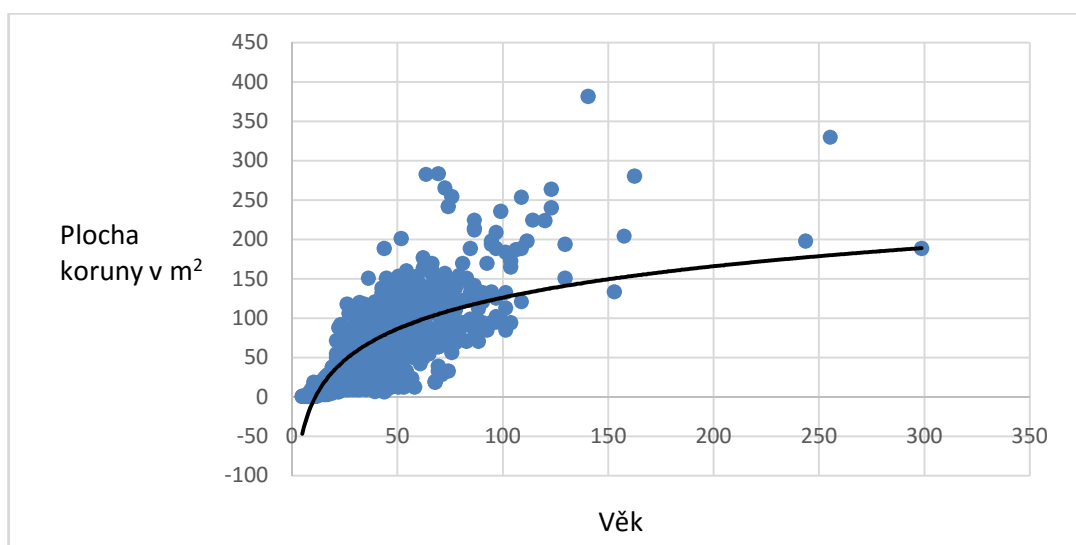
6.4.9. *Tilia cordata* Mill.



Graf 35 – Závislost věku na průměru kmene



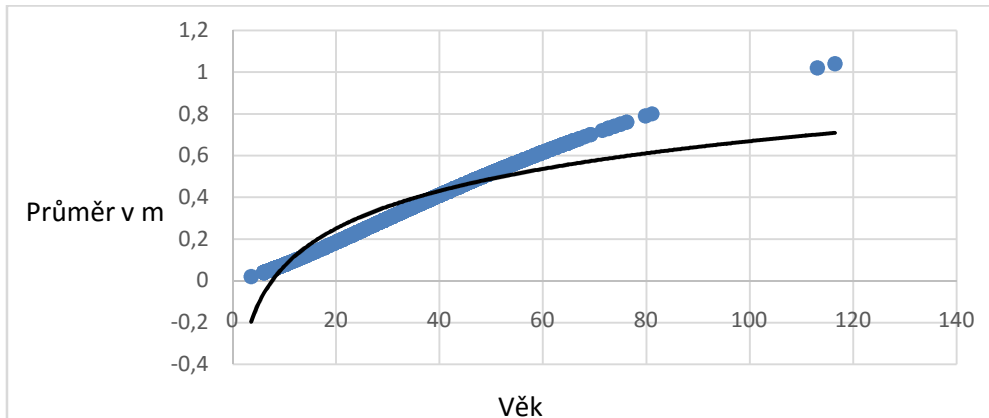
Graf 36 – Závislost věku na výšce stromu



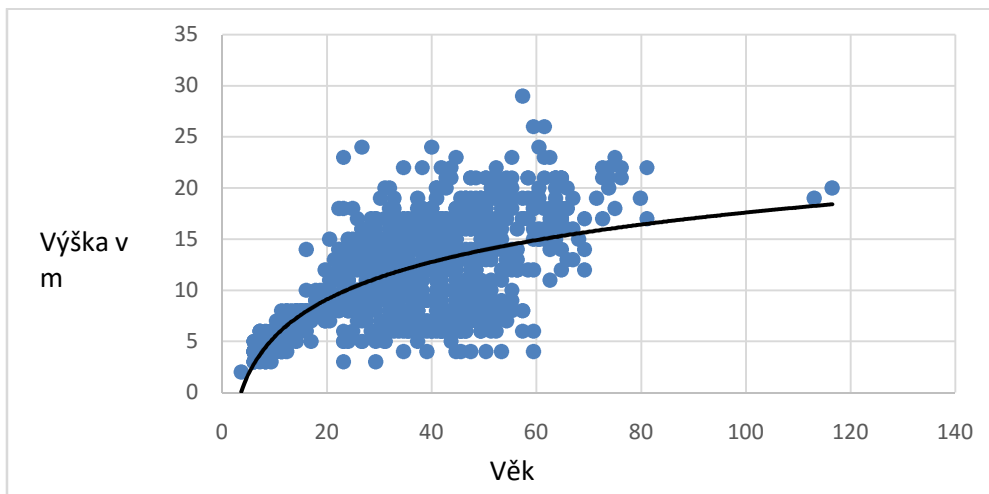
Graf 37 – Závislost věku na ploše koruny

V grafu číslo 35 můžeme vidět, že maximální průměr odpovídá asymptotické veličině s ohledem na průběh funkce, která se pohybuje kolem 100 cm. To znamená, že průměr u jedinců druhu *Tilia cordata* Mill. bude ve výjimečných případech větší než 100 cm. Dle grafu č. 36 odpovídá maximální výška kolem 25 m. Tomu odpovídá z grafu č. 37 plocha koruny, která se pohybuje do 300 m².

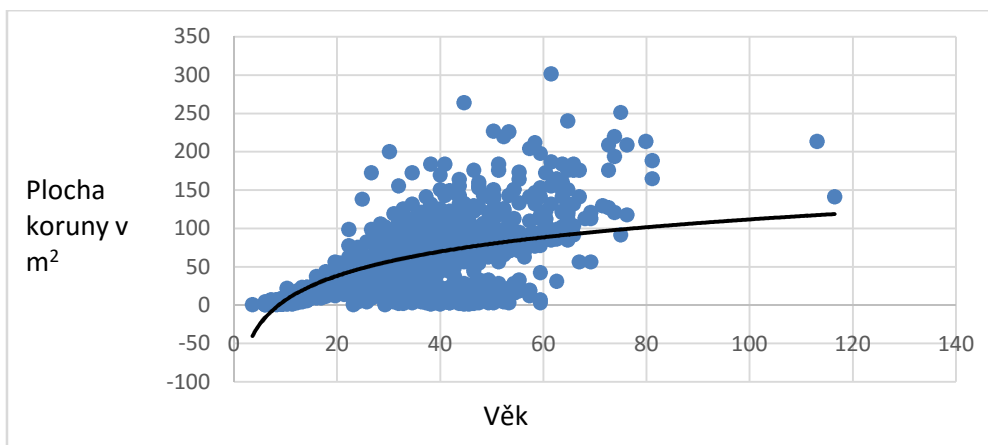
6.4.10. *Tilia platyphyllos* L.



Graf 38 – Závislost věku na průměru kmene



Graf 39 – Závislost věku na výšce stromu



Graf 40 – Závislost věku na ploše koruny

V grafu číslo 38 můžeme vidět, že maximální průměr u jedinců druhu *Tilia platyphyllos* L. se pohybuje kolem 100 cm. Dle grafu č. 33 odpovídá maximální výška kolem 25 m. Tomu odpovídá z grafu č. 24 plocha koruny, která se pohybuje kolem 200 m².

6.5. Výpočet alometrických vztahů pro odolnost stromů na základě dendrometrických veličin

V následující tabulce jsou uvedeny bezrozměrné hodnoty odolnosti stromů vůči se-lhání zlomem při namáhání ohybem a vzpěrem a odolnost vůči vývratu. Můžeme vidět průměrné výsledky pro zlom, vývrat a vzpěr zjišťované na základě měření z dendrometrických veličin (tzn. levá strana rovnic č. 13,21 a 27) , které jsou rozděleny do tří fyziologických fází.

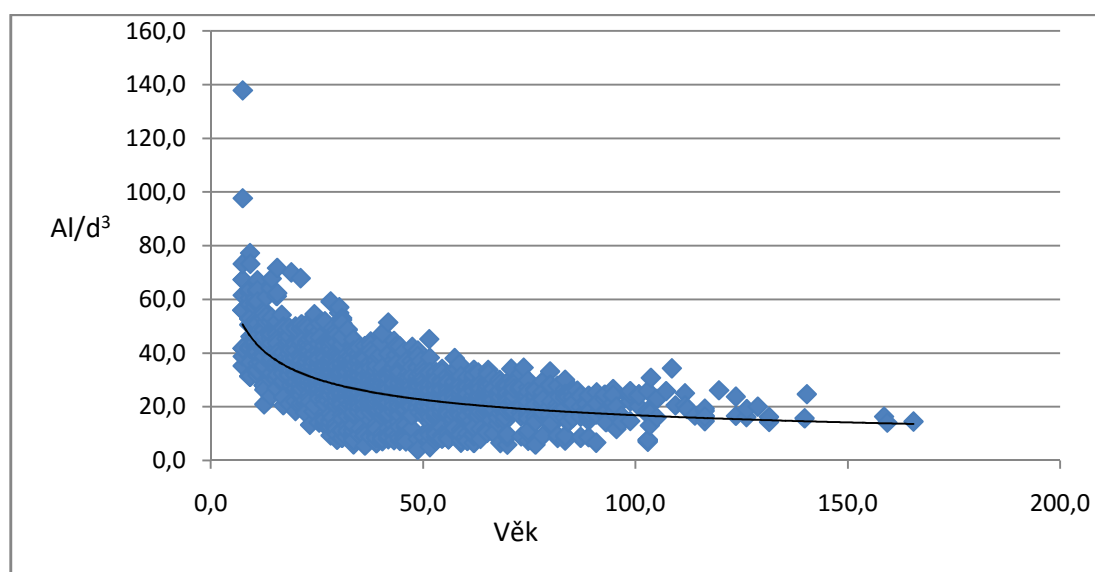
Tabulka 17–Průměrné hodnoty pro zlom, vývrat a vzpěr na základě měření.

Javor			
	Zlom	Vzpěr	Vývrat
Juvenilní 0-20	43,1	63,0	43,1
Dospělý 20-80	26,1	27,3	26,1
Senescentní 80+	19,0	19,4	19,0
Bříza			
	Zlom	Vzpěr	Vývrat
Juvenilní 0-20	41,6	51,5	41,6
Dospělý 20-80	31,6	33,6	31,6
Senescentní 80+	20,0	21,9	20,0
Buk			
	Zlom	Vzpěr	Vývrat
Juvenilní 0-20			
Dospělý 20-80	31,2	35,3	31,2
Senescentní 80+	19,7	22,4	19,7
Jasan			
	Zlom	Vzpěr	Vývrat
Juvenilní 0-20	45,6	69,5	45,6
Dospělý 20-80	28,2	34,0	28,2
Senescentní 80+	18,3	21,2	18,3
Dub			
	Zlom	Vzpěr	Vývrat
Juvenilní 0-20	43,9	73,6	43,9
Dospělý 20-80	28,4	33,0	28,4
Senescentní 80+	18,1	16,4	18,1
Lípa			
	Zlom	Vzpěr	Vývrat
Juvenilní 0-20	36,9	52,9	36,9
Dospělý 20-80	21,8	22,1	21,8
Senescentní 80+	16,1	15,8	16,1

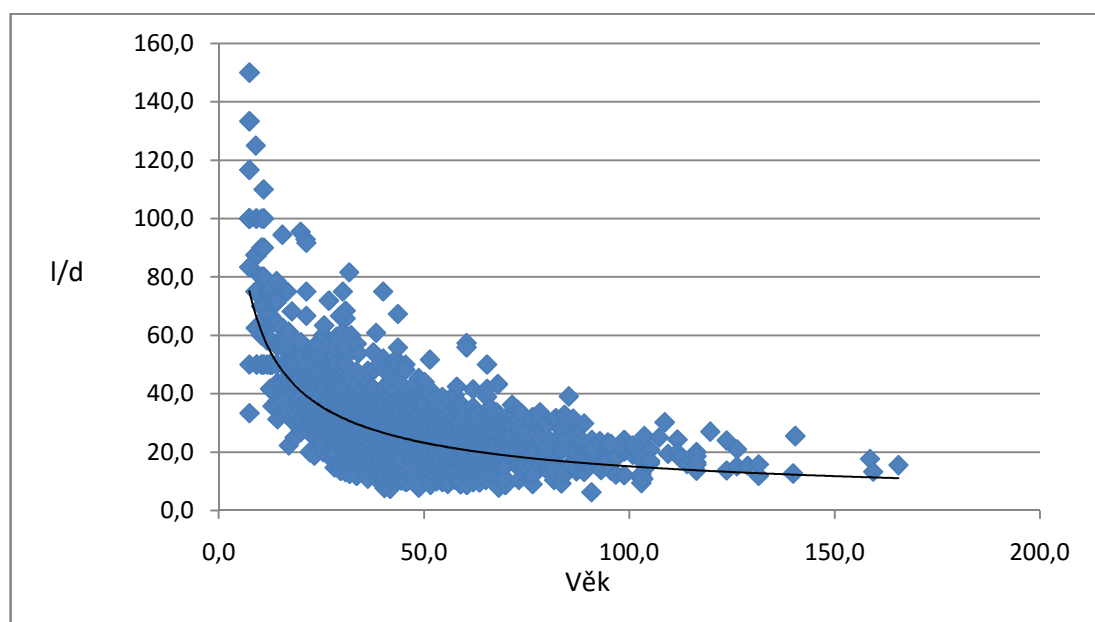
Z tabulky č. 17 vyplývá, že tyto hodnoty postupně klesají s rostoucím věkem.

Pro zjednodušení bylo s těmito výsledky pracováno na úrovni rodů. V následujících grafech můžeme vidět grafické znázornění vypočítaných hodnot v závislosti na věku. Přičemž pro účely této práce nás zajímají maximální hodnoty, které jsou limitní. S těmito maximálními hodnotami se pracuje v kapitole Obalové křivky. Výsledky výpočtu jednotlivých jedinců jsou přilženy v přílohách na CD.

6.5.1. Javor



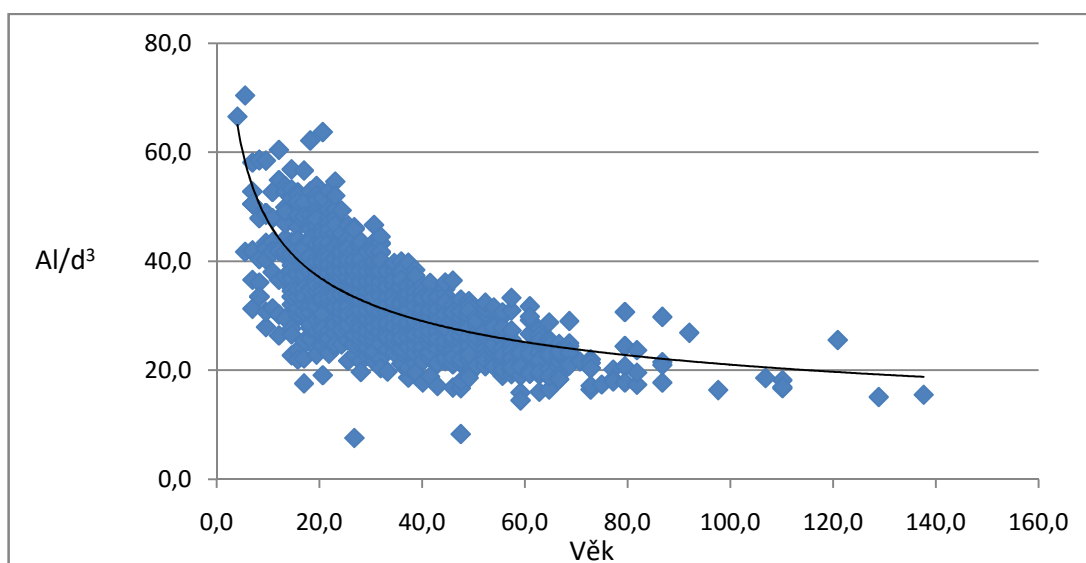
Graf 41 – Závislost věku na výpočtu pro zlom a vývrát



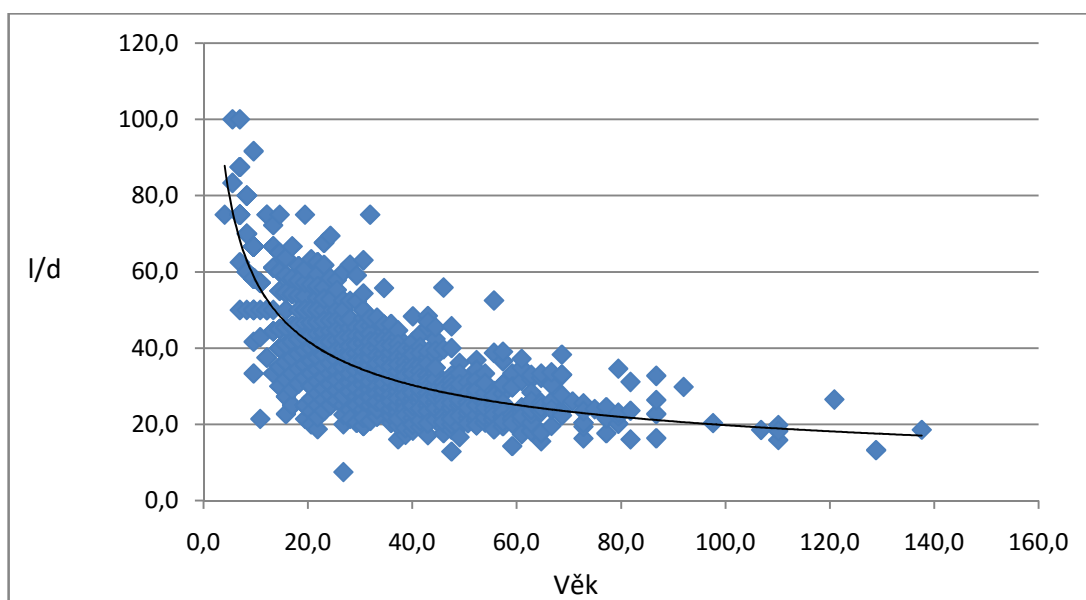
Graf 42 – Závislost věku na výpočtu pro vzpěr

V grafu č. 41 můžeme vidět, že mladí jedinci mají menší průměr, ale větší plochu koruny. Starší jedinci mají větší průměr, ale menší plochu koruny. Extrémní pokles hodnoty Al/d^3 probíhá do 80 let. V grafu č. 42 můžeme vidět, že mladí jedinci mají vyšší těžiště a menší průměr, oproti tomu starší jedinci mají nižší těžiště, ale naopak větší průměr. V obou grafech můžeme vidět že maximální hodnoty jsou závislé na věku, ale minimální jsou konstantní a nezávislé na věku.

6.5.2. Bříza



Graf 43 – Závislost věku na výpočtu pro zlom a vývrat

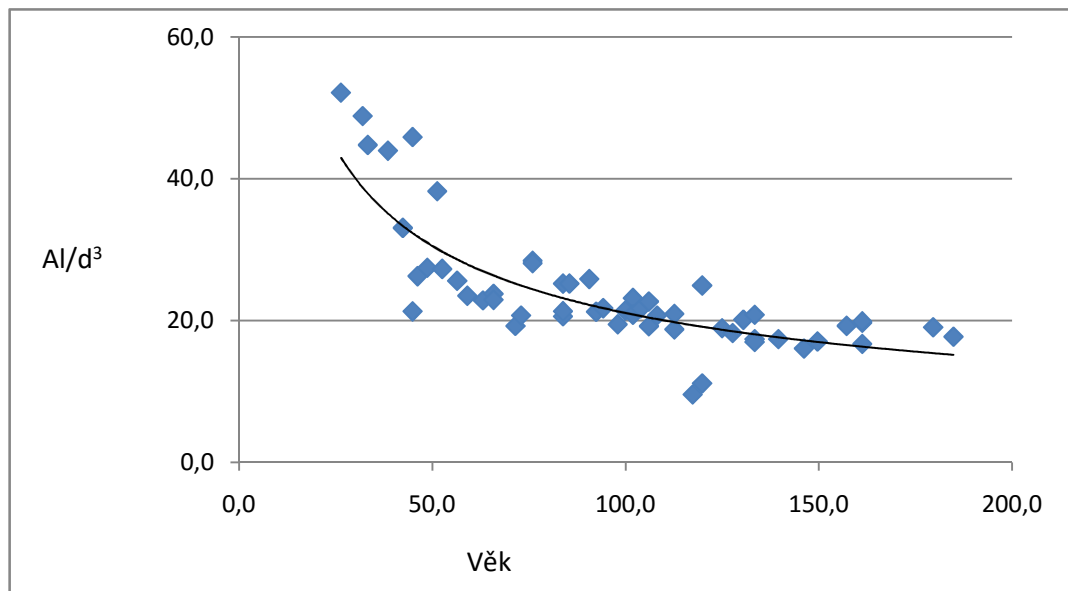


Graf 44 – Závislost věku na výpočtu pro vzpěr

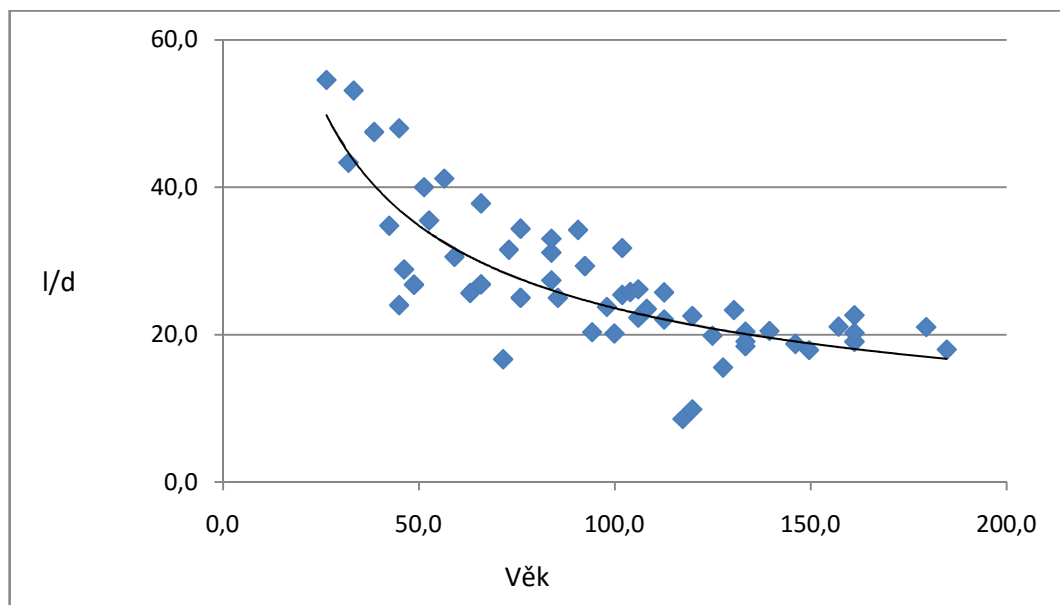
V grafu č. 43 můžeme vidět, že mladí jedinci mají menší průměr, ale větší plochu koruny. Starší jedinci mají větší průměr, ale menší plochu koruny. Extrémní pokles hodnoty

ty Al/d^3 probíhá do 60 let. V grafu č. 44 můžeme vidět, že mladí jedinci mají vyšší těžiště a menší průměr, oproti tomu starší jedinci mají nižší těžiště, ale naopak větší průměr. V obou grafech můžeme vidět že maximální hodnoty jsou závislé na věku, ale minimální jsou konstantní a nezávislé na věku.

6.5.3. Buk



Graf 45 – Závislost věku na výpočtu pro zlom a vývrat

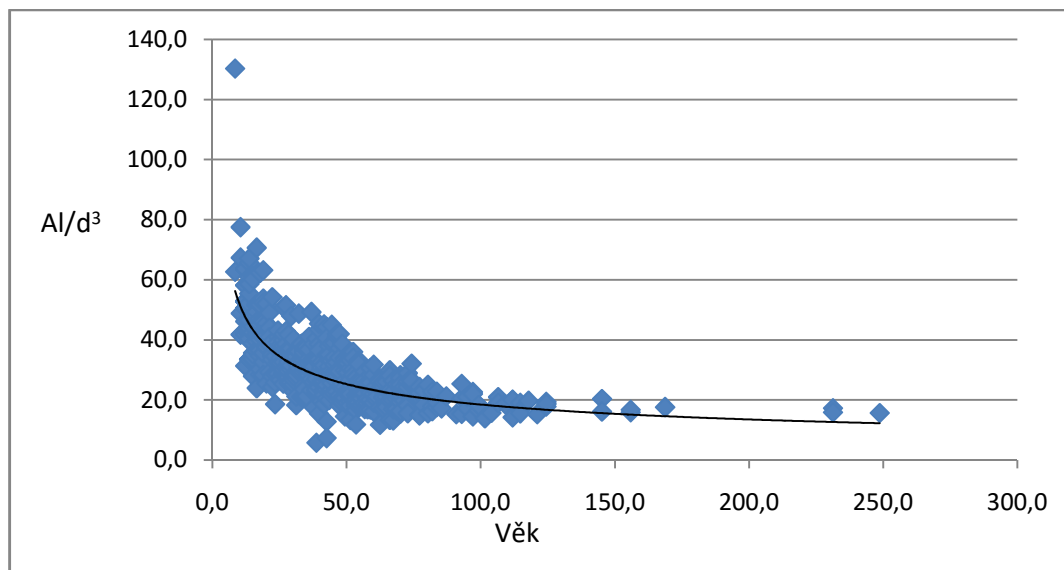


Graf 46 – Závislost věku na výpočtu pro vzpěr

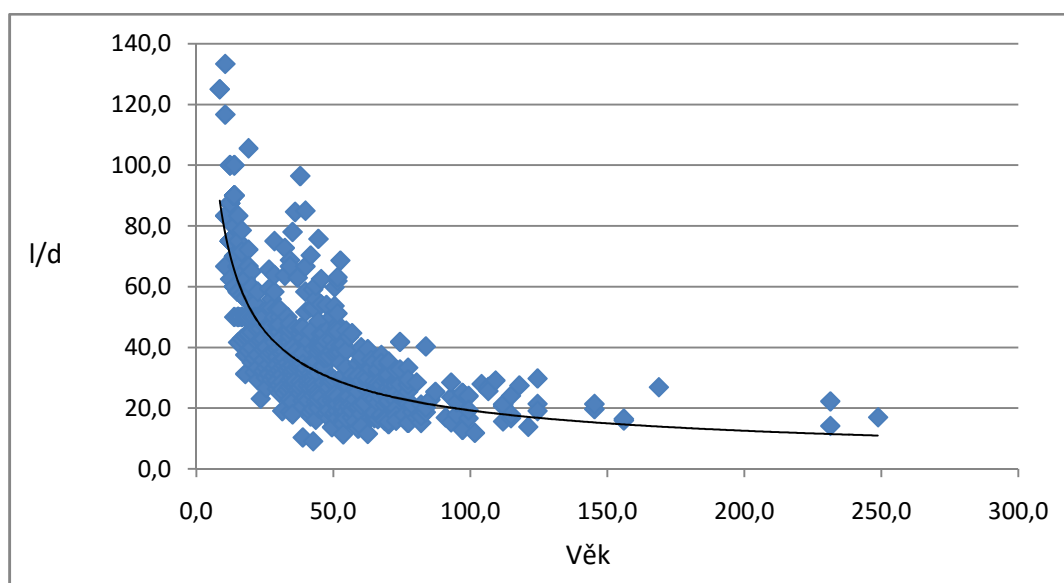
V grafu č. 45 můžeme vidět, že mladí jedinci mají menší průměr, ale větší plochu koruny. Starší jedinci mají větší průměr, ale menší plochu koruny. Extrémní pokles hodnoty Al/d^3 probíhá do 100 let. V grafu č. 46 můžeme vidět, že mladí jedinci mají vyšší tě-

žiště a menší průměr, oproti tomu starší jedinci mají nižší težiště, ale naopak větší průměr.

6.5.4. Jasan



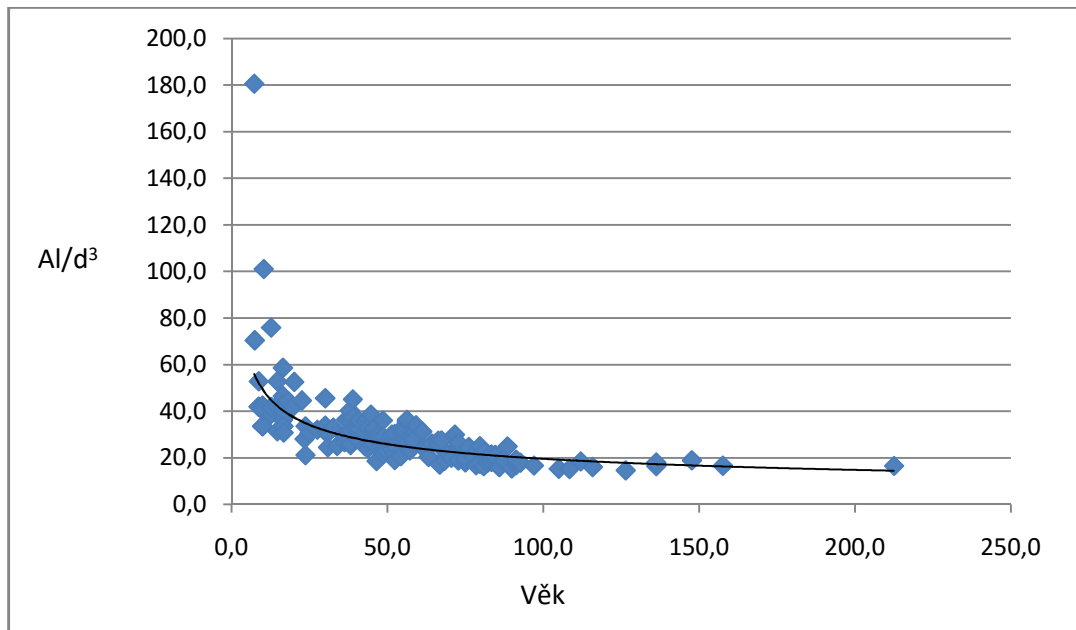
Graf 47 – Závislost věku na výpočtu pro zlom a vývrat



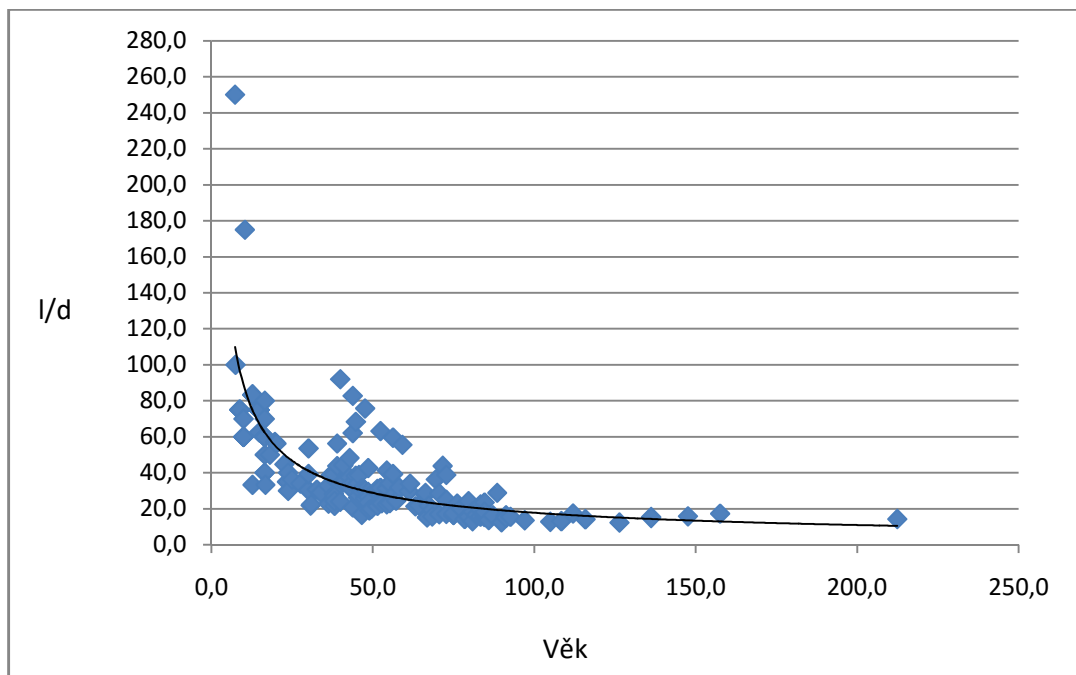
Graf 48 – Závislost věku na výpočtu pro vzpěr

V grafu č. 47 můžeme vidět, že mladí jedinci mají menší průměr, ale větší plochu koruny. Starší jedinci mají větší průměr, ale menší plochu koruny. Extrémní pokles hodnoty Al/d^3 probíhá do 70 let. V grafu č. 48 můžeme vidět, že mladí jedinci mají vyšší težiště a menší průměr, oproti tomu starší jedinci mají nižší težiště, ale naopak větší průměr. V obou grafech můžeme vidět že maximální hodnoty jsou závislé na věku, ale minimální jsou konstantní a nezávislé na věku.

6.5.5. Dub



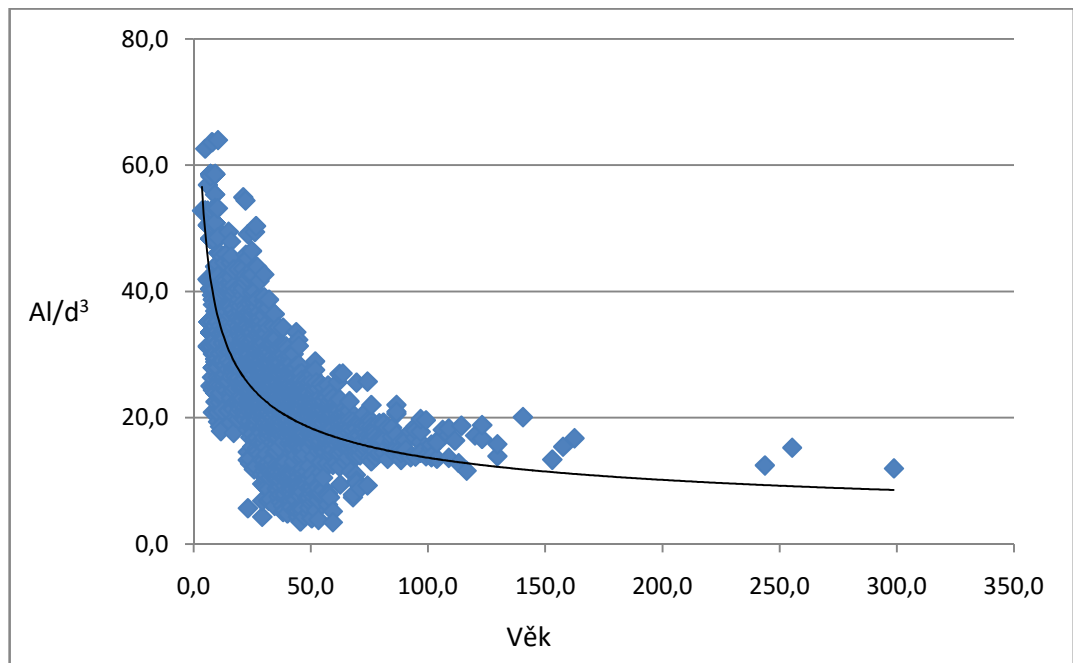
Graf 49 – Závislost věku na výpočtu pro zlom a vývrát



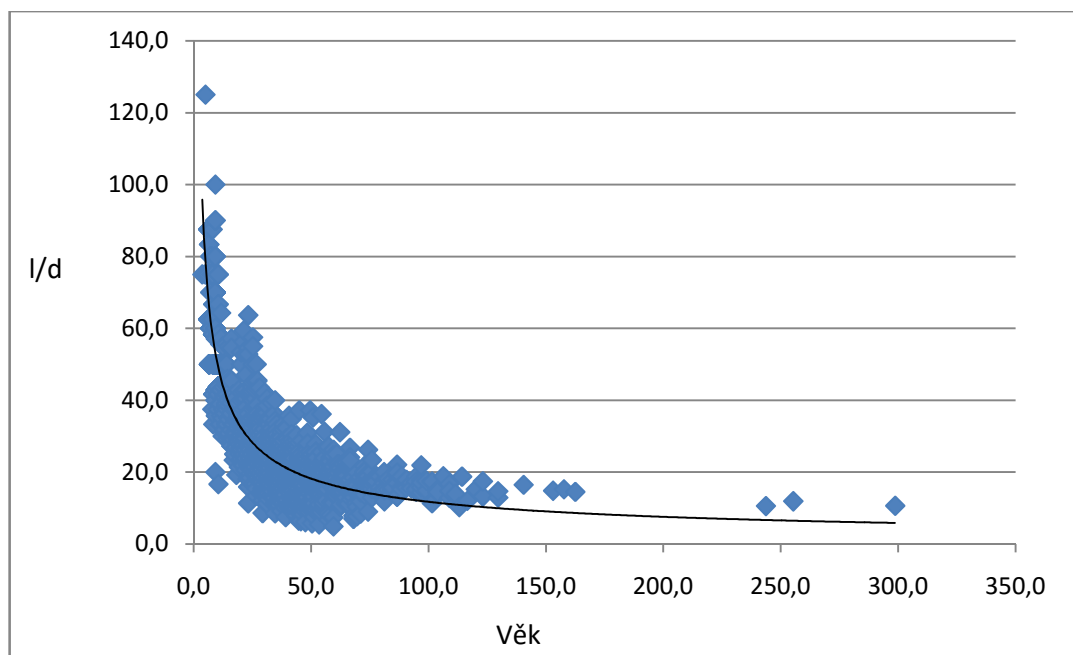
Graf 50 – Závislost věku na výpočtu pro zlom a vývrát

V grafu č. 49 můžeme vidět, že mladí jedinci mají menší průměr, ale větší plochu koruny. Starší jedinci mají větší průměr, ale menší plochu koruny. Extrémní pokles hodnoty Al/d^3 probíhá do 60 let. V grafu č. 50 můžeme vidět, že mladí jedinci mají vyšší těžiště a menší průměr, oproti tomu starší jedinci mají nižší těžiště, ale naopak větší průměr.

6.5.6. Lípa



Graf 51 – Závislost věku na výpočtu pro zlom a vývrát



Graf 52 – Závislost věku na výpočtu pro vzpěr

V grafu č. 51 můžeme vidět, že mladí jedinci mají menší průměr, ale větší plochu koruny. Starší jedinci mají větší průměr, ale menší plochu koruny. Extrémní pokles hodnoty Al/d^3 probíhá do 60 let. V grafu č. 52 můžeme vidět, že mladí jedinci mají vyšší těžiště a menší průměr, oproti tomu starší jedinci mají nižší těžiště, ale naopak větší průměr.

6.6. Obalové křivky

Pro účely této práce nás zajímají maximální hodnoty z předchozích grafů, které jsou limitní pro existenci stromů na stanovišti.

V následujících tabulce jsou uvedeny regresní rovnice obalových křivek pro maximální hodnoty výpočtů na základě dendrometrických veličin pro zlom, vývrat a vzpěr v závislosti na věku.

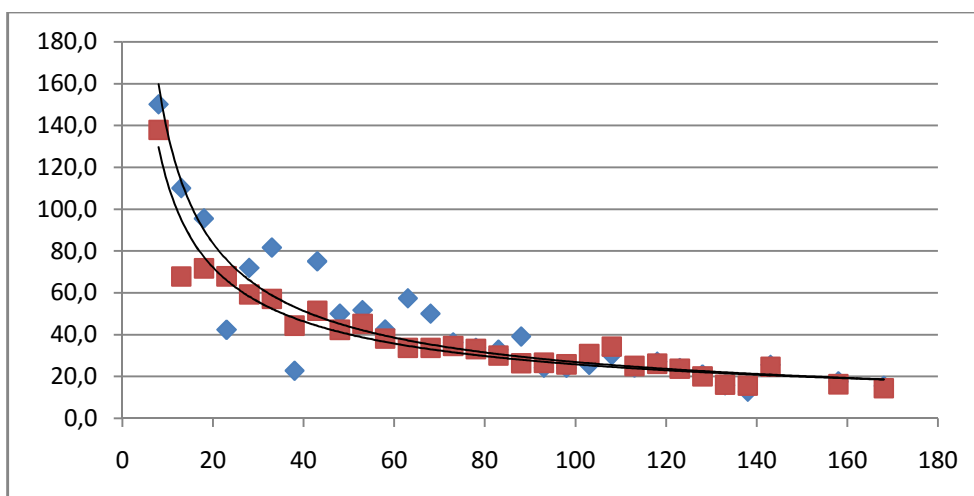
Tabulka 18 – Rovnice regrese pro obalové křivky

	Rovnice regrese					
	Zlom		Vzpěr		Vývrat	
Javor	489,6	-0,63	692,7	-0,7	489,6	-0,63
	$y=489,6x^{-0,63}$		$y=692,7x^{-0,70}$		$y=489,6x^{-0,63}$	
Bříza	182,5	-0,44	262,8	-0,49	182,5	-0,44
	$y=182,5x^{-0,44}$		$y=262,8x^{-0,49}$		$y=182,5x^{-0,44}$	
Buk	305,1	-0,55	382	-0,57	305,1	-0,55
	$y=305,1x^{-0,55}$		$y=382,0x^{-0,57}$		$y=305,1x^{-0,55}$	
Jasan	428,7	-0,63	712,7	-0,67	428,7	-0,63
	$y=428,7x^{-0,63}$		$y=712,7x^{-0,67}$		$y=428,7x^{-0,63}$	
Dub	576,9	-0,72	1789	-0,96	576,9	-0,72
	$y=576,9x^{-0,72}$		$y=1789,0x^{-0,96}$		$y=576,9x^{-0,72}$	
Lípa	176,4	-0,47	356,5	-0,62	176,4	-0,47
	$y=176,4x^{-0,47}$		$y=356,5x^{-0,62}$		$y=176,4x^{-0,47}$	
Legenda:						
Taxon	a	b				
	$y=ax^b$					

V tabulce č. 18 můžeme vidět, že koeficienty u lípy a břízy jsou si navzájem podobné. Stejně tak to platí i pro jasan a javor, jediný s rozdílnými koeficienty je buk a dub.

V následujících grafech jsou uvedeny obalové křivky pro maximální hodnoty výpočtů z dendrometrických veličin pro zlom, vývrat a vzpěr v závislosti na věku.

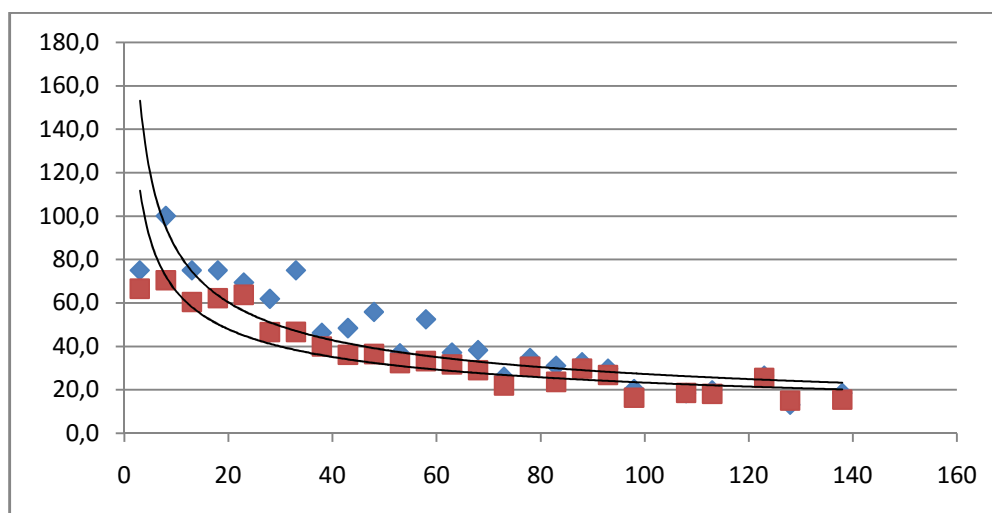
Javor:



Graf 53 – Obalové křivky pro maxima zlomu a vývratu (červeně) a vzpěru (modře) v závislosti na věku

V grafu č. 53 můžeme vidět, že hodnoty z výpočtu Al/d^3 pro javor jsou menší než hodnoty z výpočtu l/d . Hodnoty Al/d^3 jsou menší, proto můžeme tvrdit, že se tento výpočet hodí více k posouzení stability, protože je na straně bezpečnosti. To znamená, že nemůžeme stabilitu posuzovat jen na základě výšky těžiště a průměru, ale musíme mezi tyto hodnoty zahrnout i náporovou plochu koruny.

Bříza:

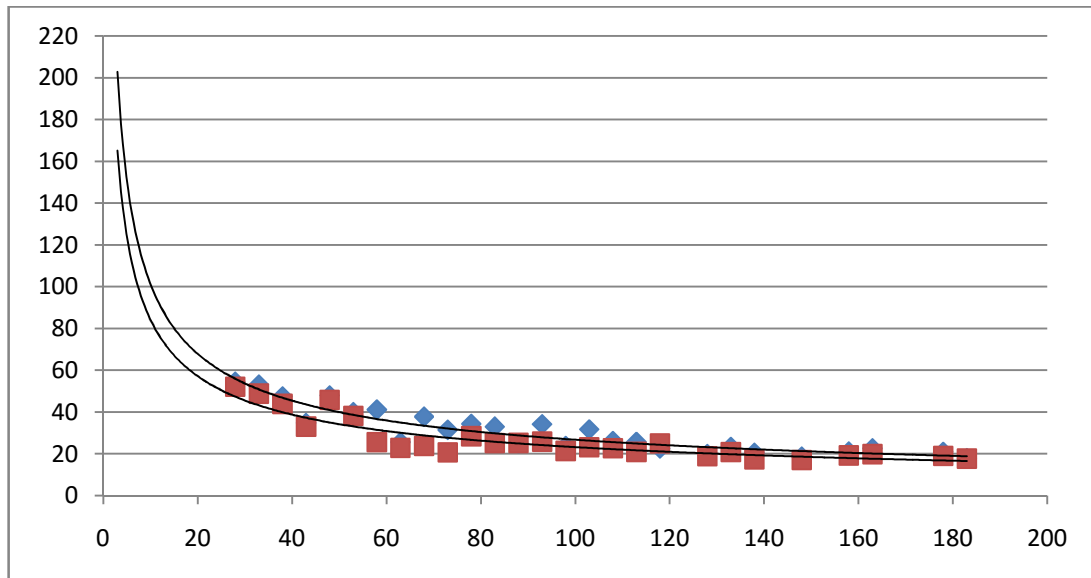


Graf 54 - Obalové křivky pro maxima zlomu a vývratu (červeně) a vzpěru (modře) v závislosti na věku

V grafu č. 54 můžeme vidět, že hodnoty z výpočtu Al/d^3 pro břízu jsou menší než hodnoty z výpočtu l/d . Hodnoty Al/d^3 jsou menší, proto můžeme tvrdit, že se tento vý-

počet hodí více k posouzení stability, protože je na straně bezpečnosti. To znamená, že nemůžeme stabilitu posuzovat jen na základě výšky těžiště a průměru, ale musíme mezi tyto hodnoty zahrnout i náporovou plochu koruny.

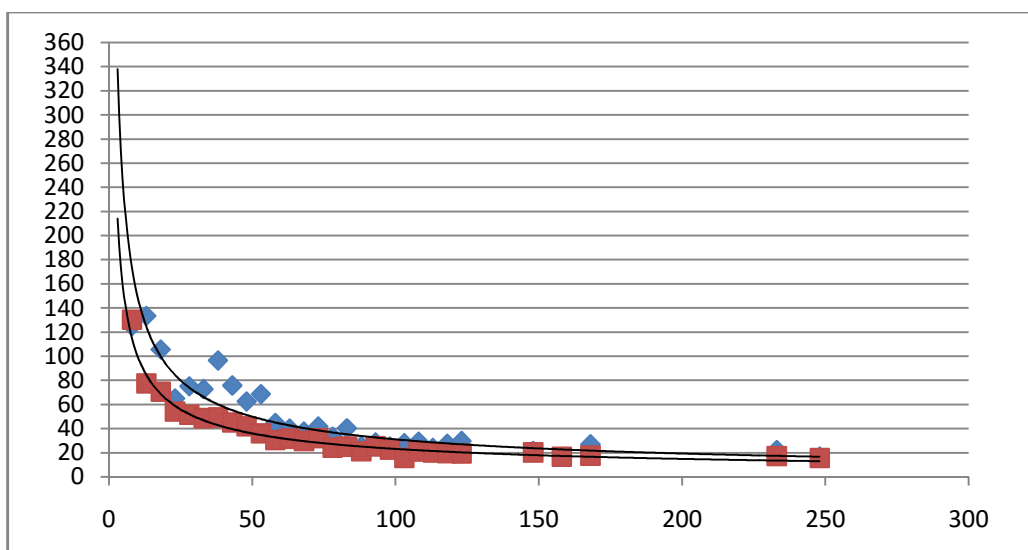
Buk:



Graf 55 - Obalové křivky pro maxima zlomu a vývratu (červeně) a vzpěru (modře) v závislosti na věku

V grafu č. 55 můžeme vidět, že hodnoty z výpočtu Al/d^3 pro buk jsou menší než hodnoty z výpočtu l/d . Hodnoty Al/d^3 jsou menší, proto můžeme tvrdit, že se tento výpočet hodí více k posouzení stability, protože je na straně bezpečnosti. To znamená, že nemůžeme stabilitu posuzovat jen na základě výšky těžiště a průměru, ale musíme mezi tyto hodnoty zahrnout i náporovou plochu koruny.

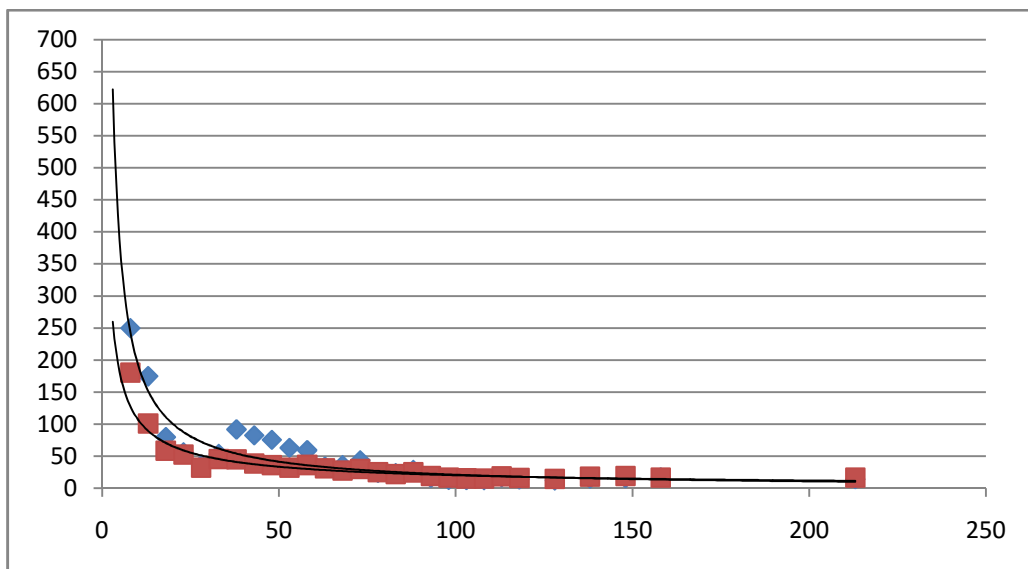
Jasan:



Graf 56 - Obalové křivky pro maxima zlomu a vývratu (červeně) a vzpěru (modře) v závislosti na věku

V grafu č. 56 můžeme vidět, že hodnoty z výpočtu Al/d^3 pro jasan jsou menší než hodnoty z výpočtu l/d . Hodnoty Al/d^3 jsou menší, proto můžeme tvrdit, že se tento výpočet hodí více k posouzení stability, protože je na straně bezpečnosti. To znamená, že nemůžeme stabilitu posuzovat jen na základě výšky těžiště a průměru, ale musíme mezi tyto hodnoty zahrnout i náporovou plochu koruny.

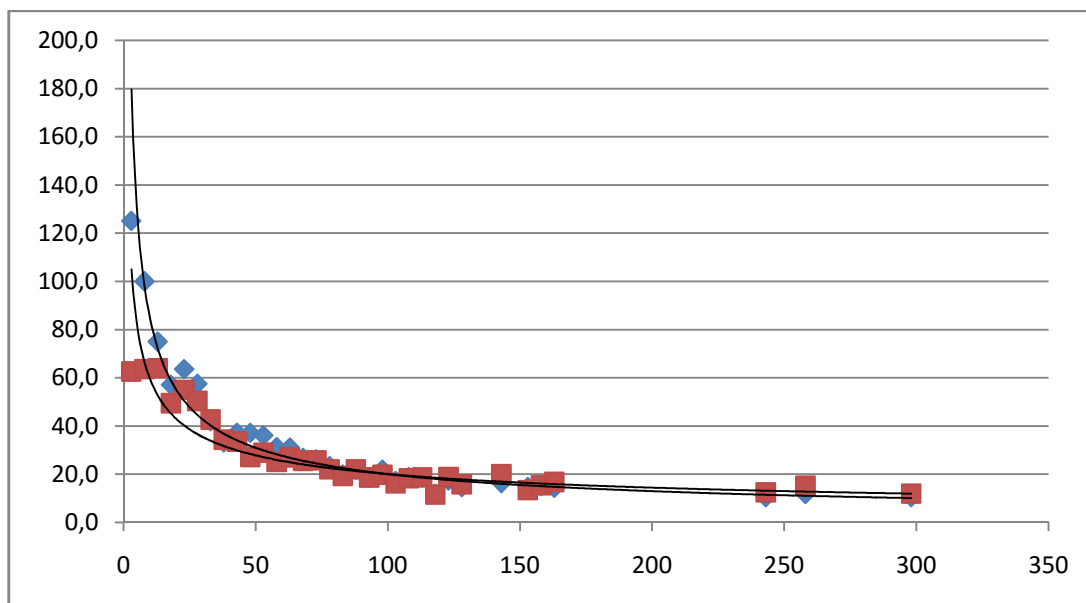
Dub:



Graf 57 - Obalové křivky pro maxima zlomu a vývratu (červeně) a vzpěru (modře) v závislosti na věku

V grafu č. 57 můžeme vidět, že hodnoty z výpočtu Al/d^3 pro dub jsou menší než hodnoty z výpočtu l/d . Hodnoty Al/d^3 jsou menší, proto můžeme tvrdit, že se tento výpočet hodí více k posouzení stability, protože je na straně bezpečnosti. To znamená, že nemůžeme stabilitu posuzovat jen na základě výšky těžiště a průměru, ale musíme mezi tyto hodnoty zahrnout i náporovou plochu koruny.

Lípa:



Graf 58 - Obalové křivky pro maxima zlomu a vývratu (červeně) a vzpěru (modře) v závislosti na věku

V grafu č. 58 můžeme vidět, že hodnoty z výpočtu Al/d^3 pro lípu jsou menší než hodnoty z výpočtu l/d . Hodnoty Al/d^3 jsou menší, proto můžeme tvrdit, že se tento výpočet hodí více k posouzení stability, protože je na straně bezpečnosti. To znamená, že nemůžeme stabilitu posuzovat jen na základě výšky těžiště a průměru, ale musíme mezi tyto hodnoty zahrnout i náporovou plochu koruny.

6.7. Výpočet alometrických vztahů pro odolnost stromů na základě mechaniky

V následující tabulce můžeme vidět výsledky zjišťované na základě výpočtu vzorců č. 13, 21 a 27.

Tabulka 19 – Výsledky pro zlom, vývrát a vzpěr na základě výpočtu

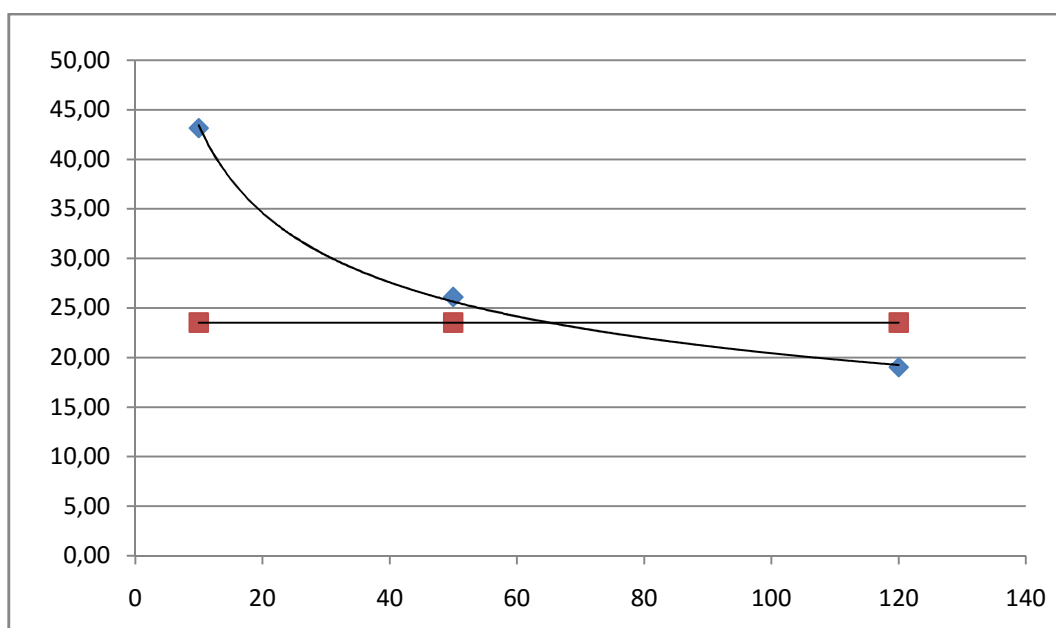
	Zlom	Vývrát	Vzpěr
Javor	23,5	24,6	20,5
Bříza	30,0	34,7	25,7
Buk	23,9	26,3	22,6
Jasan	26,1	28,6	22,8
Dub	24,9	25,9	20,6
Lípa	22,4	23,3	18,8

V tabulce č. 19 můžeme vidět, že nejvyšší hodnoty pro zlom, vývrát a vzpěr má bříza a nejnižší hodnoty má lípa.

6.8. Porovnání obalové křivky s hodnotou výpočtu

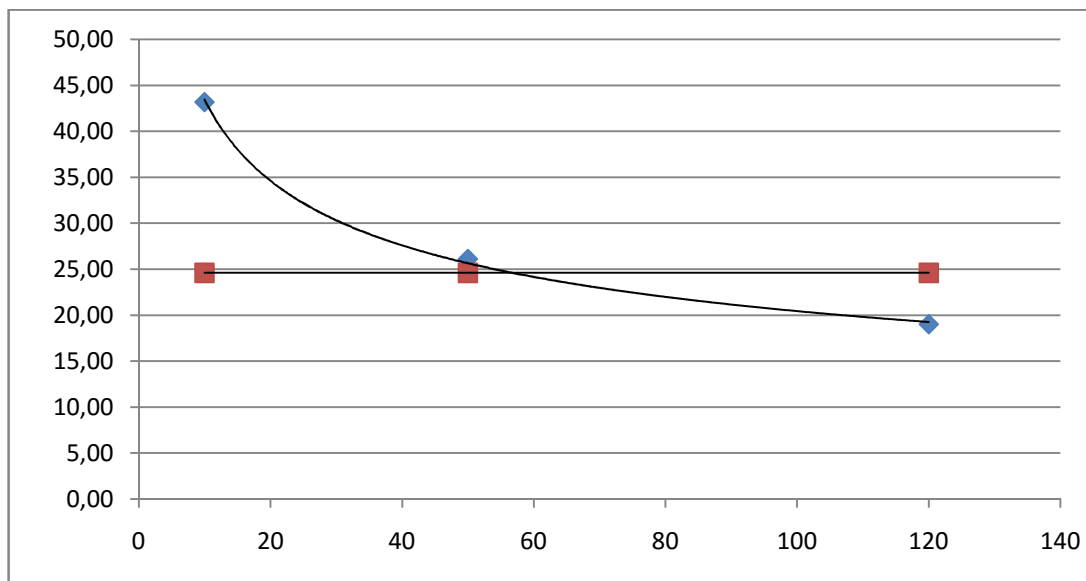
V následujících grafech můžeme vidět porovnání obalové křivky pro průměrnou střední hodnotu jednotlivých rodů v daných fyziologických fázích pro zlom, vývrát a vzpěr na základě dendrometrických výpočtů v porovnání s hodnotou z odvozených výpočtů na základě mechaniky.

Javor:



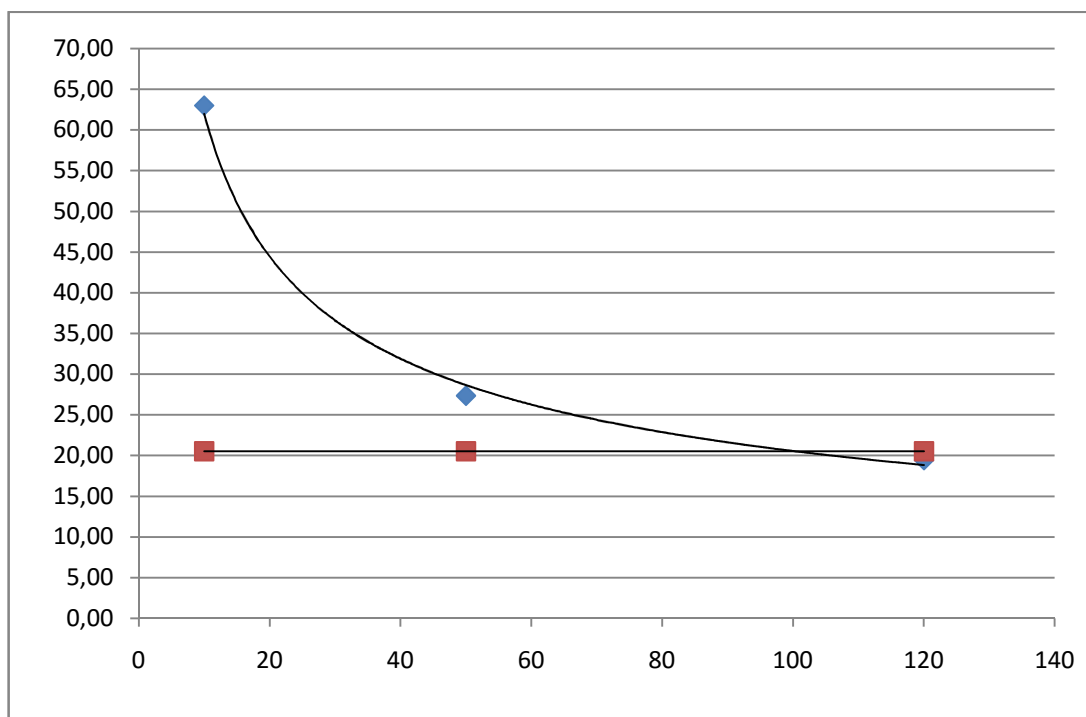
Graf 59 – Obalová křivka (modře) v porovnání s hodnotou odvozenou z výpočtu (červeně), kde na ose x je věk a na ose y je hodnota odvozená z výpočtu pro zlom

V grafu č. 59 můžeme vidět, že hodnoty pro javor ve fázi dospělosti jsou téměř podobné. Z toho můžeme usoudit, že zde vypočítaný vztah pro zlom platí.



Graf 60 - Obalová křivka (modře) v porovnání s hodnotou odvozenou z výpočtu (červeně), kde na ose x je věk a na osy y je hodnota odvozená z výpočtu pro vývrát

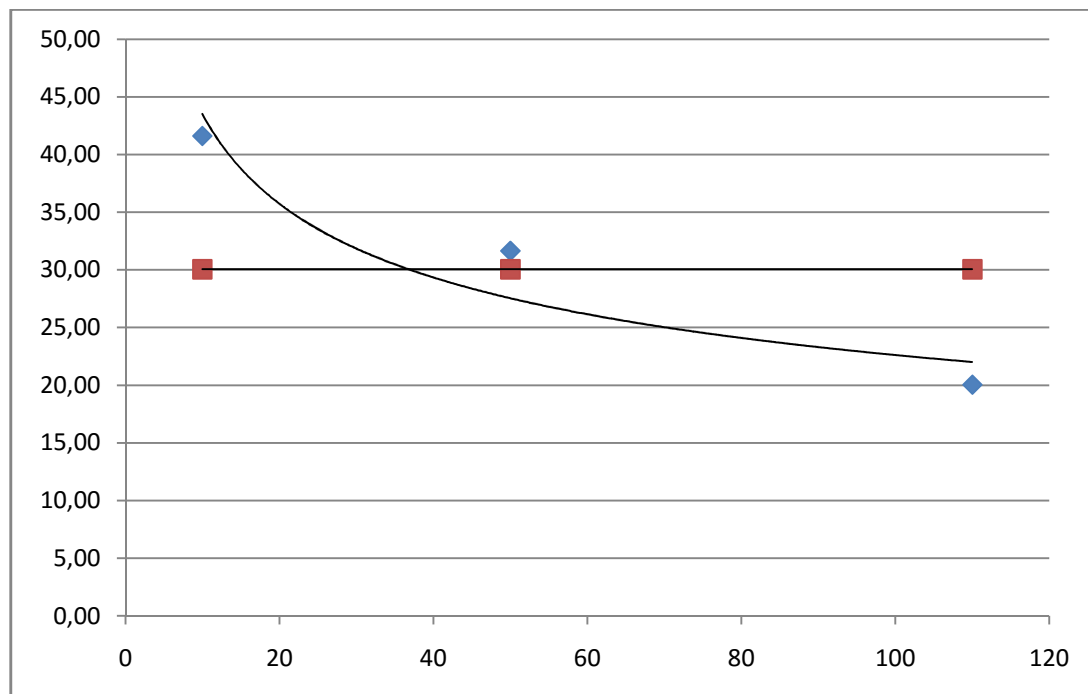
V grafu č. 60 můžeme vidět, že pro javor hodnoty ve fázi dospělosti jsou téměř podobné. Z toho můžeme usoudit, že zde vypočítaný vztah pro vývrát platí.



Graf 61 - Obalová křivka (modře) v porovnání s hodnotou odvozenou z výpočtu (červeně), kde na ose x je věk a na ose y je hodnota odvozená z výpočtu pro vzpěr

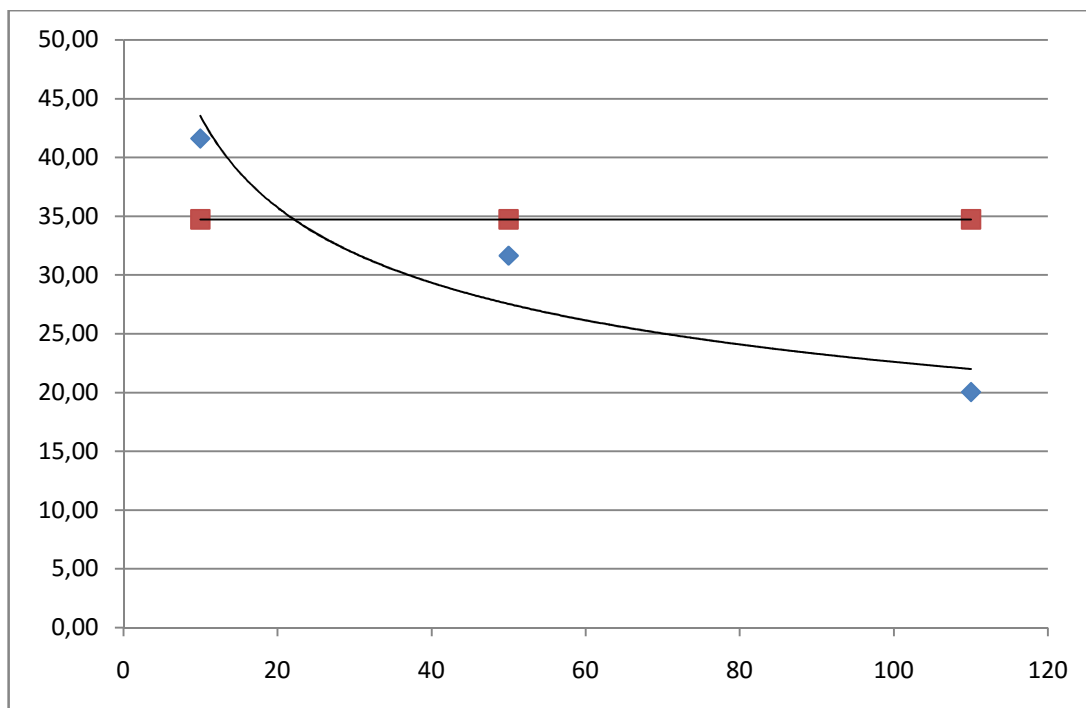
V grafu č. 61 můžeme vidět, že pro javor hodnoty ve fázi dospělosti se liší. Z toho můžeme usoudit, že zde vypočítaný vztah pro vzpěr neplatí.

Bříza:



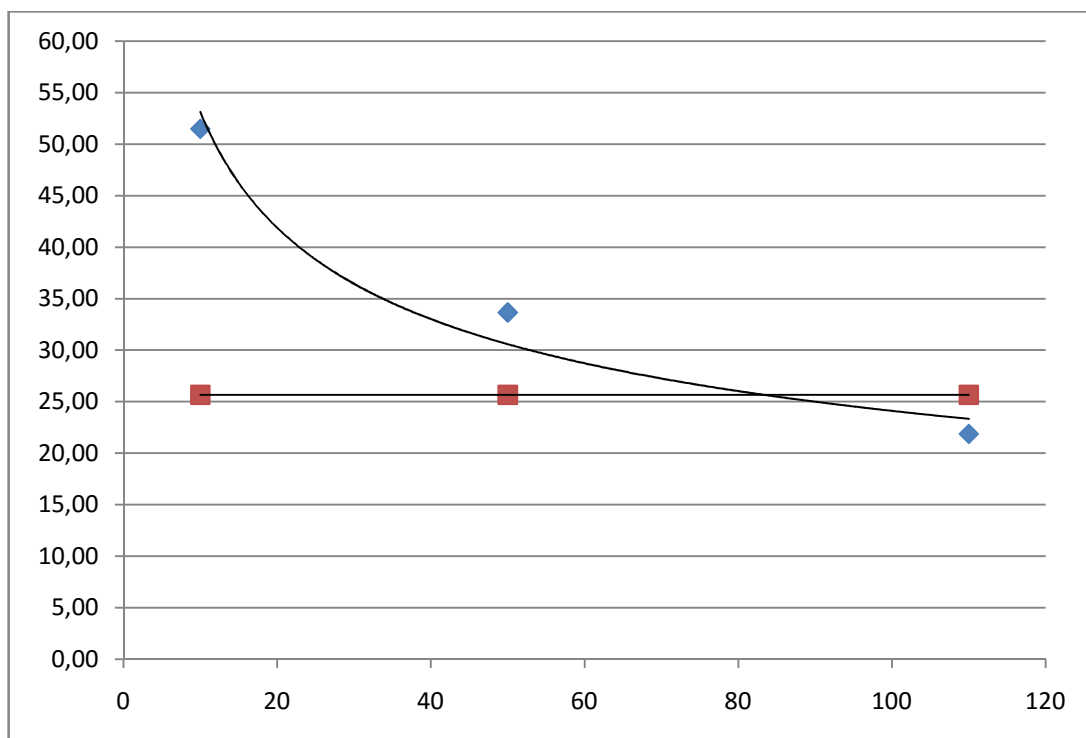
Graf 62 - Obalová křivka (modře) v porovnání s hodnotou odvozenou z výpočtu (červeně), kde na ose x je věk a na ose y je hodnota odvozená z výpočtu pro zlom

V grafu č. 62 můžeme vidět, že pro břízu hodnoty ve fázi dospělosti jsou podobné. Z toho můžeme usoudit, že zde vypočítaný vztah pro zlom platí.

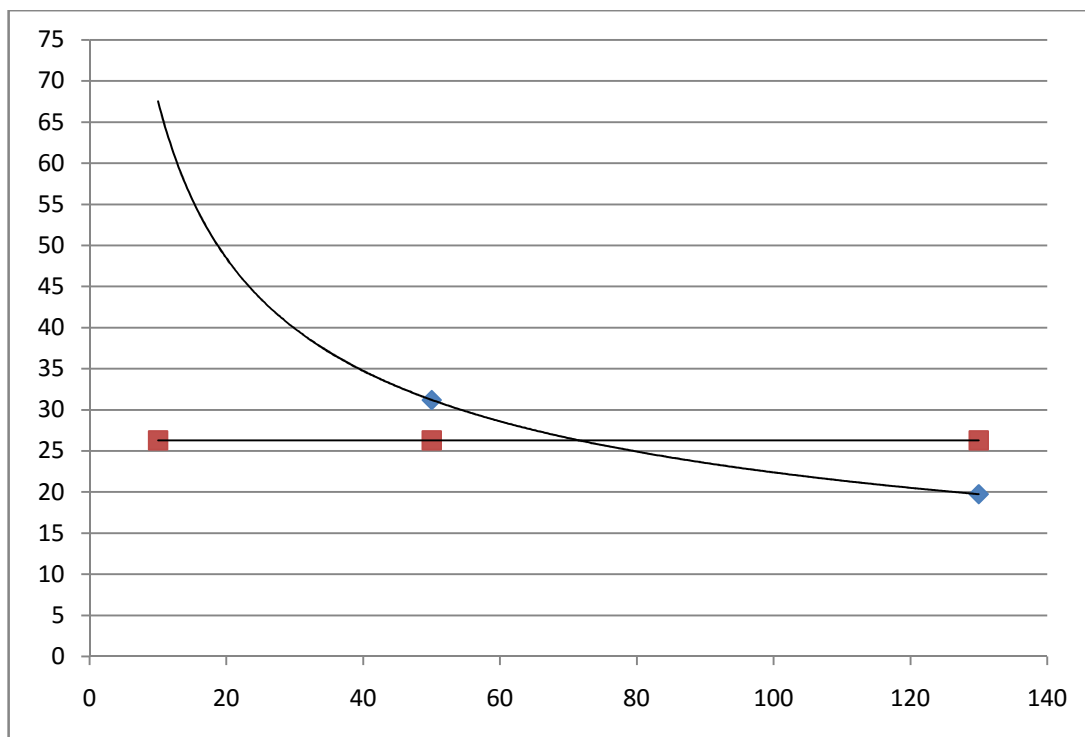


Graf 63 - Obalová křivka (modře) v porovnání s hodnotou odvozenou z výpočtu (červeně), kde na ose x je věk a na ose y je hodnota odvozená z výpočtu pro vývrat

V grafu č. 63 můžeme vidět, že pro břízu hodnoty ve fázi dospělosti jsou podobné. Z toho můžeme usoudit, že zde vypočítaný vztah pro vývrat platí.

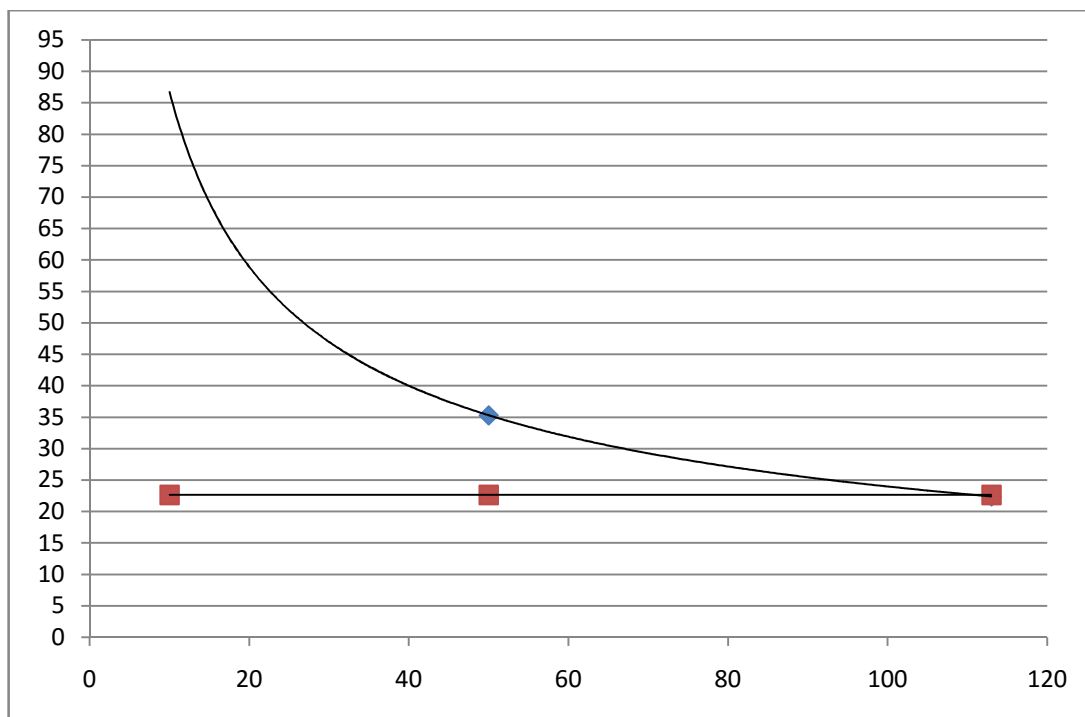


Graf 64 - Obalová křivka (modře) v porovnání s hodnotou odvozenou z výpočtu (červeně), kde na ose x je věk a na ose y je hodnota odvozená z výpočtu pro vzpěr



Graf 66 - Obalová křivka (modře) v porovnání s hodnotou odvozenou z výpočtu (červeně), kde na ose x je věk a na ose y je hodnota odvozená z výpočtu pro vývrát

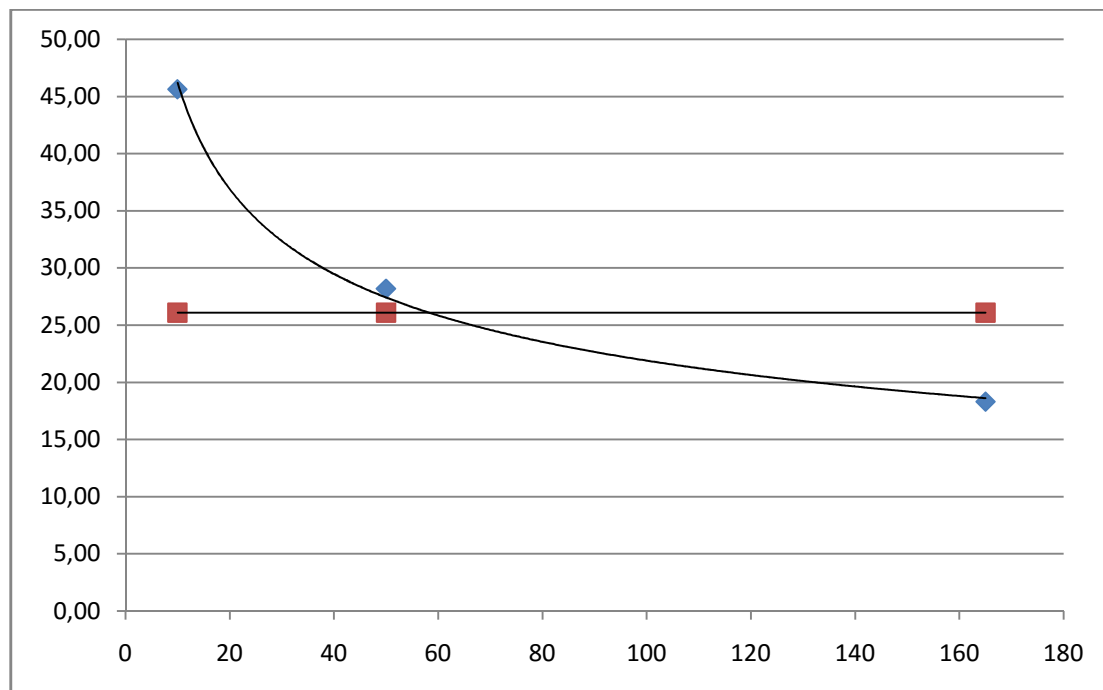
V grafu č. 66 můžeme vidět, že pro buk hodnoty ve fázi dospělosti jsou podobné. Z toho můžeme usoudit, že zde vypočítaný vztah pro vývrát platí.



Graf 67 - Obalová křivka (modře) v porovnání s hodnotou odvozenou z výpočtu (červeně), kde na ose x je věk a na ose y je hodnota odvozená z výpočtu pro vzpěr

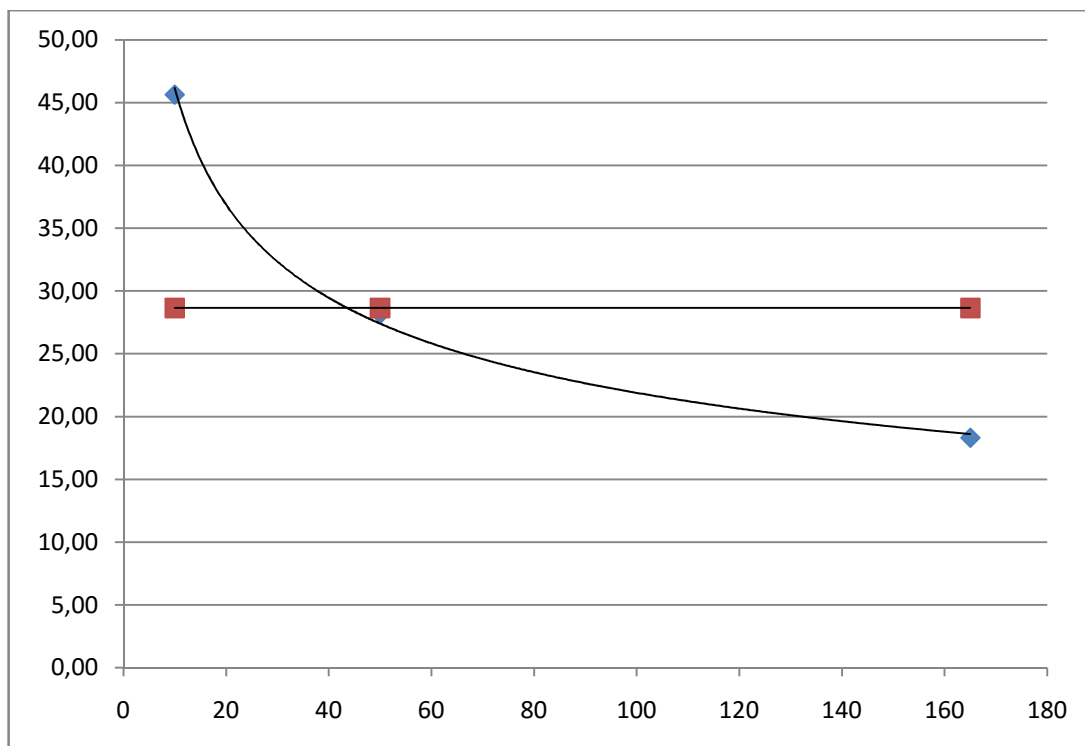
V grafu č. 67 můžeme vidět, že pro buk hodnoty ve fázi dospělosti jsou rozdílné. Z toho můžeme usoudit, že zde vypočítaný vztah pro vzpěr neplatí.

Jasan:



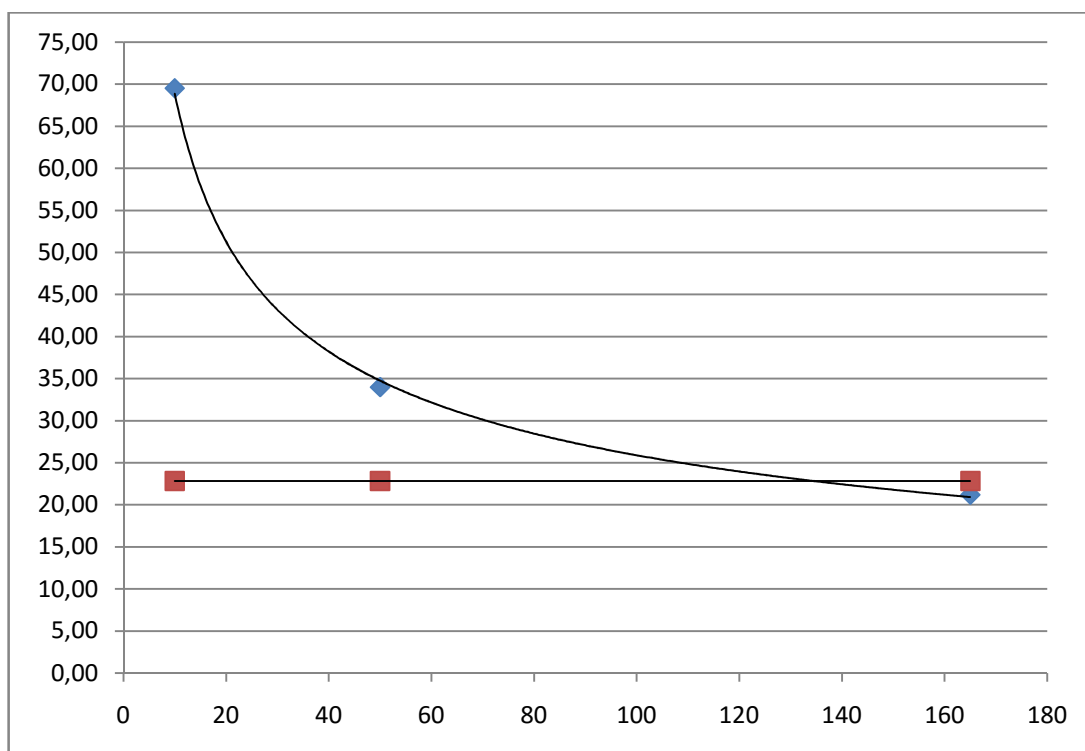
Graf 68 - Obalová křivka (modře) v porovnání s hodnotou odvozenou z výpočtu (červeně), kde na ose x je věk a na ose y je hodnota odvozená z výpočtu pro zlom

V grafu č. 68 můžeme vidět, že pro jasan hodnoty ve fázi dospělosti jsou podobné. Z toho můžeme usoudit, že zde vypočítaný vztah pro zlom platí.



Graf 69 - Obalová křivka (modře) v porovnání s hodnotou odvozenou z výpočtu (červeně), kde na ose x je věk a na ose y je hodnota odvozená z výpočtu pro vývrat

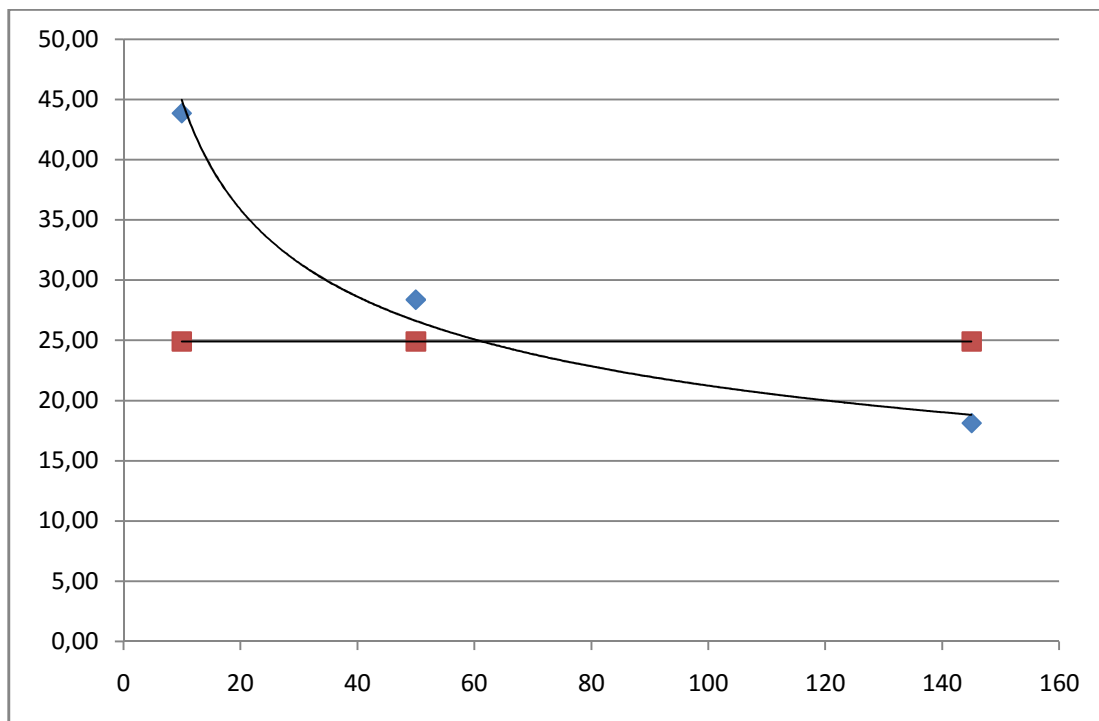
V grafu č. 69 můžeme vidět, že pro jasan hodnoty ve fázi dospělosti jsou podobné. Z toho můžeme usoudit, že zde vypočítaný vztah pro vývrat platí.



Graf 70 - Obalová křivka (modře) v porovnání s hodnotou odvozenou z výpočtu (červeně), kde na ose x je věk a na ose y je hodnota odvozená z výpočtu pro vzpěr

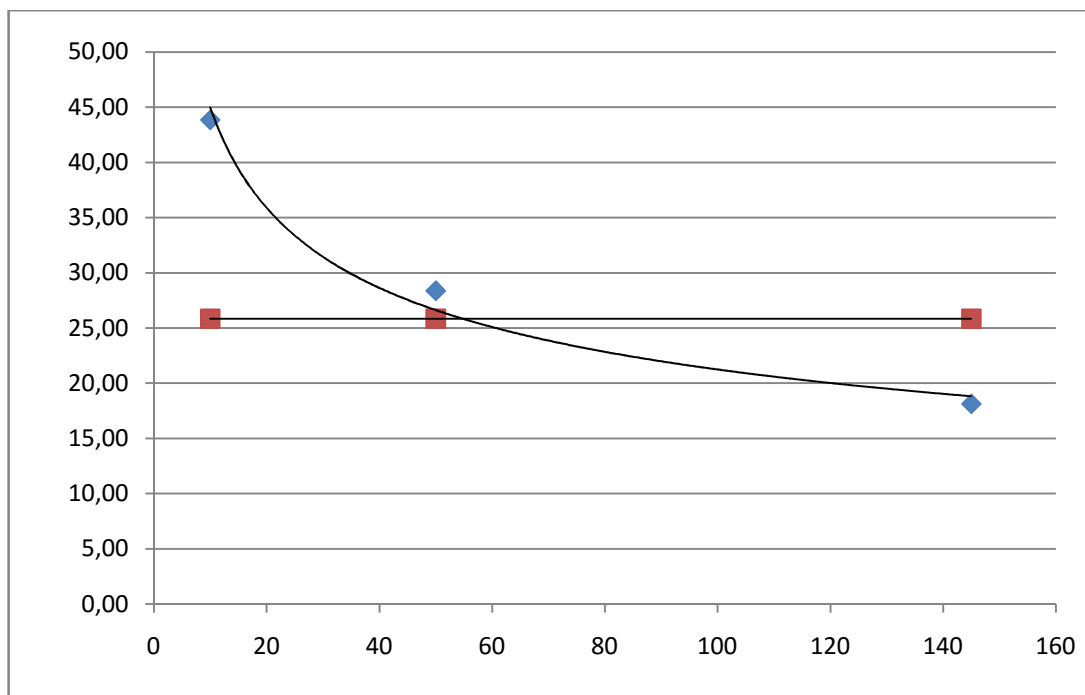
V grafu č. 70 můžeme vidět, že pro jasan hodnoty ve fázi dospělosti jsou rozdílné. Z toho můžeme usoudit, že zde vypočítaný vztah pro vzpěr neplatí.

Dub:



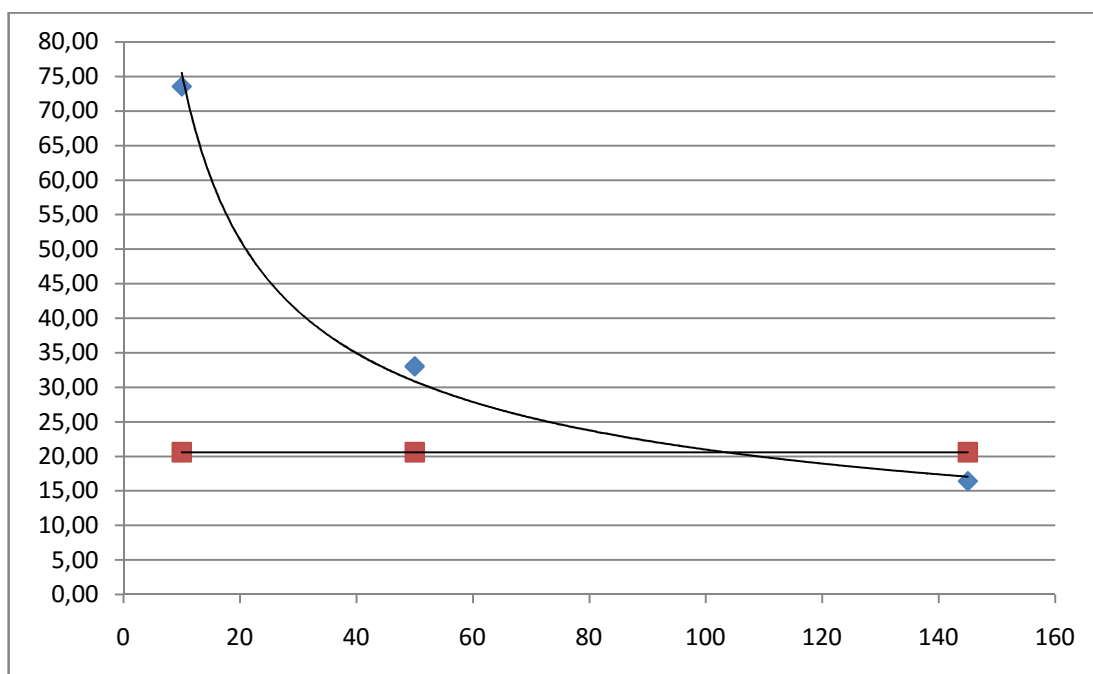
Graf 71 - Obalová křivka (modře) v porovnání s hodnotou odvozenou z výpočtu (červeně), kde na ose x je věk a na ose y je hodnota odvozená z výpočtu pro zlom

V grafu č. 71 můžeme vidět, že pro dub hodnoty ve fázi dospělosti jsou podobné. Z toho můžeme usoudit, že zde vypočítaný vztah pro zlom platí.



Graf 72 - Obalová křivka (modře) v porovnání s hodnotou odvozenou z výpočtu (červeně), kde na ose x je věk a na ose y je hodnota odvozená z výpočtu pro vývrát

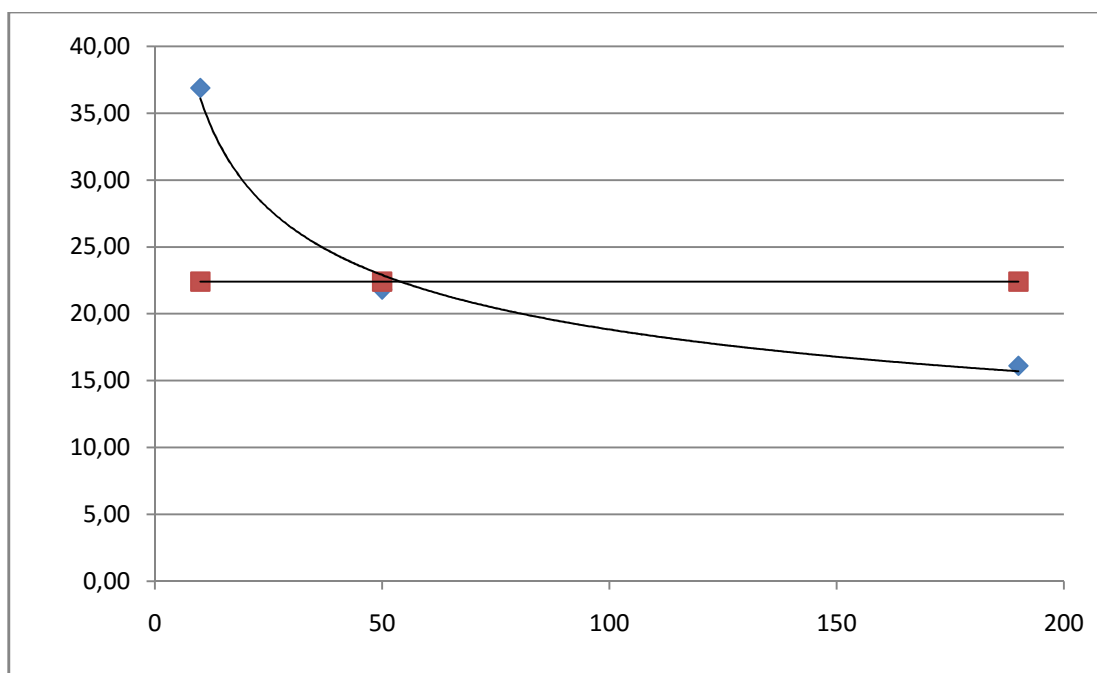
V grafu č. 72 můžeme vidět, že pro dub hodnoty ve fázi dospělosti jsou podobné. Z toho můžeme usoudit, že zde vypočítaný vztah pro vývrát platí.



Graf 73 - Obalová křivka (modře) v porovnání s hodnotou odvozenou z výpočtu (červeně), kde na ose x je věk a na ose y je hodnota odvozená z výpočtu pro vzpěr

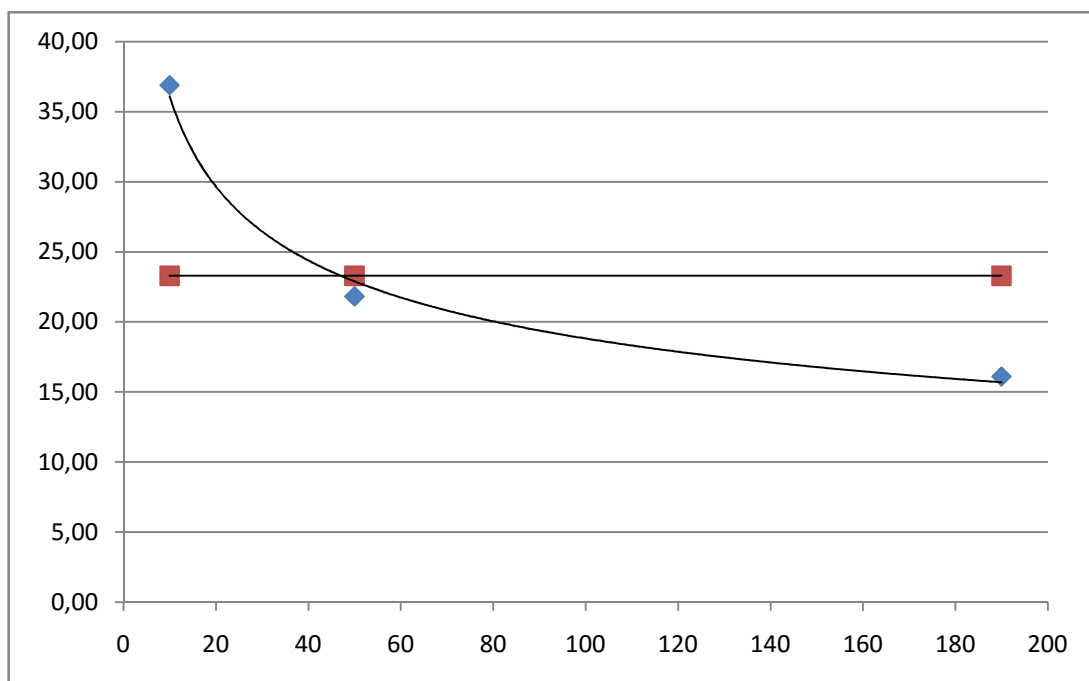
V grafu č. 73 můžeme vidět, že pro dub hodnoty ve fázi dospělosti jsou rozdílné. Z toho můžeme usoudit, že zde vypočítaný vztah pro vzpěr neplatí.

Lípa:



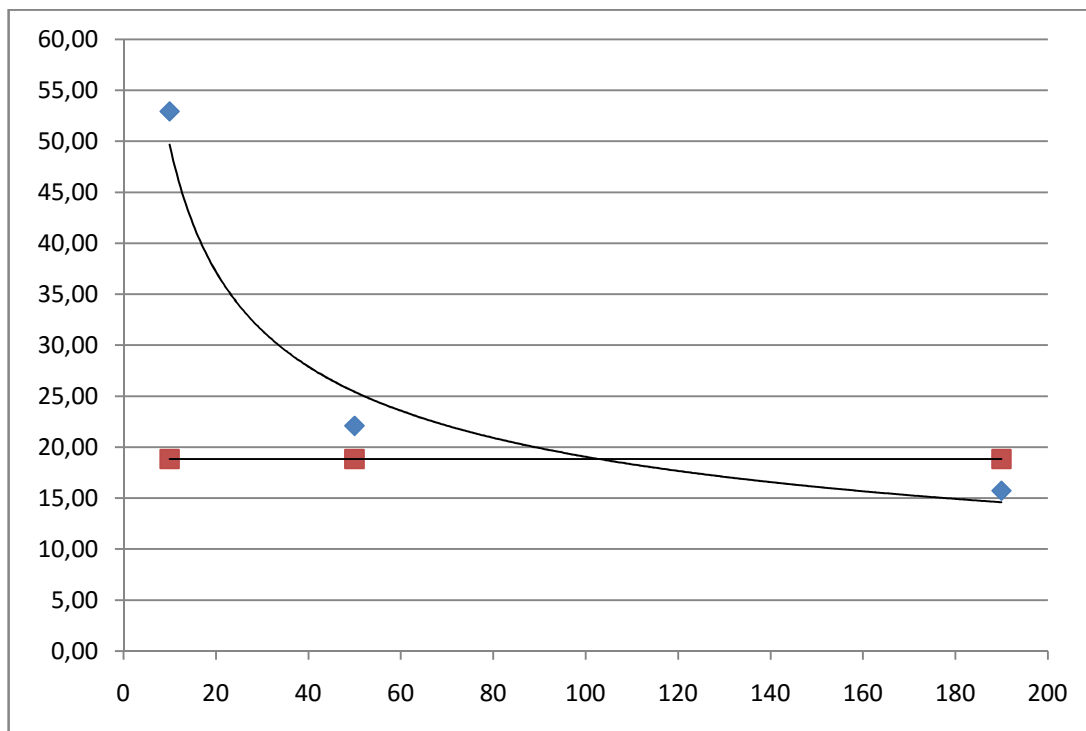
Graf 74 - Obalová křivka (modře) v porovnání s hodnotou odvozenou z výpočtu (červeně), kde na ose x je věk a na ose y je hodnota odvozená z výpočtu pro zlom

V grafu č. 74 můžeme vidět, že pro lípu hodnoty ve fázi dospělosti jsou podobné. Z toho můžeme usoudit, že zde vypočítaný vztah pro zlom platí.



Graf 75 - Obalová křivka (modře) v porovnání s hodnotou odvozenou z výpočtu (červeně), kde na ose x je věk a na ose y je hodnota odvozená z výpočtu pro vývrát

V grafu č. 75 můžeme vidět, že pro lípu hodnoty ve fázi dospělosti jsou podobné. Z toho můžeme usoudit, že zde vypočítaný vztah pro vývrat platí.

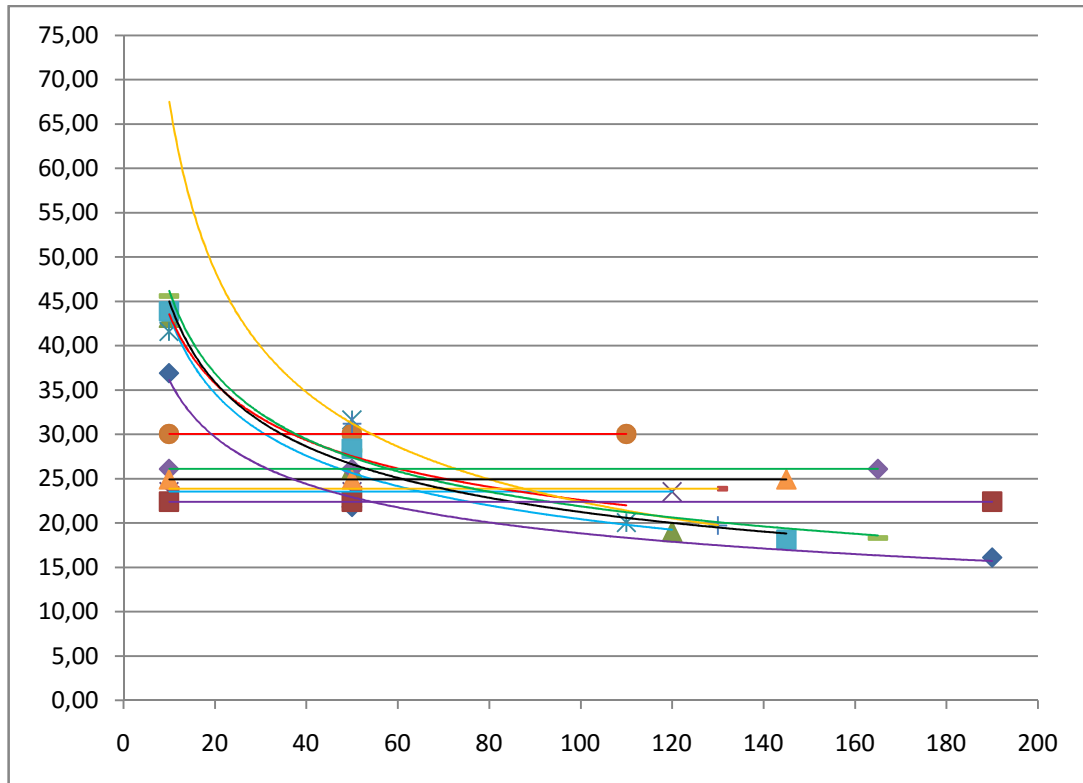


Graf 76 - Obalová křivka (modře) v porovnání s hodnotou odvozenou z výpočtu (červeně), kde na ose x je věk a na ose y je hodnota odvozená z výpočtu pro vzpěr

V grafu č. 76 můžeme vidět, že pro lípu hodnoty ve fázi dospělosti jsou podobné. Z toho můžeme usoudit, že zde vypočítaný vztah pro vzpěr platí.

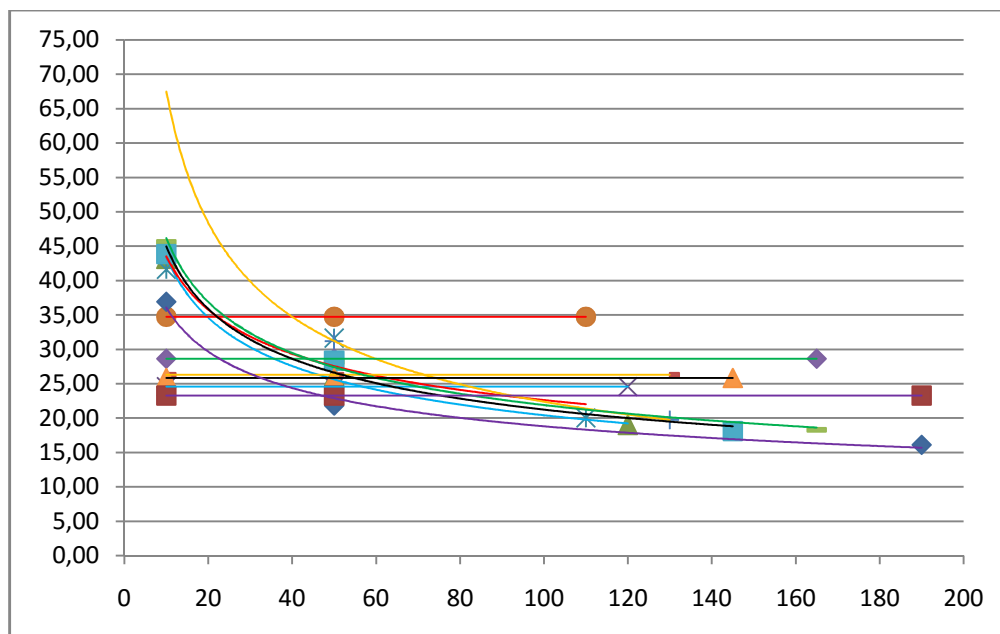
6.9. Srovnání obalových křivek

V následujících grafech můžeme vidět srovnání obalových křivek a hodnot na základě mechaniky mezi sebou.



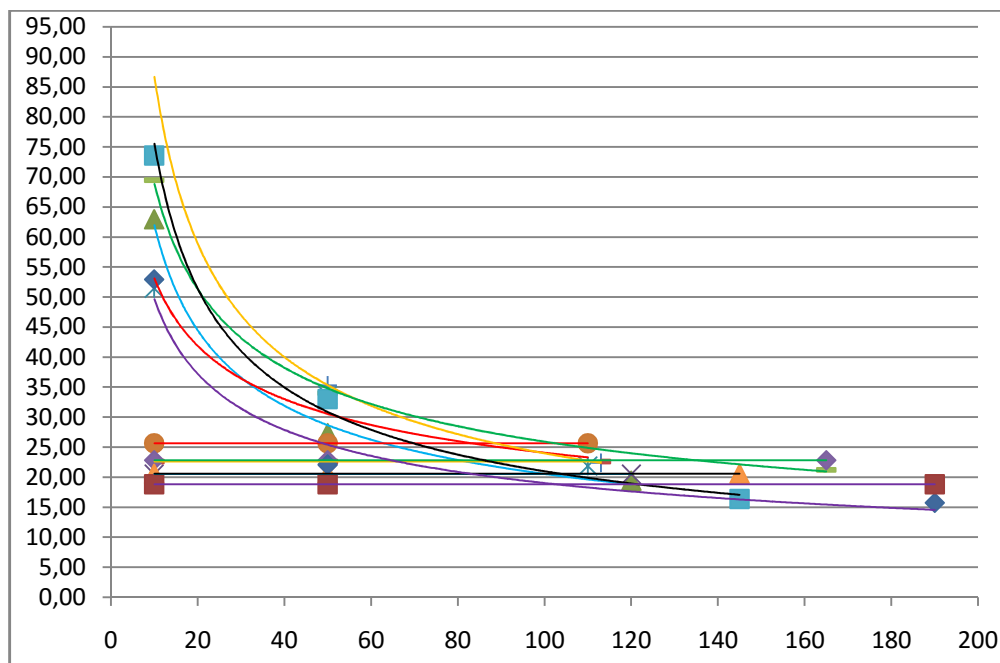
Graf 77 – Obalové křivky pro zlom na základě měření v porovnání s hodnotou výpočtu ze vzorce v závislosti na věku (osa x), Javor – modře, Bříza – červeně, Buk – oranžově, Jasan – zeleně, Dub – černě, Lípa – fialově.

V grafu č. 77 můžeme vidět, že obalová křivka pro lípu a buk se výrazně liší od ostatních rodů. A hodnoty vypočítané na základě mechaniky (tzn. z pravé strany rovnic č. 13, 21 a 27) jsou podobné u všech rodů s výjimkou břízy a všechny tyto hodnoty se pohybují v rozptylu od 22,4 do 30.



Graf 78 - Obalové křivky pro vývrát na základě měření v porovnání s hodnotou výpočtu ze vzorce v závislosti na věku (osa x), Javor – modře, Bříza – červeně, Buk – oranžově, Jasan – zeleně, Dub – černě, Lípa – fialově.

V grafu č. 78 můžeme vidět, že obalová křivka pro lípu a buk se výrazně liší od ostatních rodů. A hodnoty vypočítané na základě mechaniky (tzn. z pravé strany rovnic č. 13, 21 a 27) jsou vyšší než v grafu č. 77, ale pořád jsou si podobné u všech rodů s výjimkou břízy a všechny tyto hodnoty jsou v rozptylu od 23,3 do 34,7.



Graf 79 - Obalové křivky pro vzpěr na základě měření v porovnání s hodnotou výpočtu ze vzorce v závislosti na věku (osa x), Javor – modře, Bříza – červeně, Buk – oranžově, Jasan – zeleně, Dub – černě, Lípa – fialově.

V grafu č. 79 můžeme vidět, že obalové křivky pro jednotlivé rody nejdou sjednotit do skupin, protože se všechny liší. Hodnoty vypočítané na základě mechaniky (tzn. z pravé strany rovnic č. 13, 21 a 27) jsou naopak nižší než v grafu č. 77. Všechny tyto hodnoty se pohybují v rozptylu od 18,8 do 25,7.

Bezpečnostní faktor:

V následující tabulce je na základě výpočtů z měření dle dendrometrických veličin a výpočtů ze vzorců dle mechaniky spočítán bezpečnostní faktor pro jednotlivé fyziologické fáze.

Tabulka 20 – Bezpečnostní faktor (SF) v %

	SF (zlom)		SF (vývrat)		SF (vzpěr)	
Javor	juv	54,53	juv	57,01	juv	32,59
	dosp	90,14	dosp	94,24	dosp	75,08
	sen	123,71	sen	129,34	sen	105,68
Bříza	juv	72,24	juv	83,49	juv	49,86
	dosp	94,99	dosp	109,77	dosp	76,26
	sen	149,90	sen	173,23	sen	117,32
Buk	juv		juv		juv	
	dosp	76,53	dosp	84,28	dosp	64,13
	sen	120,99	sen	133,25	sen	101,09
Jasan	juv	57,19	juv	62,78	juv	32,85
	dosp	92,55	dosp	101,61	dosp	67,16
	sen	142,47	sen	156,41	sen	107,61
Dub	juv	56,79	juv	58,95	juv	28,01
	dosp	87,79	dosp	91,12	dosp	62,41
	sen	137,44	sen	142,66	sen	125,59
Lípa	juv	60,74	juv	63,13	juv	35,61
	dosp	102,64	dosp	106,69	dosp	85,25
	sen	139,00	sen	144,49	sen	119,62

V tabulce č. 20 můžeme vidět, že hodnoty u dospělých jedinců jsou téměř 100% a u senescentních jedinců přes 100%. Z toho vyplývá, že na základě rovnic č. 13, 21 a 27 jsme schopni relativně přesně vypočítat bezpečnostní faktor.

7. Diskuze

V kapitole č. 6.4 je graficky znázorněna závislost věku na průměru, výšce a ploše koruny. Kolařík (2010) využívá k určování věku průměr kmene, který z těchto tří parametrů je pro dřeviny v městském prostředí jednoznačně nejvyužitelnější, protože výška i plocha koruny mohou být do určité míry ovlivněny biotechnickými opatřeními. Průměr kmene u dřeviny rostoucí mimo les sice může také ovlivňovat stanoviště výskytu, ale stejně tak ovlivňuje výšku a plochu koruny. Proto považuji využití průměru k určení věku v této práci za nejvhodnější.

Plocha koruny byla v této práci považována za jednotnou v rámci tvaru. Bylo pracováno s tím, že všechny použité druhy dřevin v této práci v městském prostředí mají eliptický tvar koruny. Ten se ovšem mění nejenom s druhem dřeviny, ale i v závislosti na věku a stanovišti, kde může dřevina růst jako solitérní jedinec s dostatkem prostoru pro vývoj koruny a dosahovat typických habituálních tvarů pro daný taxon. Proto doporučuji v dalších pracích se zabývat skutečnou plochou a tvarem koruny daných jedinců. Pro inventarizaci dřevin a dendrologické průzkumy, které jsou zhotovovány jako podklady pro zhodnocení stability stromu, bych doporučil pracovat nejen s průmětem a výškou koruny, ale při zjišťování plochy koruny bych využíval i výpočtu plochy z fotografie.

Pretzsch et al. (2015) analyzovali 22 nejdůležitějších dřevin rostoucích ve městech na celém světě a na základě průměru koruny a výčetní tloušťky rozdělili použité dřeviny do čtyř skupin na základě podobnosti. Ve skupině číslo jedna uvedli buk, jilm, habr, lípu, akát a platan. Ve skupině číslo dvě uvedli smrk, jedli, jeřáb a javor. Ve skupině číslo tři uvedli borovice, modřín, břízu, jasan a olši a ve skupině číslo čtyři douglasku a dub (viz obrázek č. 5). Dle pevnosti vybraných druhů dřev v čerstvém stavu (viz tabulka č. 1) lze rozdělit dřeviny do tří skupin, kde nejmenší pevnost má lípa (24 MPa), největší dub (28 MPa) a bříza, buk, jasan a javor se nachází mezi těmito hodnoty. Z pohledu modulu pružnosti dřev lze rozdělit dřeviny do tří skupin kde lípa má nejnižší hodnotu 7200 MPa, javor 8400 MPa a bříza, buk, jasan a dub mají hodnoty nejvyšší přes 9000 MPa (viz tabulka č. 2). Na základě vypočítaných hodnot z dendrometrických veličin tj. levá strana rovnic č. 13, 21 a 27. Lze dřeviny namáhané na zlom a vývrat rozdělit do tří skupin, kde nejnižší hodnoty má lípa, nejvyšší buk a javor, bříza, jasan a dub se nacházejí uvnitř tohoto rozpětí s podobnými hodnotami (viz graf č. 77 a graf č. 78). Dřeviny namáhané na vzpěr podle grafu č. 79 roztrždit do skupin nelze. Na základě vypočítaných

hodnot z mechaniky tj. pravá strana rovnic č. 13, 21 a 27 lze dřeviny namáhané na zlom rozdělit do dvou skupin kde hodnoty pro břízu jsou výrazně vyšší než u ostatních dřevin. U břízy je to hodnota 30 a u všech ostatních se hodnoty pohybují kolem 25 (viz graf č. 77). U dřevin namáhaných na vývrat je to podobné ovšem hodnoty pro břízu jsou kolem 35 a hodnoty pro ostatní dřeviny se pohybují kolem 25 (viz graf č. 78). U dřevin namáhaných na vzpěr to jednoznačně nelze rozdělit do skupin na základě podobnosti ovšem hodnoty pro břízu jsou opět nejvyšší.

Klesající hodnoty s věkem v tabulce č. 17 souvisejí se změnou růstové strategie od R-stratéga ke K-stratégovi. R-stratég jsou dřeviny, které rostou do výšky a působícím zatížením se vyhnou ohybem, zatímco K-stratég se zpevní tím, že investuje do růstu průměru. Ze vzorce Al/d^3 můžeme odvodit, že s malou změnou průměru umocněnou na třetí, vznikne velký pokles celého čísla. Pokud strom zastaví výškový přírůst, tak s přirůstající malou tloušťkou zásadním způsobem poklesne tato hodnota. Z tohoto klesajícího trendu můžeme odvodit, že pokud dospělý jedinec zastaví výškový růst a senescentní jedinec má stále menší hodnotu znamená to, že radiální přírůst pořád trvá. Typickým R-stratégem je v našem případě bříza, u které se výrazný radiální přírůst dle grafu č. 20 zastavuje již ve věku kolem 60 let. Na rozdíl od dubu typického K-stratéga dle grafu č. 29 se výrazný radiální přírůst zastavuje až ve věku kolem 100 let.

Na základě grafů č. 53 – 58, kde se obalové křivky pro Al/d^3 a l/d téměř překrývají a na straně bezpečnosti je ta nižší (Al/d^3) můžeme konstatovat, že klasický koncept štíhlostního koeficientu (h/d) nefunguje, proto musí se zde přiřadit i náporová plocha koruny. Tyto výsledky také potvrzuje ve své práci Rust (2013) a Sumida et al. (2013).

Fournier et al., 2013 uvádí rozsáhlý přehled problematiky týkající se stanovování odolnosti stromu vůči větru. Pracují se dvěma přístupy, bezpečnost na zlom a bezpečnost na vzpěr. U bezpečnosti ve zlomu používají stejný výpočet, ve vzpěru trochu jiný. Zatím mi nejsou známe práce, které by se zaměřovaly na vývrat.

8. Závěr

- Z databáze již naměřených dendrometrických údajů z inventarizace dřevin ve městech, byly zvoleny rody javor, bříza, buk, jasan, dub a lípa, u kterých byl zjišťován věk, plocha koruny a výška těžiště.
- Na základě teorie mechanického chování stromů byly navrženy analytické vztahy popisující stabilitu stromů v závislosti na jejich dendometrii a jejich podoba je:
 - a) Pro zlom:

$$\frac{\sqrt[3]{A \cdot l}}{d} = \sqrt[3]{\frac{\pi \cdot \sigma}{16 \cdot \rho \cdot c \cdot v^2}}$$

kde A je plocha koruny, l je výška těžiště, d je průměr kmene, σ je pevnost dřeva, ρ je hustota vzduchu, c je aerodynamický koeficient a v je maximální rychlost větru.

- b) Pro vzpěr:

$$c) \frac{l}{d} = \sqrt{\frac{E \cdot \pi^2}{16 \cdot \sigma_{krit}}}$$

kde l je výška těžiště, d je průměr kmene, E je modul pružnosti dřeva a σ_{krit} je pevnost dřeva.

- d) Pro vývrat:

$$\frac{\sqrt[3]{A \cdot l}}{d} = \sqrt[3]{\frac{\phi \cdot E_{KB}}{10 \cdot c \cdot \rho \cdot v^2}}$$

kde A je plocha koruny, l je výška těžiště, d je průměr kmene, ϕ je náklon, E_{KB} je modul pružnosti kořenového balu, ρ je hustota vzduchu, c je aerodynamický koeficient a v je maximální rychlost větru.

- Z analytických vztahů byly vypočítány alometrické koeficienty odolnosti dřevin proti jejich porušení zlomem, vzpěrem a vývratem. Výpočet byl proveden pro jednotlivé dřeviny vybraných rodů (a) z dendrometrických veličin:

Javor			
	Zlom	Vzpěr	Vývrat
Juvenilní 0-20	43,1	63,0	43,1
Dospělý 20-80	26,1	27,3	26,1
Senescentní 80+	19,0	19,4	19,0
Bříza			
	Zlom	Vzpěr	Vývrat
Juvenilní 0-20	41,6	51,5	41,6
Dospělý 20-80	31,6	33,6	31,6
Senescentní 80+	20,0	21,9	20,0
Buk			
	Zlom	Vzpěr	Vývrat
Juvenilní 0-20			
Dospělý 20-80	31,2	35,3	31,2
Senescentní 80+	19,7	22,4	19,7
Jasan			
	Zlom	Vzpěr	Vývrat
Juvenilní 0-20	45,6	69,5	45,6
Dospělý 20-80	28,2	34,0	28,2
Senescentní 80+	18,3	21,2	18,3
Dub			
	Zlom	Vzpěr	Vývrat
Juvenilní 0-20	43,9	73,6	43,9
Dospělý 20-80	28,4	33,0	28,4
Senescentní 80+	18,1	16,4	18,1
Lípa			
	Zlom	Vzpěr	Vývrat
Juvenilní 0-20	36,9	52,9	36,9
Dospělý 20-80	21,8	22,1	21,8
Senescentní 80+	16,1	15,8	16,1

a (b) z teorie mechaniky:

	Zlom	Vývrat	Vzpěr
Javor	23,5	24,6	20,5
Bříza	30,0	34,7	25,7
Buk	23,9	26,3	22,6
Jasan	26,1	28,6	22,8
Dub	24,9	25,9	20,6
Lípa	22,4	23,3	18,8

- Oba přístupy byly porovnány a hodnoty alometrických koeficientů včetně závislostí zejména na rodu dřevin a fyziologické fázi zobecněny tak, že se tyto koeficienty hodí pro hodnocení stability stromů v senescentní fázi, ve fázi dospělosti jsou druhově podmíněné a pro stromy v juvenilní fázi se nehodí. Tyto koeficienty lze využít pro stanovení hodnoty bezpečnostního faktoru. Můžeme tvrdit, že nemůžeme stabilitu posuzovat jen na základě výšky těžiště a průměru, ale musíme mezi tyto hodnoty zahrnout i náporovou plochu koruny. Nelze hodnotit jen podle tvaru nebo podle materiálových vlastností. Vždy se musí hodnotit podle tvaru i materiálových vlastností.

9. Summary

From the database of urban trees inventory were chosen individuals from genera maple, birch, beech, ash, oak and linden. Inventory contains previously measured dendrometric data. Tree age, crown area and center of gravity height were determined from these data.

Analytical relationships describing the stability of trees according to their dendrometry were designed based on the theory of the mechanical behavior of trees.

Their form is:

a) Breakage

$$\frac{\sqrt[3]{A \cdot l}}{d} = \sqrt[3]{\frac{\pi \cdot \sigma}{16 \cdot \rho \cdot c \cdot v^2}}$$

where **A** is the crown area, **l** is the center of gravity height, **d** is diameter, **σ** is wood strength, **ρ** is air density, **c** is the aerodynamic coefficient and **v** is maximum wind speed.

b) Buckling

$$\frac{l}{d} = \sqrt{\frac{E \cdot \pi^2}{16 \cdot \sigma_{krit}}}$$

where **l** is the center of gravity height, **d** is diameter, **E** is modulus of wood elasticity and σ_{krit} is wood strength.

c) Windthrow

$$\frac{\sqrt[3]{A \cdot l}}{d} = \sqrt[3]{\frac{\emptyset \cdot E_{KB}}{10 \cdot c \cdot \rho \cdot v^2}}$$

where **A** is the crown area, **l** is the center of gravity height, **d** is diameter, \emptyset is inclination, **E_{KB}** is modulus of root ball elasticity, **ρ** air density, **c** is the aerodynamic coefficient and **v** is maximum wind speed.

The allometric coefficients of breakage, buckling and windthrow failure were calculated from analytic relationships. Calculation was carried out for individuals of selected species from dendrometric parameters:

Maple			
	Breakage	Buckling	Windthrow
Juvenile 0-20	43,1	63,0	43,1
Mature 20-80	26,1	27,3	26,1
Senescence 80+	19,0	19,4	19,0
Birch			
	Breakage	Buckling	Windthrow
Juvenile 0-20	41,6	51,5	41,6
Mature 20-80	31,6	33,6	31,6
Senescence 80+	20,0	21,9	20,0
Beech			
	Breakage	Buckling	Windthrow
Juvenile 0-20			
Mature 20-80	31,2	35,3	31,2
Senescence 80+	19,7	22,4	19,7
Ash			
	Breakage	Buckling	Windthrow
Juvenile 0-20	45,6	69,5	45,6
Mature 20-80	28,2	34,0	28,2
Senescence 80+	18,3	21,2	18,3
Oak			
	Breakage	Buckling	Windthrow
Juvenile 0-20	43,9	73,6	43,9
Mature 20-80	28,4	33,0	28,4
Senescence 80+	18,1	16,4	18,1
Linden			
	Breakage	Buckling	Windthrow
Juvenile 0-20	36,9	52,9	36,9
Mature 20-80	21,8	22,1	21,8
Senescence 80+	16,1	15,8	16,1

From theory of mechanics:

	Breakage	Buckling	Windthrow
Maple	23,5	20,5	24,6
Birch	30,0	25,7	34,7
Beech	23,9	22,6	26,3
Ash	26,1	22,8	28,6
Oak	24,9	20,6	25,9
Linden	22,4	18,8	23,3

Both approaches were compared and the allometric coefficient values including the dependence of particular genus of trees and physiological stage were generalized. Thus, generalized coefficients are useful for evaluating the stability of trees in senescent stage. At the mature stage are coefficients depending on the tree species and for trees in the juvenile stage are not suitable. These coefficients can be used for determining the value of the safety factor. We can say that the stability should be assessed not only by the center of gravity height and diameter, but also the sail area of crown should be included. Trees can not be evaluated only according to the shape or by material properties. Both, must be taken into account.

10. Použitá literatura

ALLEN, M. T., et al., 2005. Using L-systems for modeling source-sink interactions, architecture and physiology of growing trees: The L-PEACH Model. *New Phytologist* 166:869–880.

BELL, H. J., DAWSON, A. R., BAKER, C. J., WRIGHT, C. J., 1990. Tree stability (paper 13), s. 94– 101. In *Bulletin 97*, Forestry Commission, Edinburgh, Scotland.

BRÜCHERT, F., BECKER, F. and SPECK, T., 2000. The mechanics of Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst]: mechanical properties of standing trees from different thinning regimes. *Forest Ecology and Management* 135:45–62.

ČERNÝ, J., 2016. [online] citováno 15. dubna 2016. Dostupné na World Wide Web: <http://www.biolib.cz/cz/glossaryterm/dir0/id3805/>

DAHLE, G. A., GRABOSKY, J. C., 2009. The Function and Allometric Relationships of Tree Stems and Branches

DAHLE, G. A., GRABOSKY J. C., 2009. Allometric patterns in *Acer platanoides* (Aceraceae) branches. *Trees*. ISSN 0931-1890.

DAHLE, G. A., 2009. How the hydraulic and mechanical properties of wood influence branch form in Norway maple (*Acer platanoides* L.). Ph.D. Dissertation. Rutgers University, New Brunswick NJ.

Da SILVA, D., et al., 2011. Linking water stress effects on carbon partitioning by introducing a xylem circuit into L-PEACH. *Annals of Botany* 108(6):1135–1145.

FREEMAN, G. E., RAHMEYER, W. J., COPELAND, R. R. 2000. Determination of resistance due to shrubs and woody vegetation. Technical report, US Army Corps of Engineers.

FOURNIER. M., et al., 2013. Integrative biomechanics for tree ecology: beyond wood density and strenght. *Journal of Expeimental Botany*.

GRACE, J., 1978. The turbulent boundary layer over a flapping *Populus* leaf. *Plant, Cell, and Environment* 1: 35-8.

GRANT, P. F., NICKLING, W.G., 1998. Direct field measurement of wind drag on-vegetation for application to windbreak design and modelling. *Land Degradation and Development* 9: 57-66

- GREEN, D.W., WINANDY, J. E., and KRETSCHMANN, D. E., 1999. Mechanical properties of wood. In: Wood Handbook: Wood as an Engineering Material. General Technical Report FPL-GTR-113. USDA, Forest Products Laboratory, Madison, WI.
- GROOM, L., L. MOTT, and S. SHALER, 2002. Mechanical properties of individual southern pine fibers. Part I. Determination and variability of stress–strain curves with respect to tree height and juvenility. *Wood and Fiber Science* 34:14–27.
- HORÁČEK, P., 2012. Systémový přístup v pohledu na stromy aneb vizuální hodnocení stromů stejně a přesto jinak. *Konference Strom pro život – život pro strom*.
- KANE, B., SMILEY, T., 2006. Drag coefficients and crown area estimation of red maple, *Canadian Journal of Forest Research* 38(6): 1275-1289.
- KERZENMACHER, T., GARDINER, B., 1998. A mathematical model to describe the dynamic response of a spruce tree to wind. *Trees* 12: 385-394.
- KOEHLER, L., F.W. TELEWSKI. 2006. Biomechanics and transgenic wood. *American Journal of Botany* 93:1433–1438.
- KOIZUMI, A., ARAKI, H., HORI, H., INAGAWA, Y., 2008. Windthrow resistance of apple trees grafted in an orchard. *Journal of Wood Science* 54: 10-15.
- KOLAŘÍK, J. et al., 2010. Péče o dřeviny rostoucí mimo les – II. díl, Vlašim, ČSOP, s. 696, ISBN 978-80-86327-85-3.
- LAI, W. 1955. Aerodynamic crown drag of several broadleaf species. Interim Technical Report AFSWP-863. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Division of Forest Fire Research, September, Washington, DC.
- LAVERS, G.M., 1983. The strength properties of timber. Garston, Watford, Dept. Of the Environment, Building Research
- MATTHECK, C., BRELOER, H. 1995. *The Body Language of Trees: A handbook for failure analysis*, (Research for Amenity Trees 4), HMSO, London, 240 s.
- MATTHECK, C., 1991. *Trees – the mechanical design*, Spring - verlag, New York. 121 s.
- MATTHECK, C., 2002. A new silure criterion for non decayed trees, *Arboriculture Journal* 26, 43-54.
- MAYHEAD, G. J., 1973. Some drag coefficients for British forest trees derived from wind tunnel studies. *Agricultural Meteorology* 12: 123-30.
- McPHERSON, E. G., PEPPER, P. J., 2012. Urban Tree Growth Modeling. *Arboriculture and Urban Forestry*, 38(5): 172-180

MOSBRUGGER, V., 1990. The Tree Habit in Land Plants, Springer - Verlag, Berlin, ISBN: 3-540-52374-1.

NIKLAS, K. J. 1992. Plant Biomechanics – An Engineering Approach to Plant Form and Function. The University of Chicago Press, Chicago. 607 s.

NIKLAS, K.J., 1997. Mechanical properties of black locust (*Robinia pseudoacacia*L.) wood. Size and age dependent variation in sapandheartwood. Annals of Botany 79:265–272.

NOWAK, D. J., et al., 2008. A ground-based method of assessing urban forest structure and ecosystem services. Arboriculture & Urban Forestry, 34:347–358.

PANSHIN, A. J., and C. de ZEEUW, 1980. Textbook of wood technology. McGraw-Hill, New York, New York.

PELTOLA, H., KELLOMÄKI, S., HASSINEN, A., GRANANDER, M., 2000. Mechanical stability of Scot pine, Norwax spruce and birch: an analysis of tree-pulling experiments in island. Forest Ecology and Management 135: 143-153.

PEPER, P. J., 2014. Allometric equations for urban ash trees (*Faxinus* sp.) in Oakville, Southern Ontario, Canada. Urban Forestry and Urban Greening.

POŽGAJ, A., et al., 1997. Štruktúra a vlastnosti dreva. II. Vydanie, Príroda, Bratislava.

PRAUS, L. 2006. Mechanická stabilita stromů a metody jejího zjišťování [online] citováno 10. května 2013. Dostupné na World Wide Web: <<http://wood.mendelu.cz>>

PRETZSCH, H., et al., 2015. Crown size and growing space requirement of common tree species in urban centres, parks, and forests. Urban Forestry and Urban Greening.

PROSTĚJOV. [online] citováno 11. března 2013. Dostupné na World Wide Web: <http://www.prostejov.eu/cs/volny-cas/o-meste/>

PRUSINKIEWICZ, P., LINDENMAYER, A., 1990. The Algorithmic Beauty of Plants. Springer-Verlag, New York. 228 pp.

REITERER, A., LICHTENEGGER, H., TSCHEGG, S. and FRATZL, P., 1999. Experimental evidence for a mechanical function of the cellulose microfibril angle in wood cell walls. Philosophical Magazine A 79:2173–2184.

RUDNICKI, M., MITCHELL, S. J., NOVAK, M. D., 2004. Wind tunnel measurements of crown streamlining and drag relationships for free conifer species. Canadian Journal of Forest Research 34: 666–676.

RUST, S., 2013. What do we really know about tree slenderness as an indicator for risk assessment. 89th Annual Conference of the International Society of Arboriculture

- SINN, G., WESSOLLY, L., 1989. A Contribution to the Proper Assessment of the Strength and Stability of Trees. *Arboricultural Journal*. 13: 45-65.
- SIMON, J., VACEK, S., 2008. *Výkladový slovník hospodářské úpravy lesů*. Brno, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 126 s., ISBN 978-80-7375-131-9.
- SUMIDA, A., et al., 2013. Relationship of tree height and diameter at breast height revisited: analyses of stem growth using 20-year data of an even aged *Chamaecyparis obtusa* stand
- SZÓRÁDOVÁ, A., 2006. Hodnocení odolnosti proti zlomu kmene na základě vizuálního hodnocení stromů a metodiky SIA. Diplomová práce. Brno, Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta. 65 s.
- SZÓRÁDOVÁ, A., 2014. Analýza mechanické funkce kořenového systému. Disertační práce. Brno, Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta. 107 s.
- ÚRADNÍČEK, L., MADĚRA, P., TICHÁ, S., KOBLÍŽEK, J., 2009. *Dřeviny České republiky*. 2. vyd. Kostelec nad Černými Lesy: Lesnická práce, s.r.o., 367 s. ISBN 978-80-87154-62-5.
- VOGEL, S. 1994. *Life in moving fluids: the physical biology of flow* (2.vyd.). Princeton University Press. Princeton. 352 s.
- VOLLSINGER, S., MITCHELL, S. J., BYRNE, K. J., NOVAK, M. D., RUDNICKI, M., 2005. Wind tunnel measurements of crown streamlining and drag relationships for several hardwood species. *Canadian Journal of Forest Research* 35: 1238–1249.
- WAGNER, K. R., EWERS, F. W. and DAVIS, S. D., 1998. Tradeoffs between hydraulic efficiency and mechanical strength in the stems of four cooccurring species of chaparral shrubs. *Oecologia* 117:53–62.
- WESSOLLY L., 1992. Material and structure properties of trees. Continuation of the Stuttgart Strength Catalogue. Conference volume, 15th Bad Godesberg Tree Seminar
- WESSOLLY, L., 1998. *Handbook Tree-Statics and Tree - Controlling*, Berlin
- WESSOLLY, L., ERB, M., 1998. *Handbuch der Baumstatik und Baumdiagnose*. Patzer Verlag Berlin. Germany.
- WOOD, C. J., 1995. Understanding wind forces on trees. In *Wind and Trees*. Eds. M. P. Coutts and J. Grace. Cambridge University Press. Cambridge. s. 133-164.

11. Seznam příloh na CD

- Výpočet věku, výšky těžiště, plochy koruny
- Obaloové křivky, bezpečnostní faktor
- Testy