

**Mendelova univerzita v Brně**  
**Lesnická a dřevařská fakulta**  
**Ústav nauky o dřevě**

**Numerická analýza vlivu variability toku vody na teplotní  
pole během ohřevu bělové části dřeva stromu**

Bakalářská práce

*Prohlašuji, že jsem práci: **Numerická analýza vlivu variability toku vody na teplotní pole během ohřevu bělové části dřeva stromu** 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 předmětná 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: 30.4.2015*

*podpis studenta*

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu Mgr. Ing. Miroslavu Trcalovi, Ph.D, za jeho mnohé neocenitelné podnětné rady, odborné připomínky, trpělivost i vědecký zápal. Dále bych také chtěl poděkovat své rodině za velkou podporu a to nejen ve studiu. Jmenovitě pak svému bratru Adamovi, za podporu i mnohé dlouhé disputace.

## **Numerická analýza vlivu variability toku vody na teplotní pole během ohřevu bělové části dřeva stromu**

Jméno: Libor Opletal

Vedoucí práce: Mgr. Ing. Miroslav Trcala, Ph.D.

### **Abstrakt:**

Bakalářská práce se zabývá teoretickou analýzou srovnání dvou vybraných metod na výpočet intenzity transpiračního proudu. Tyto metody (HFD a LHB) jsou založeny na lineárním ohřevu a měření vzniklého teplotního pole v bělové části stromu.

K této analýze byly použity radiální profily tří dřevin – *Cupressus arizonica*, *Olea europaea* a *Populus interamericana* – o poloměru kmene 0,14 m, z toho bělová část 0,08 m. Pro výpočet byla zvolena rychlost proudu  $Q_w$  0,008 kg.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup> až 0,08 kg.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup> a koeficienty tepelné vodivosti  $\lambda$  0,3 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> a 0,4 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>.

Výstupem práce je srovnání výsledků daných metod a zejména vlivu nehomogenity radiálního profilu toku vody.

**Klíčové slova:** radiální profil, transpirační proud, bělová část stromu, HFD, LHB

## **Numerical analysis of influence variability sap flow in heat field during heating sapwood.**

### **Abstract:**

This thesis compares two methods for sap flow calculation during continuous linear heating in tree sapwood. LHB method has substantially better results.

For this analysis, we used three trees with different radial pattern – *Cupressus arizonica*, *Olea europaea* and *Populus interamericana* – with radius 0,14 m, sapwood 0,08 m. We solved the equations with  $Q_w$  from 0,008 kg.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup> to 0,08 kg.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup> and thermal conductivity  $\lambda$  0,3 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> and 0,4 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>.

The output of this thesis is the comparison of results between methods HFD and LHB, especially influence of inhomogeneous radial pattern.

**Key words:** Radial pattern, sap flow, sapwood, HFD, LHB



## Obsah

1	Úvod .....	8
2	Cíl práce .....	9
3	Literární přehled .....	10
3.1	Transpirační proud.....	10
3.2	Propustnost dřeva pro tekutiny .....	11
3.3	Přenos tepla ve dřevě.....	14
3.4	Přehled metod měření proudění mízy.....	18
	Metody pro měření toku mízy.....	18
3.5	Metoda HFD – Heat FieldDeformation - deformace teplotního pole .....	19
4	teoretická analýza.....	22
4.1	Vedení tepla - Fourierův zákon .....	22
4.2	Metoda LHB – Linear Heat Balance .....	24
4.3	Geometrie čidel.....	26
4.4	Metoda HFD – Heat FieldDeformation - deformace teplotního pole .....	26
4.5	Základní rozdíl mezi HFD a LHB .....	28
5	Numerický model.....	29
6	Výsledky a diskuze.....	32
6.1	Cypřiš arizonský – <i>Cupressus arizonica</i> $\lambda=0,3 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .....	32
6.2	Cypřiš arizonský – <i>Cupressus arizonica</i> $\lambda=0,4 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .....	36
6.3	Olivovník evropský - <i>Olea europaea</i> ; $\lambda=0,3 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .....	39
6.4	Olivovník evropský – <i>Olea europaea</i> ; $\lambda=0,4 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .....	43
6.5	Topol středoamerický - <i>Populus interamericana</i> ; $\lambda=0,3 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .....	47
6.6	Topol středoamerický - <i>Populus interamericana</i> ; $\lambda=0,4 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .....	51
7	Závěr.....	55
8	Summary .....	56
9	Seznam použité literatury .....	57

10	Přílohy .....	60
10.1	Grafické.....	60
10.2	Tabulkové přílohy .....	70

# 1 Úvod

Proudění vody v živých rostlinách představuje největší energetický tok, ve kterém navíc není zapotřebí žádnou energii dodávat. Současně je voda často tím nejběžnějším limitujícím prvkem pro růst rostliny vůbec. Voda je také přímo ovlivňuje růst rostliny a je nezbytným aspektem i pro další fyziologické děje. Její evaporace z povrchu listů nadále souvisí s mnoha navazujícími klimatickými jevy. Velká část vody je spotřebovávána na ochlazení exponovaných částí rostliny (spojené s výparným teplem) a pouze menší množství je spotřebováno na všechny další procesy – např. fotosyntézu, přepravu asimilátů, růst atd.

Metody měřící proudění vody v rostlinách mají mnoho využití ať už v lesnictví, zahradnictví, zemědělství nebo ekologii vůbec. Jsou také čím dál více rozšířené a i širě používané při řešení hydrologických problémů, se kterými se potýkají jak už lesníci, zemědělci nebo ekologové. Otázky týkající se vody nás budou v budoucnu zajímat, čím více nás budou trápit ekologické otázky ohledně zdrojů pitné vody a vody vůbec.

Pro měření transpiračního proudění není za potřebí žádných staveb nebo skleníků, není zapotřebí ani žádných jiných rozměrných zařízení. Měření probíhá jednoduše, přesto je jeho průběh velmi sofistikovaný a společně s letitým vývojem různých typů měření či zpracování dat je k němu zapotřebí náležitého důkladného vzdělání. Měřící zařízení je poměrně malé a tak jej lze běžně využívat prakticky kdekoliv, přemísťovat z místa na místo, jeho použití navíc strom nijak zásadně nepoškodí.

Měření transpiračního proudění ve stromech je výhodné zvláště, kvůli možnosti dlouhodobého automatického snímání. Když je voda kořeny absorbována, je následně transportována až k listům a díky měření tak získáváme data pro analýzu celého stromu.

## 2 Cíl práce

Cílem této práce je analyzovat simulované teplotní pole v okolí vyhřívané bělové části stromu, používané za účelem měření toku vody uvnitř kmene živého stromu. Tato simulace proběhla ve výpočetním programu založeném na metodě konečných prvků (Final Element Method – FEM). Nasimulovaný model popisuje jak kondukcii, tak konvekci a řeší tři různé radiální profily vždy ve dvou variantách tepelné vodivosti  $\lambda = 0,3$  a  $0,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Dalším cílem této práce je seznámení se s metodami řešícími výpočet transpiračního proudění, konkrétně s metodami HFD – Heat FieldDeformation a LHB – Linear Heat Balance a jejich verifikace a porovnání navzájem. Zjistit jestli a jakou roli hraje vliv nehomogenity radiálního profilu toku vody, protože stávající metody s touto nehomogenitou nepočítají.

## 3 Literární přehled

### 3.1 Transpirační proud

Xylémovými transportními drahami (tracheidy, tracheje) proudí voda a rozpuštěné anorganické látky (zvláště na jaře) z kořene vzhůru k listům a reprodukčním orgánům (vzestupný transpirační proud). U dřevin je transpirační proud veden především vodivými elementy nejmladších letokruhů tvořící tzv. hydroaktivní profil.

Rychlost transpiračního proudu výrazně ovlivňuje aktuální stav počasí, při zatažené obloze se jeho pohyb může téměř zastavit. Za optimálních podmínek (při maximální intenzitě transpirace) může být rychlost transpiračního proudu řádově až desítky m/hod.

Hlavní hybnou (tažnou) silou xylémového transportu je záporný hydrostatický tlak v listech vyvolaný stomatární transpirací (difuze vodní páry stomaty). Z energetického hlediska nespotebovává rostlina k transpiračnímu pohonu vlastní energii – k pohybu roztoků xylém využívá sluneční záření, díky kterému dochází k odpařování vody z intercelulár listového mezofylu.

Ztráta vody v mezofylu listů vyvolává podtlak v mikrokapilárách buněčných stěn listových buněk, který způsobuje nasávání tenkých vodních sloupců kapilárami xylémových vodivých drah. Atmosférický tlak [MPa] může však vytlačit sloupec vody ve vakuu jen do výše 10,3 m. Do větších výšek vystupuje vodní sloupec díky extrémním kapilárním silám vyvolaných adhezí vody k hydrofilním stěnám kapilár. Tyto kapilární síly se uplatňují především ve velmi tenkých mikrokapilárách buněčných stěn listových buněk, jejichž průměr se pohybuje řádově v nanometrech. V tracheidách a především v trachejích, jejichž šířka je řádově desítky  $\mu\text{m}$ , se kapilární síly uplatňují omezeně. Přetržení vodních sloupců zamezují vysoké kohezní síly mezi molekulami vody spojenými vodíkovými můstky.

K zajištění kontinuity vodních sloupců ve vodivých drahách je nutno zabránit pronikání vzduchu do kapilár. Tuto funkci plní buňky dřevního parenchymu obklopující tracheidy a tracheje. Přesto dochází poměrně často k přerušení vodního sloupce (kavitace) a následné vzduchové embolii, např. u dřevin pravidelně během zimy při střídavém mrznutí a tání vody v xylému, při poranění nebo převažuje-li výrazně transpirace nad příjmem vody kořeny. Transport vody je však dostatečně zajištěn bočními laterálními xylémovými drahami (nezesílenými místy v postraních stěnách tracheid a tracheí) a novými vodivými elementy, které vznikají na jaře činností kambia. Otázkou zůstává možnost obnovení funkce tracheid či

tracheí postižených vzduchovou embolií. Vzduchové bublinky mohou být snad vytlačeny kořenovým vztlakem nebo vodou pronikající ztenčeninami ze sousedních parenchymatických buněk, kdy se v xylémových drahách generuje dočasně pozitivní hydrostatický tlak.

Především na jaře před vyrašením listů má pro pohon transpiračního proudu u krytosemenných rostlin význam i kořenový vztlak (u nahosemenných rostlin je kořenový vztlak zanedbatelný), který sám o sobě může vodu vyzvednout do výše několika metrů (u některých listnáčů snad i desítek metrů). V zásobních pletivech kořenů dochází na jaře k hydrolýze zásobních látek (škrob) na osmoticky aktivní jednoduché sacharidy, které snižují vodní potenciál buněk kořene a tedy zvyšují schopnost kořenů přijímat vodu. Dále jsou aktivně vylučovány minerální ionty z buněk pericyklu a parenchymatických buněk středního válce do vodivých drah xylému, kde snižují osmotický potenciál, a tím i vodní potenciál (pozitivní hydrostatický tlak dosahuje obvykle hodnot 0,1 až 0,2 MPa, výjimečně i více). Voda proniká do xylému – dochází k přesycení tracheid a trachejí vodou a k aktivnímu vytlačení vody vzhůru. Zpětné difuzi iontů apoplastem směrem k periférii brání endodermis s Casparyho proužky.

Vzájemná souhra jednotlivých mechanismů umožňuje zásobovat vodou koruny i přes 100 m vysokých stromů – blahovičníků (*Eucalyptus*), sekvojí (*Sequoia*), sekvojovců (*Sequoiadendron*), douglasek (*Pseudotsuga*) – nejvyšších stromů planety. (Vinter, 2010)

### **3.2 Propustnost dřeva pro tekutiny**

Hydrodynamický pohyb tekutin ve dřevě je obvykle zkoumán především z hlediska impregnování a hydrotermických úprav dřeva. Je však důležitý také pro pochopení složitých pochodů xylogeneze a snimi souvisejícím transpiračním prouděním.

Experimentální zkoumání propustnosti dřeva patří mezi důležité postupy zkoumání jeho struktury. (Požgaj, 1997)

Hydrodynamický pohyb kapaliny ve dřevě vyvolaný gradientem vnějšího tlaku se nejčastěji popisuje Darcyho zákonem v integrálním tvaru. (Požgaj, 1997)

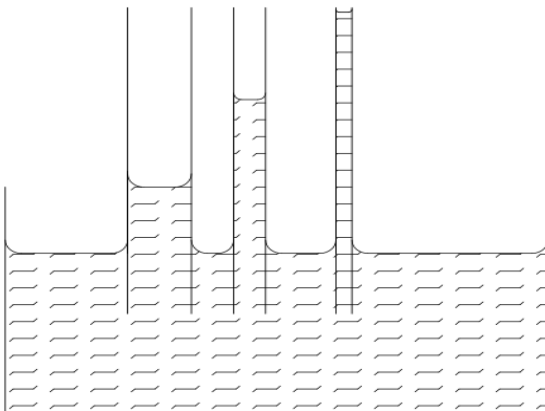
Tato rovnice lze však použít pouze při splnění následujících podmínek.

- Proudění musí být laminární, tedy Reynoldsovo číslo musí být nižší než 2000.
- Hustota kapaliny se považuje za konstantní

- Jedná se o Newtonovskou kapalinu
- Proudění musí být ustálené, tedy v čase neměnné
- Délka trubice musí být dostatečně velká v porovnání s tzv. vstupní délkou  $L_v=0,7ReR$ , která je potřebná k vytvoření parabolického profilu rychlosti

Pokud jsou splněny všechny uvedené předpoklady, koeficient propustnosti nám poskytuje informace o stavu a počtu vodivých cest. (Požgaj, 1997)

Vodou volnou se rozumí voda, která je uložena v pórech, jejichž příčný rozměr je větší než  $10^{-7}$ m. V podstatě rozlišujeme dva základní druhy pohybu volné vody ve dřevě. Ten první je kapilární vzlínání, způsobený faktem, že voda smáčí stěny kapilár dřeva a vzlíná po nich (Obr.1). Druhý je hydrodynamický pohyb vyvolaný gradientem vnějšího tlaku. Vlastnost, která tento pohyb ve dřevě umožňuje, se nazývá permeabilitou/propustností.

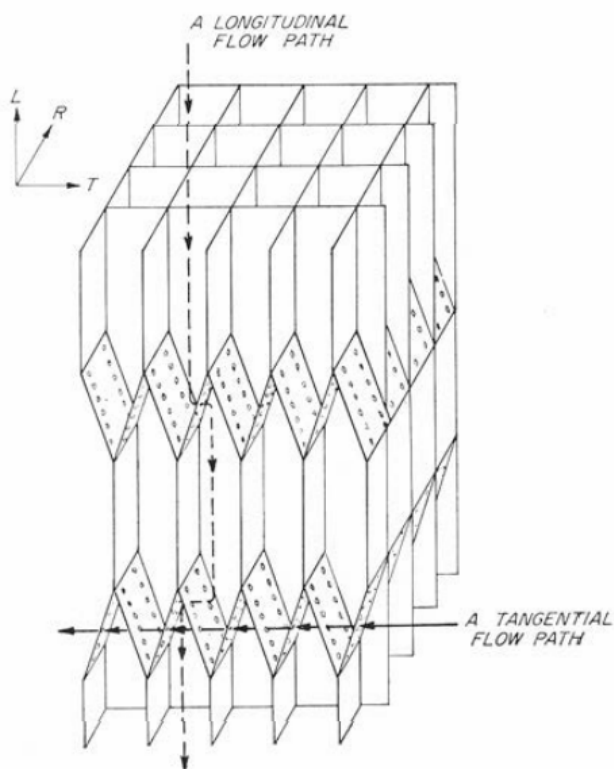


**Obr.1:** Kapilární elevace

Ke kapilárnímu vzlínání/elevaci dochází, pokud bychom póry ve dřevě zjednodušeně pokládali za válcovité kapiláry s poloměrem  $r$  a délkou rovnající se délce celého tělesa, tak pokud těleso ponoříme do vody, vystoupí voda v každé kapiláře do výšky  $h$  nad vodní hladinu.

Tlak nad zakřiveným povrchem kapaliny je tím menší než nad rovným povrchem, čím menší je poloměr zakřivení vypuklosti. Nad kapalinou v kónické kapiláře tedy působí rozdíl tlaku ve směru menšího poloměru. (Požgaj, 1997)

Tok tekutin v bělové části je v podstatě záležitostí tracheid, které jsou vzájemně propojeny hraničícími dvojtečkami. Tyto otvory jsou v porovnání s lumeny velmi malé a předpokládá se, že proudění kladou odpor. Proto je jejich počet a stav pro propustnost klíčová. Model navržený Comstockem (1970) dále předpokládá, že se všechny dvojtečky nacházejí na radiálních plochách, ve zúžených koncích (Obr.2). Je také předpoklad, že všechny dvojtečky mají stejnou velikost. Obr. 2 nám ukazuje 4 párové dvojtečky otevřené v každé tracheidě, které jsou společné se dvěma dalšími tracheidami – následkem je tedy, že pár dvojteček náleží páru tracheid. Je zřejmé, že jak podélná tak tangenciální permeabilita se zvyšují relativním počtem sousedících párů dvojteček souběžně na jednotku plochy příčného řezu kolmo ke směru proudění a jsou snižovány počtem v řadě na jednotku délky ve směru toku. (Siau, 1984)



**Obr.2:** Schematické znázornění II. Comstockova modelu propustnosti pro bělovou část dřeva. Přerušovaná čára představuje podélnou cestu průtoku a plná čára reprezentuje cestu tangenciální. (Comstock, 1970)

Z hlediska propustnosti listnáčů jsou hlavními vodivými elementy cévy. Požgaj (1997) uvádí, že je průměr cév buku 30 až 100 $\mu\text{m}$ . Plošná hustota cév se v jarním i letním dřevě pohybuje okolo 80 až 120 na  $\text{mm}^2$ . Odhad koeficientu propustnosti pro buk je

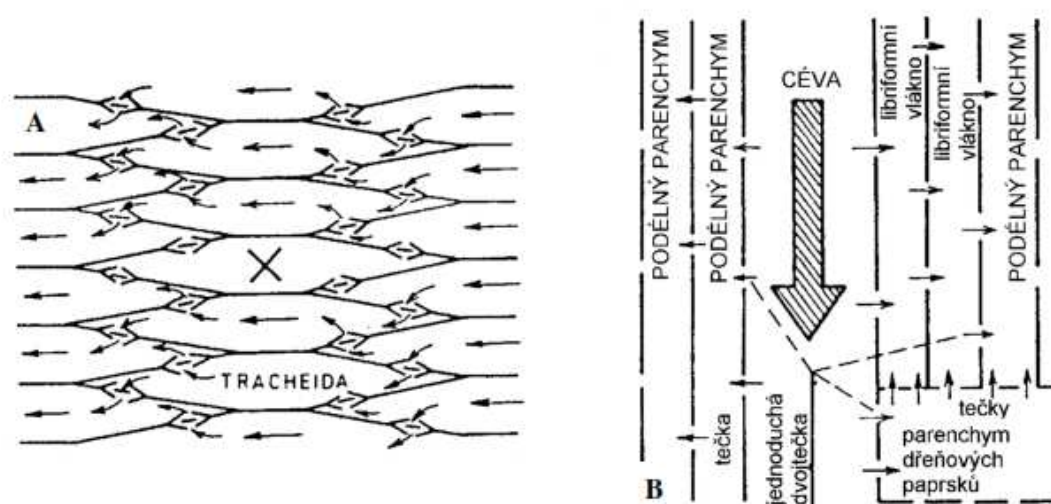


$$k = (1,6 - 294) \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Je tedy možné očekávat, že propustnost bude velmi variabilní nejen v rámci různých dřevin, ale i v rámci jednoho druhu. Faktory ovlivňující propustnost můžeme rozdělit na dva druhy – vnitřní a vnější. Vnitřní faktory přímo souvisí přímo s anatomickou strukturou dřeva tj. s počtem a velikostí vodivých elementů. (Požgaj, 1997)

U jehličnatých dřevin je propustnost dána počtem a poloměrem dvojteček. Je tedy možné očekávat nižší hodnoty než u listnáčů. (Požgaj, 1997)

Vnější faktory souvisí s odchylkami od podmínek platnosti pohybových rovnic.



**Obr.3:**A: Vodivé cesty pro hydrodynamický tok ve dřevě jehličnanů. B: Vodivé cesty pro propustnost listnatých dřevin. (Siau, 1971)

### 3.3 Přenos tepla ve dřevě

Přenos tepla ve dřevě a materiálech na jeho bázi má velký význam z hlediska sušení, technologie výroby i používání těchto materiálů. Znalost zákonitostí přenosu tepla se uplatní všude, kde je zapotřebí znát časoprostorové rozložení teploty ve dřevě (např. hydro-termická úprava dřeva, chemická ochrana dřeva, lisování, atd.). Zároveň však i tam kde je zapotřebí množství tepla na vykonání určitých technologií nebo posuzování tepelně izolačních vlastností dřeva, materiálů na jeho bázi a konstrukcí z nich.

Požgaj (1997) uvádí, že ve dřevě se mohou vyskytovat všeobecně všechny tři základní druhy přenosu tepla. Přičemž vedení (kondukcce) je formou přenosu energie hmotným prostředím,

jehož objemové elementy zůstávají v klidu (nedochází k proudění). Proudění (konvekce) je přenosem energie hmotným prostředím jehož objemové elementy vykonávají translační pohyb. Sálání tepla (radiace) je vyzařování nebo přijímání energie ve formě záření, přičemž na přenos tepla mezi tělesy není zapotřebí hmotné prostředí – je tedy možné i ve vakuu.

Koeficient  $\lambda$ , nazýváme koeficientem tepelné vodivosti. Tento koeficient číselně vyjadřuje množství tepla, které teče jednotkovou plochou za jednotku času, při jednotkovém gradientu teploty. Jeho jednotkou je  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ . (Požgaj, 1997)

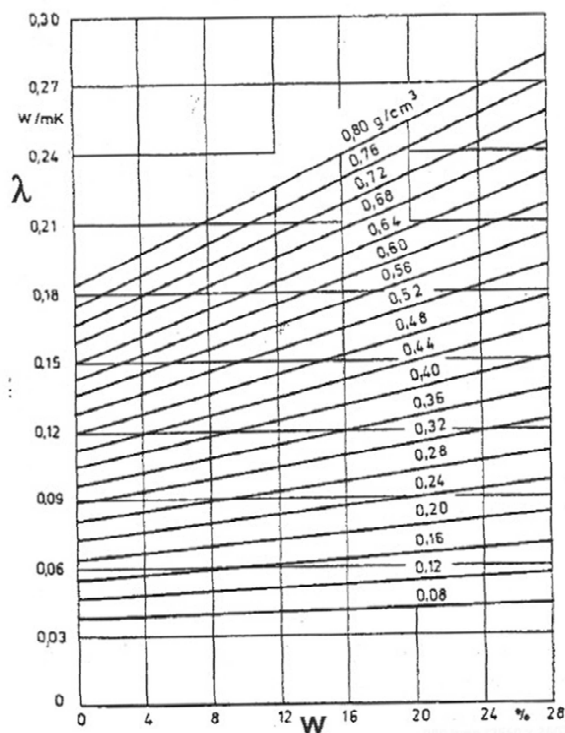
Takže koeficient tepelné vodivosti nám tedy popisuje změnu teploty v prostoru, za předpokladu konstantního průběhu v čase, což odpovídá stacionárním podmínkám děje. (Horáček, 2008)

Některé hodnoty koeficientu tepelné vodivosti pro dané látky a materiály jsou uvedené v následující tabulce. Ty nám říkají, že dřevo je (zvláště ve směru napříč vláken) je relativně dobrým tepelným izolátorem. Na dobrých tepelně-izolačních vlastnostech dřeva se podílí i jeho značná pórovitost, a výsledkem je např. značná odolnost konstrukčních dřevěných prvků vůči ohni. Dlouhá doba potřebná ke změně teploty v objemu dřeva společně s měrným teplem činí ze dřeva ideální materiál pro silné obvodové stěny.

Tab.1: *Tepelná vodivost  $\lambda$  vybraných materiálů.*

Materiál	Koeficient tepelné vodivosti $\lambda$ ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )
Dřevo _I_ ( $w=12\%$ )	0,12-0,18
dřevo    ( $w=12\%$ )	0,25-0,45
dřevní substance _I_	0,44
dřevní substance	0,88
vzduch	0,024
voda	0,59

Kromě anatomického směru koeficient tepelné vodivosti  $\lambda$  závisí také na hustotě dřeva, jeho vlhkosti a teplotě. Jelikož vzduch patří mezi velmi dobré izolanty, dá se očekávat, že s rostoucí hustotou poroste i tepelná vodivost. (Požgaj, 1997)



**Obr.4:** Vliv hustoty a vlhkosti dřeva v suchém stavu na koeficient tepelné vodivosti dřeva napříč vlákny. (Niemz, 1993)

Vedení tepla ve dřevě ovlivňuje mnoho faktorů, největší vliv však mají anatomická stavba dřeva, hustota a vlhkost dřeva. Vliv anatomické struktury dřeva vyjádřený anizotropií se projevuje rozdílnou tepelnou a teplotní vodivostí v podélném a příčném směru ( $\lambda_L, a_L \gg \lambda_R, a_R > \lambda_T, a_T$ ). Na rozdíl od pohybu vody ve dřevě se přenos tepla ve směru a napříč vláken tolik neliší a v podélném směru je 1,5 - 2,5 krát větší než ve směru příčném (Tab.2) Vysvětlení lze hledat v orientaci fibril v buněčné stěně, která kromě S<sub>2</sub> vrstvy není příliš jednoznačná. Hodnoty koeficientu teplotní vodivosti  $a$  se ve směru radiálním a tangenciálním příliš neliší, rozdíl ( $\pm 15\%$ ) vzniká pouze u koeficientu tepelné vodivosti  $\lambda$  a tou dřev s vícevrstevnými dřeňovými paprsky (dub, buk), kde  $\lambda_R > \lambda_T$ , a u jehličnanů s vysokým procentem letního dřeva (modřín), kde  $\lambda_R < \lambda_T$ . (Horáček, 2008)

Tab.2: Příklady tepelně-fyzikálních charakteristik vybraných druhů dřev (podle Regináče 1990)

Druh dřeva - směr	Teplota $T(°C)$	Vlhkost $w$ (%)	Hustota $\rho(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	Měrné teplo $c$ ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	Tepelná vodivost $\lambda(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	Teplotní vodivost $10^7 a$ ( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ )
smrk - L	20	12	390 - 467	1,55 - 2,28	0,229 - 0,339	3,77 - 4,95
- R	20	12	390 - 467	1,55 - 2,28	0,133 - 0,157	1,56 - 1,74
- T	20	12	390 - 467	1,55 - 2,28	0,113 - 0,132	1,49 - 1,52
javor - L	20	10	608	1,92	0,300	2,43
- R	20	10	608	1,92	0,180	1,40
- T	20	10	608	1,92	0,180	1,38
jasan - L	20	10	702	1,92	0,360	2,43
- R	20	10	702	1,92	0,180	1,20
- T	20	10	702	1,92	0,170	1,16

Se zvyšující se hustotou tepelná vodivost  $\lambda$  roste, ale teplotní vodivost  $a$  naopak klesá. Rozdílný průběh závislostí je dán rozdílnými hodnotami tepelné a teplotní vodivosti vzduchu a dřevní substance. Průměrná hodnota koeficientu tepelné vodivosti dřevní substance  $\lambda_s = 0,600 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ,  $\lambda_{\text{vzduchu}} = 0,026 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . S rostoucí hustotou dřeva roste podíl dřevní substance a klesá podíl vzduchu v daném objemu dřeva a tím i zákonitě roste tepelná vodivost  $\lambda$ . Teplotní vodivost vzduchu je až 100 krát větší než teplotní vodivost dřevní substance (suchý vzduch je téměř dokonalý tepelný izolant), proto je i závislost na hustotě dřeva opačná. (Horáček, 1998)

### 3.4 Přehled metod měření proudění mízy

Po Huberově průkopnické práci z počátku minulého století (Huber, 1932), vznikalo mnoho typů, možností a metod pro měření velikosti toku mízy. Tyto metody byly založené na velmi odlišných principech – např. termodynamické, elektrické, magneto-hydrodynamické, jaderná a pomocí magnetická rezonance. Nicméně, jen málo z nich – zvláště těch založených na termodynamických pochodech, jsou v tomto oboru více využívány (tj. v lesech a sadech). Přitom přístroje pro termodynamické měření jsou komerčně poměrně dostupné. Nicméně, samotné měření mízního toku představuje pouze jednu část studia této problematiky. Dalšími významnými prvky, které je zapotřebí brát v úvahu je vyhodnocování chyb, správná integrace měřených dat určitým způsobem pro celé stromy (např. Naděždina a kol., 2002a, b), a průtokové variace uvnitř stromu (např. Čermák a Kučera, 1990a, b; Čermák a Naděždina, 1998a, b, c; Naděždina a kol., 2002a, b).

#### Metody pro měření toku mízy

Hlavní metody vyvinuté pro měření průtoku mízy (chronologicky seřazeny) jsou:

- HPV – Heat pulse velocity
- THB – Trunk segment heat balance
- SHB – Stem heat balance
- HD – Heat dissipation
- HFD – Heat fielddeformation
- LHB – linearheat balance

Podrobný přehled výše uváděných metod předkládají např.: Marshall (1958), Jones a kol. (1988), Campbell (1991), Cohen (1993), Swanson (1994), Čermák (1995), Granier (1995), Edwards a kol. (1996), Smith a Allen (1996), Braun (1997), Čermák a Naděždina (1998a, b, c), Gonzales-Altozano a kol. (1998), Kostner a kol. (1998), Wullschlegler a kol. (1998), Trcala a Čermák (2015) a další. Kromě přehledů, byly také vypracovány teoretické analýzy vypovídající o cílech a nevýhodách různých metod. Tyto studie zároveň poukazují i na možné způsoby jejich zlepšení (Marshall, 1958; Pickard a Puccia, 1972; Pickard, 1973; Swanson a

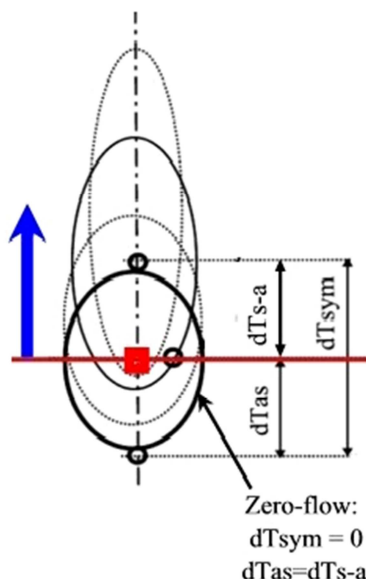
Whitfield, 1981; Swanson, 1983; Valancogne a Nasr, 1989; Groot a King, 1992; Barret a kol., 1995; Grime a kol., 1995; Naděždina, 1998).

Několik výzkumných skupin se také zaměřilo, na porovnání výsledků, kterých bylo dosaženo za použití různých měřících metod. Což také vedlo k jejich případnému zlepšení (např.: Penka a kol., 1979; Rychnovská a kol., 1980; Cohen a kol., 1981; Čermák a kol., 1984; Schulze a kol., 1985; Diawara a kol., 1991; Hatton a Vertessy, 1990; Kelliher a kol., 1992; Kostner a kol., 1992, 1994; Grime a kol., 1995b; Zhang a kol., 1997; Offenthaler a Hietz, 1998; Schubert, 1999; Lundblad a kol., 2001).

(Čermák, Kučera, Naděždina, 2004)

### 3.5 Metoda HFD – Heat Field Deformation - deformace teplotního pole

Jak už samotný název napovídá, jedná se o metodu založenou na měření deformace teplotního pole, které se vytváří v oblasti kolem vyhřívané nerezové jehly. Tato jehla funguje jako lineární ohřívač a je v radiálním směru zaražena do kmene. Pokud bychom se podívali na tepelné pole, které vytváří z čelního pohledu (ve směru osy z) během nulového průtoku, tak zjistíme, že vypadá jako symetrická elipsa (v důsledku různých tepelných vodivostí dřeva v podélném a tangenciálním směru). S narůstající rychlostí proudění se postupně prodlužuje a získává vejčitý tvar (zdeformovaný elipsoid).



**Obr.5:** Znáznornění deformací teplotního pole s narůstající rychlostí transpiračního proudu. (The heat filed deformation method for sap flow measurements, Instruction manual)

Ohledně tepelných vlastností je zde kmen třeba považovat za komplexní materiál, který je tvořen pevnou dřevní hmotou, kapalinou/vodou a vzduchem.

Hloubka umístění termočlánků pod kambium by měla být u všech vícebodových senzorů instalovaných na konkrétním stromě stejná (nebo ještě lépe ve všech měřených vzorků na daném stanovišti). To zjednodušuje a usnadňuje další integraci dat toku mízy z jednotlivých senzorů do celkové roviny stromu. (Čermák, Kučera, Naděždina, 2004)

Přesný odhad velmi nízkého průtoku (hodnoty blíží se fiktivnímu průtoku) je obtížný, protože naráží na změny tepelné ztráty (dáno anatomickou stavbou konkrétního vzorku). Probíhá však obvykle matematickou metodou, kdy jsou jednotlivé v čase proměnné výsledky vyneseny do grafu a v místě kde se nejvíce přibližují nulovým hodnotám, jsou protaženy a zpětně interpolovány.

Také je velmi důležité, aby měření i samotné přípravy na něj proběhly tak jak mají. Sensory bývají obvykle instalovány ve výšce hrudi (1,3 m nad zemí), tedy obvyklé standardní výšce, ve které se měří průměr stromu při inventarizaci lesů po celém světě. A pokud je z nějakých důvodů (např. spodní část stromu poškozena od jelenů) zapotřebí pohybovat se senzory nahoru (až 4m), údaje by se měly být zmenšit na standardní výšku v závislosti na poměru odpovídajících parametrů. V místech, kde mají být senzory nainstalovány, se povrch kmene pečlivě vyhladí (pro stromy s hrubou kůrou) na ploše cca 5x5 cm. To se obvykle provádí speciálním nožem, nebo frézou). Během této operace nesmí být lýko poškozeno, takže se odstraní pouze několik mm silná vrstva mrtvé kůry nad ní. Doporučuje se celková tloušťka vnějších tkání kolem 10 mm. Tloušťka hladké kůry (tj, tloušťka krycích tkání kambia) je pak měřena speciálním nástrojem a použita pro stanovení hloubky snímače. Bylo zjištěno, že pokud se tato úprava neprovede, výsledky měření mohou být poněkud zkresleny. (Čermák, Kučera, Naděždina, 2004)

Problematické také mohou být nahnílé kmeny s mokrým jádrem, kde se teplota díky vodě šíří jinak než ve zdravém jádře, které funguje jako izolant. Další problémy se mohou vyskytnout během instalace u dřevin s velmi širokou bělí nebo u některých tropických druhů, jejichž běl se nachází hluboko uvnitř kmene, nebo těch, které mají široce rozptýlené vodivé elementy jako například u palmy, kde je zapotřebí použít extrémně dlouhé elektrody, které je obtížné dobře paralelně umístit.

Pro správnou instalaci senzorů je zapotřebí základních znalostí anatomie a fyziologie vodivých systémů měřeného vzorku. Během dlouhodobých měření u rychle rostoucích velkých stromů může docházet v průběhu měření k relativním změnám polohy senzorů, což může ovlivnit výsledky měření, pokud není integrován dostatečný technický systém nebo multi-point senzory (Naděždina a kol., 1998, 2002a, b; Čermák a Naděždina 1998a; Naděždina a Čermák 2000a, 2000b).

Při celkovém vyhodnocování dat toku mízy pro celý strom musíme, brát v potaz, že zdaleka není homogenní. Jako strom roste, objevují se větve, staré suky, atd., které často na povrchu nemůžeme nijak pozorovat; proudění se kolem suků bezprostředně rozděluje nad a pod a vzniká nevodivé území. Opatrnost a pozornost při umístění sondy, správný odběr vzorků a pečlivá analýza získaných dat jsou jedinými způsoby, jak cíleně zajistit reprezentativní údaje, ve kterých nebude docházet ke zkreslení (Swanson; 1971).



## 4 teoretická analýza

### 4.1 Vedení tepla - Fourierův zákon

Vedení tepla popisujeme Fourierovým zákonem ve tvaru:

$$\mathbf{q} = -\lambda \nabla T \quad (1)$$

Kde  $\mathbf{q}$  je vektor hustoty tepelného toku – tedy množství tepla, které proteče jednotkovou plochou za jednotku času.

Tepelné pole v tělese můžeme popsat izotermními plochami, které se dají popsat:

$$T(x, y, z, t) = \text{const.}$$

Fourierův zákon tedy říká, že v izotropním prostředí má vektor tepelného toku  $\mathbf{q}$  stejný směr, ale opačnou orientaci než vektor gradientu, kolmý v daném bodě tepelného pole na izotermní plochu. Složky gradientu teploty jsou dané parciálními derivacemi teploty podle souřadnic, tedy:

$$\nabla T = \begin{pmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{pmatrix}$$

Derivace jsou kladné ve směru rostoucí teploty, avšak teplo se šíří od vyšších teplot k nižším. Koeficient  $\lambda$ , který je definován rovnicí (1) nazýváme koeficientem tepelné vodivosti. Tento koeficient číselně vyjadřuje množství tepla, které teče jednotkovou plochou za jednotku času, při jednotkovém gradientu teploty. Jeho jednotkou je  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . (Požgaj, 1997) Takže koeficient tepelné vodivosti nám tedy popisuje změnu teploty v prostoru, za předpokladu konstantního průběhu v čase, což odpovídá stacionárním podmínkám děje. (Horáček, 2008)

Tepelná vodivost dřeva závisí do značné míry na hustotě a vlhkosti dřeva. MacLean (1941) navrhl empirickou rovnici pro stanovení  $\lambda$  v příčném směru ve tvaru

$$\lambda_{\perp} = \rho_k(0,217 + au) + 0,024P_w$$

Kde  $\rho_k$  je konvenční hustota ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ),  $w$  vlhkost dřeva (%),  $P_w$  - pórovitost (%),  $a$  je koeficient, kdy pro  $w < 40\%$  je  $a = 0,0040$  a pro  $w > 40\%$   $a = 0,0055$ .

Tepelná vodivost v podélném směru vláken je podle MacLeana (1941) ve vztahu k  $\lambda_{\perp}$  dána vztahem

$$\lambda_{\parallel} = 2,5 \lambda_{\perp}$$

Důležitým tvarem Fourierova zákona je integrovaná rovnice

$$\frac{Q}{S \cdot t} = \lambda \cdot \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1}$$

kteřá popisuje vedení tepla v hranolu v případě, že teplota není funkcí času a boční stěny hranolu jsou tepelně izolované. Stacionární tvar tohoto zákona je vhodný například pro výpočet spotřeby tepla na vytopení místnosti apod. (Požgaj, 1997)

V anizotropním prostředí má Fourierův zákon zevšeobecněný tvar

$$\begin{pmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \lambda_{xx} & \lambda_{xy} & \lambda_{xz} \\ \lambda_{yx} & \lambda_{yy} & \lambda_{yz} \\ \lambda_{zx} & \lambda_{zy} & \lambda_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{pmatrix}$$

V tomto tvaru nám Fourierův zákon říká, že složky hustoty tepelného toku jsou lineárními kombinacemi složek gradientu teploty. Koeficienty těchto kombinací  $\lambda_{ij}$  jsou složkami symetrického tenzoru druhého řádu. Pokud v izotropním prostředí měly vektory hustoty tepelného toku a gradient teploty stejný směr a opačnou orientaci, v anizotropním prostředí už tyto dva vektory stejný směr nemají. (Požgaj, 1997)

Kromě anatomického směru koeficient tepelné vodivosti  $\lambda$  závis také na hustotě dřeva, jeho vlhkosti a teplotě. Jelikož vzduch patří mezi velmi dobré izolanty, dá se očekávat, že s rostoucí hustotou poroste i tepelná vodivost. (Požgaj, 1997)

Fourierův zákon však popisuje pouze vedení tepla, tím se dostáváme během měření na úroveň přestupu tepla z jehly na nejbližší okolní dřevní hmotu a mízu. Pokud vytvoříme fyzikální bilanci (rovnováhu) působících jevů vznikne nám diferenciální rovnice, ve které je zavedena jak kondukce, tak konvekce. Tak bylo učiněno právě v metodě LHB, která v měření vychází z poznatků pro HFD, výsledky však zpracovává na základě čistě empirických vztahů. Viz v následujících kapitolách.

## 4.2 Metoda LHB – Linear Heat Balance

Analytické řešení proudění mízy a obsahu vody. Vezmeme-li předpokládat, že míza může proudit pouze v jednom směru (y)  $\mathbf{Q}_w=(0, Q_w, 0)$  a podmínku stacionárního děje (derivace teploty v závislosti na čase je rovna nule), tak základním výpočetním vztahem je:

$$-\lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + c_w Q_w \frac{\partial T}{\partial y} - q = 0, \quad (2)$$

kde T je teplota [K];  $Q_w$  je průtok mízy [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ];  $\lambda_x$  a  $\lambda_y$  jsou tepelné vodivosti v směrech x a y; q je tepelný zdroj [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ ] a  $c_w$  je specifická teplota vody [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ].

Pozn. k následujícímu textu: Greenova funkce je impulzivní odpověď na nehomogenní diferenciální rovnici, definovanou v doméně, která má konkrétní specifické počáteční nebo okrajové podmínky (Polyanin, 2002).

Analytické řešení rovnice (2) pro kontinuální lineární zdroj tepla  $H[\text{W} \cdot \text{m}^{-1}]$ , ležící v radiálním směru (z) je založeno na teorii Greenovy funkce (Polyanin, 2002):

$$T(x, y) - T_{cool} = \frac{H}{2\pi\sqrt{\lambda_L\lambda_T}} \frac{c_w Q_w y}{2\lambda_L} K_0 \left( \frac{c_w Q_w \sqrt{(\lambda_T y^2 + \lambda_L x^2)}}{2\lambda_L \sqrt{\lambda_T}} \right) \quad (3)$$

kde  $T(x, y)$  je tepelným bodem [x, y], [0,0], který se nachází v místě počátku souřadného systému; K je modifikovaná Besselova funkce druhého druhu nultého řádu a H je tepelná energie na jednotkovou délku podél linie [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$ ].

Krátké vysvětlení modifikované Besselovy funkce druhého druhu, nultého řádu:

Modifikovaná Besselova funkce druhého druhu je funkce  $K_n(u)$ , která je jedním z řešení modifikované Besselovy diferenciální rovnice. V našem konkrétním případě  $n = 0$  udává  $K_0(u)$  jako integrál (Abramowitz a Stegun, 1972)

$$K_0(u) = \int_0^{\infty} \frac{\cos(us)}{\sqrt{s^2 + 1}} ds$$

Proto musí být numerická metoda vypočtena jako integrál. Po úpravě můžeme použít analytickou rovnici (3) tímto způsobem:

$$dT_{above} = T_{above} - T_{side} = \frac{H}{2\pi\sqrt{\lambda_L\lambda_T}} \left[ e^{\frac{c_w Q_w dy}{2\lambda_L}} K_0\left(\frac{c_w Q_w dy}{2\lambda_L}\right) - K_0\left(\frac{c_w Q_w dx}{2\sqrt{\lambda_T\lambda_L}}\right) \right], \quad (4)$$

tepelný výkon  $H$  je znám,  $dT_{above} = T_{above} - T_{side}$  je měřeno a obě tepelné vodivosti  $\lambda_T$  a  $\lambda_L$  jsou funkcemi obsahu vody WC (watercontent). Ukázalo se, že  $\lambda_L = k \lambda_T$ , kde je častý předpoklad a i zde jej tak předpokládáme  $k=2$  (Siau, 1995; Trcala a Čermák 2014). Poté dostáváme nelineární algebraickou rovnici o dvou neznámých parametrech  $\lambda_T$  a  $Q_w$ :

$$dT_{above} = f(\lambda_T, Q_w),$$

Hodnotu tohoto rozdílu teplot (za podmínky nulového průtoku) můžeme určit během měření průtoku mízy pomocí metody HFD. Tato hodnota může být odvozena z naměřených údajů, i když nuly nedosáhne. Naměřené údaje jsou vyneseny do grafu a vhodným protažením funkce a interpolací dat jsou nadále zjišťovány.

$$(dT_{above})_0 = \lim_{Q_w \rightarrow 0} dT_{above} = \lim_{Q_w \rightarrow 0} f(\lambda_T, Q_w) = g(\lambda_T),$$

$$\lambda_T = g^{-1}((dT_{above})_0) = \frac{H}{2\pi(dT_{above})_0\sqrt{k}} \ln \frac{\sqrt{k} dx}{dy}, \quad (5)$$

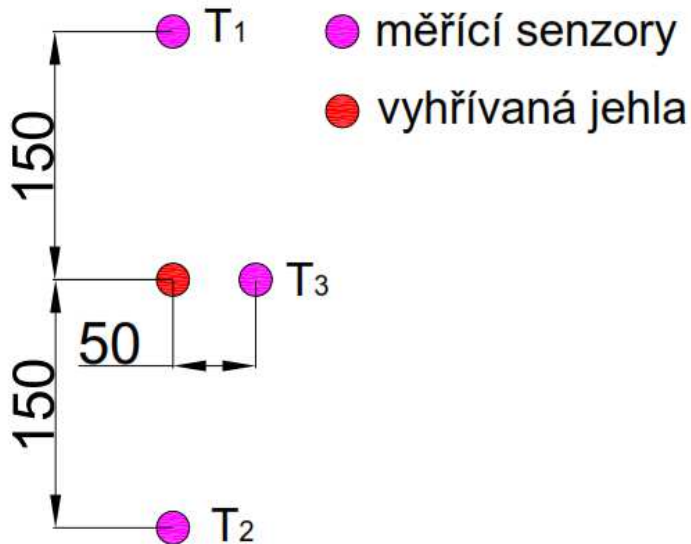
Můžeme tedy použít  $(dT_{above})_0$  ve výše uvedené rovnici (5) pro výpočet  $\lambda_T$ . (Trcala a kol., 2014)

Takže dostáváme pouze jednu neznámou a to  $Q_w$ , což umožňuje vypočítat proudění mízy  $Q_w$  z rovnice (4). Je důležité se zmínit, že nemůžeme tok mízy vyjádřit z rovnice (4) explicitně, ale není problémem tuto jednu nelineární algebraickou rovnici o jedné neznámé veličině ( $Q_w$  – tok mízy) řešit. Druhou neznámou proměnnou – tepelnou vodivost  $\lambda_T$  můžeme odhadnout z (5) použitím numerické metody Newton-Raphson.

Pozn. Vypočtená tepelná vodivost  $\lambda_T$  může být použita pro výpočet obsahu vody.

### 4.3 Geometrie čidel

Schéma geometrie zapojení vyhřívané jehly a termočlánků je zobrazeno na Obr.6



Obr.6: Geometrie čidel [mm]

Výpočty jednotlivých teplotních diferencí podle vzorců (6, 7, 8) jsou důležité pro výpočetní vztah metody HFD i metody LHB.

$$dT_{\text{above}} = dT_{\text{s-a}} = T_1 - T_3 \quad (6)$$

$$dT_{\text{below}} = dT_{\text{a-s}} = T_3 - T_2 \quad (7)$$

$$dT_{\text{sym}} = T_1 - T_2 \quad (8)$$

### 4.4 Metoda HFD – Heat Field Deformation - deformace teplotního pole

Tato metoda začala být vyvíjena v roce 1991, při práci s "sap flow index" senzory (Naděždina, 1989, 1992, 1999), a aplikována na jabloních.

Při použití vícebodových senzorů může být metoda HFD využita i u velkých stromů (Čermák a Naděždina, 1998a, 2002; Naděždina a Čermák, 1998; Naděždina a kol., 2001, 2002a, b; Čermák a kol., 2001a, b).

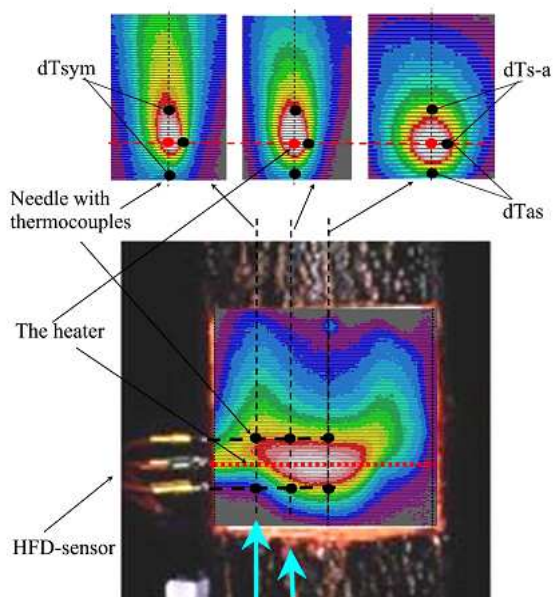
Velikost průtoku mízy se pomocí metody HFD vypočítá z poměru teplotních gradientů v okolí lineárního topného tělesa (vyhřívané jehly) v axiálním ( $dT_{sym}$ ) a tangenciálním ( $dT_{as}$ ) směru. Ty jsou měřeny dvěma dvojicemi termočlánků, jež jsou umístěny (podobně jako topné těleso) v podkožních nerezových injekčních jehlách 1-1,2 milimetry silných v průměru.

Metoda měření HFD je extrémně citlivá na velmi nízké toky, rychle reaguje na změny (s minimální setrvačností) a má jedinečné funkce pro měření skutečného vektoru průtoku. To zahrnuje i toky, které se vyskytují, např. při dešti po období sucha, kdy výhonky absorbují zachycenou vodu (Katz a kol., 1989), nebo reversní toky obecně. Detekce těchto toků stejně tak jako i nízkých nočních re-saturačních toků je důležitá, protože nesou cenné informace o stavu vody v rostlině.

Výpočetní vztah pro metodu HFD je odvozen ze závislosti tvaru teplotních isochar na aktuální hodnotě transpiračního proudu (na různé deformaci teplotního pole v důsledku různého transpiračního proudu). Tedy tvar elipsy, který má isočára teplotního pole za předpokladu nulového toku se v případě rostoucího toku více a více deformuje. Vzorec vyhodnocuje transpirační proud ze dvou měřených teplotních diferencí symetrické vertikální  $dT_{sym}$  a horizontální asymetrické  $dT_{asym}$ ) a vychází z jejich poměru.

$$Q_w = 10 * D * \frac{(K + dT_{sym} - dT_{asym})}{dT_{as}} * \frac{Z_{ax}}{Z_{tg} * L_{sw}}$$

kde  $D$  je tepelná vodivost čerstvého dřeva [ $\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ ],  $K$  je absolutní hodnota  $dT_{sym} - dT_{asym}$  při nulovém toku [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $dT_{sym}$  je teplotní rozdíl mezi termočlánky v axiálním směru [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $dT_{asym}$  je teplotní rozdíl mezi termočlánky v tangenciálním směru [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $Z_{ax}$  je vzdálenost mezi horním axiálním termočlánkem a topným tělesem (1,5 cm),  $Z_{tg}$  je vzdálenost mezi horním tangenciálním termočlánkem a topným tělesem (0,5 cm),  $L_{sw}$  je hloubka bělové části stromu [cm]. Nominální hodnota  $D = 0,0025 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$  byla vybrána dle Marshalla (1958),  $K$  bylo určeno empiricky na základě vztahů mezi  $dT_{sym} - dT_{asym}$  a  $dT_{sym}/dT_{asym}$  dle Naděždina a kol. (2006).



**Obr.7:** Umístění senzorů a teplotní pole vznikající kolem vyhřívané jehly. (The heat filed deformation method for sap flow measurements, Instruction manual)

#### 4.5 Základní rozdíl mezi HFD a LHB

Rozdíl mezi metodou LHB a HFD je tedy především v tom, že metoda HFD je založena na empirických vztazích, zatímco metoda LHB je založena na exaktním analytickém vyjádření vzorce pro výpočet dvoudimenzionálního teplotního pole v okolí lineárního ohřevu. Obě tyto metody jsou schopny sledovat i radiální profil, přestože jsou pouze pro 2D – pro rovinu XY, pokud ale tuto rovinu položíme do různých hloubek ve směru Z, dostáváme tak poměrně obстойný přehled i o třetím směru a vzniká nám tak 3D model.

## 5 Numerický model

Numerické řešení 3D modelu, kondukce a konvekce přenosu tepla v anizotropní struktuře běli během nepřetržitého lineárního ohřevu bylo provedeno pomocí FEM (final element method – metoda konečných prvků) v softwaru COMSOL Multiphysics, ve kterém byli nasimulovány reálně naměřená data. Protože měření je v případě HDF i LHB prováděno totožným postupem, mohl být výstup použit pro výpočet obou metod. Metoda HFD byla dále zpracována v tabulkovém procesoru EXCELL. Výpočetní vztahy pro metodu LHB musely být řešeny v pokročilém programovacím jazyku MATLAB.

Řešení bylo provedeno v souladu s parciální diferenciální rovnicí, která je obecně známou (9) a která popisuje teplotní pole během kondukčního a konvekčního šíření tepla v anizotropním prostředí. Tato numerická analýza byla také provedena pomocí stacionárního (rovnice 10) teplotního pole při kondukcii a konvekci tepla v anizotropním materiálu.

$$q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \lambda \nabla T + c_w \mathbf{Q}_w \cdot \nabla T \quad (9)$$

$$q = \nabla \lambda \nabla T + c_w \mathbf{Q}_w \nabla T \quad (10)$$

Kde  $T$  je teplota [K],  $\mathbf{Q}_w = (0, Q_w, 0)$  je vektor transpiračního proudu [ $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ],  $\lambda$  je matice koeficientů tepelné vodivosti bělové části dřeva [ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ],  $\rho$  je hustota dřeva [ $\text{kg m}^{-3}$ ],  $c$  je měrné teplo bělové části stromu [ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ],  $q$  je tepelný výkon zdroje [ $\text{W m}^{-3}$ ] a  $\nabla$  značí vektor parciálních derivací.

$$\nabla = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix}$$



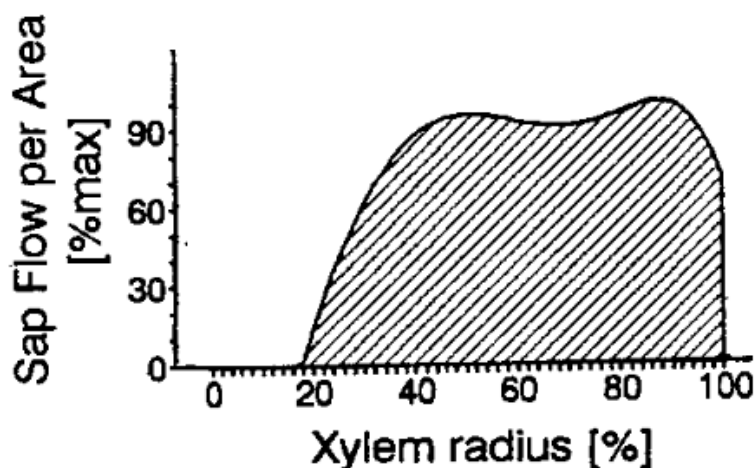
K výpočtům byly jako podklad použity křivky, které uvádí duo autorů Čermák, Naděždinová v článku:

„Sapowood as the scaling parameter – defining according xylem water content or radial pattern of sap flow?(1998)“

Tyto křivky byly v článku uvedeny v procentech, bylo tedy zapotřebí je převést na konkrétní hodnoty, což bylo provedeno grafickou interpolací. Jako nejvyšší rychlost proudění  $Q_{w,max}$  bylo po dohodě s vedoucím bakalářské práce zvoleno  $0,08 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  Poloměr pro model kmene  $r_k=0,14 \text{ m}$  z čehož bělová část zabírá  $0,08 \text{ m}$ .

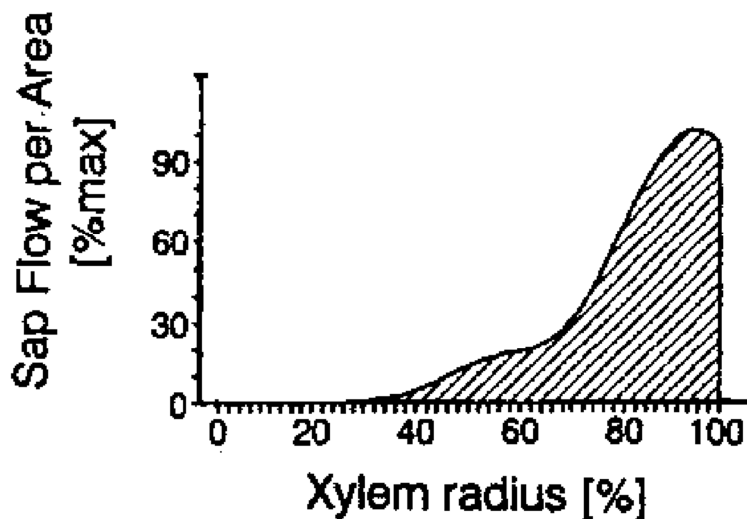
Pro výpočet byly zvoleny tři zcela rozdílné křivky:

1. Je dvou-peaková křivka Cypřiše arizonského – *Cupressus arizonica*; Byla vybrána, protože její radiální profil nemá žádné významnější výkyvy.



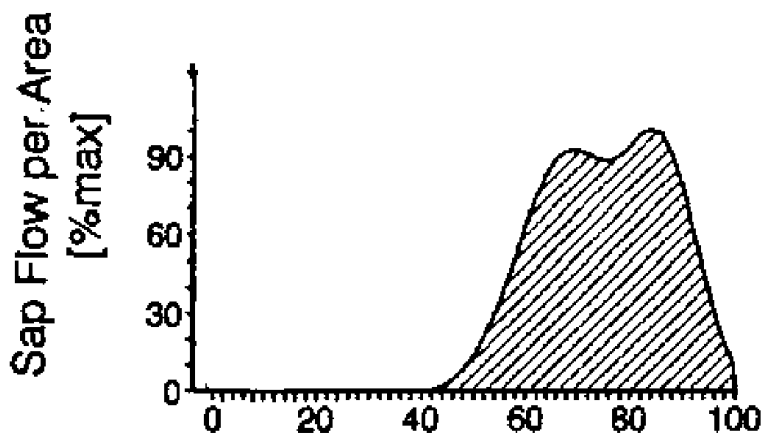
**Obr.8:** Radiální profil transpiračního proudu Cypřiše arizonského – *Cupressus arizonica* (Čermák, Naděždinová; 1998)

2. Jedno-peaková křivka Olivovníku evropského - *Olea europaea*; tato křivky byla vybrána, protože se jedná o křivku s ostrým vrcholem poblíž kambia. Směrem k jádru její tok značně klesá.



*Obr.9: Radiální profil transpiračního proudu Olivovníku evropského - Olea europaea (Čermák, Naděždinová; 1998)*

3. Opět dvou-peaková křivka Topolu středoamerického - *Populusinteramericana*; Křivka byla vybrána, jelikož se jedná o dvou vrcholovou křivku, jejíž maxima se nacházejí v okolí středu, směrem k jádru i ke kambiu pak její hodnoty klesají.



*Obr.10: Radiální profil transpiračního proudu Topolu středoamerického - Populusinteramericana (Čermák, Naděždinová; 1998)*

## 6 Výsledky a diskuze

Zde budou rozebrány konkrétní výsledky pro jednotlivé dřeviny, ve dvou různých koeficientech tepelné vodivosti  $\lambda=0,3$  a  $0,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , pro každou dřevinu byly vyhotoveny radiální profily v deseti postupně klesajících hodnotách velikosti proudu  $Q_w$ . Zde ve výsledcích jsou reprezentativně zastoupeny hodnotami  $Q_w = 0,08; 0,04$  a  $0,008 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , ostatní vypracované grafy je možno nalézt v přílohách. Dále jsou zde grafy srovnávající relativní odchylky od celkového proudění, které byly vypočteny na základě numerické integrace ploch pod křivkami

$$\Delta S_{LHB} = S_{INPUT} - S_{LHB};$$

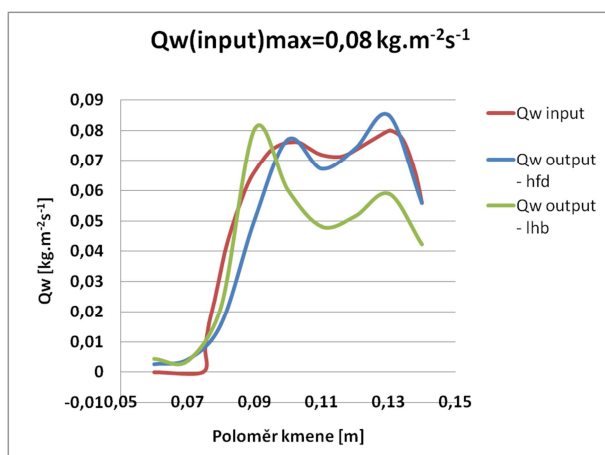
$$\Delta S_{HFD} = S_{INPUT} - S_{HFD};$$

$$S = \int_R Q_w dR.$$

Grafy relativních a absolutních odchylek v bodě největšího proudění a graf srovnání vstupu a výstupů (output : input).

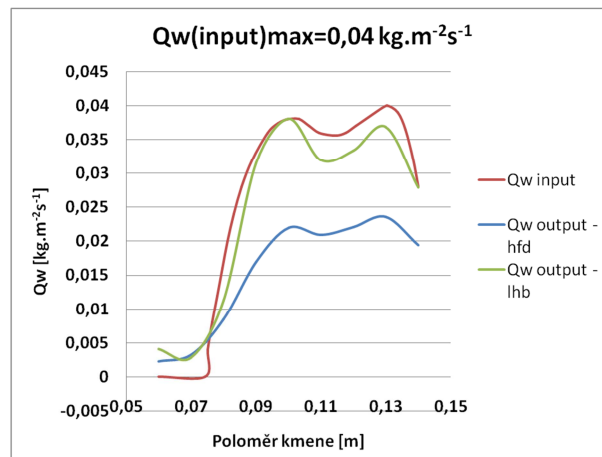
### 6.1 Cypřiš arizonský – *Cupressus arizonica* $\lambda=0,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Na Obr. 11 můžeme vidět, modrou křivku ( $Q_w$  input) s nasimulovanými daty a z grafu je na první pohled patrné, že metoda HFD(modrá) ji opisuje lépe než výsledky získané pomocí metody LHB (zelená) a to jak v místě největšího průtoku tak celkově.



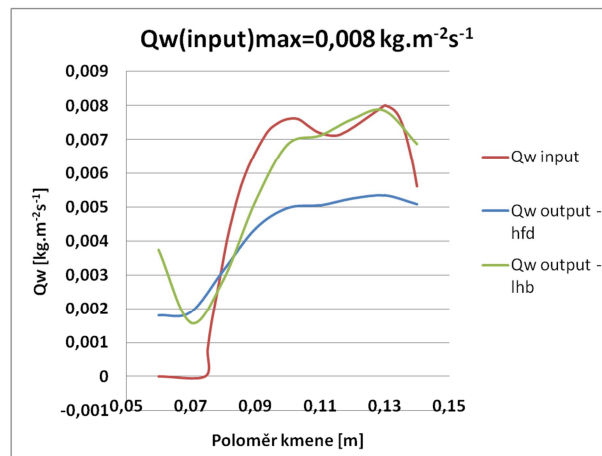
**Obr.11:** Hodnoty transpiračního proudu v radiálním směru (*Cupressus arizonica*;  $\lambda= 0,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ;  $Q_{wmax}= 0,08 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

Na Obr.12 vidíme, že výsledky metody LHB (zelená) jsou již lepší než u metody HFD (modrá), obě dvě metody poměrně dobře kopírují tvar nasimulované křivky (červená), metoda HFD ji však podhodnocuje.



**Obr.12:** Hodnoty transpiračního proudu v radiálním směru (*Cupressus arizonica*;  $\lambda = 0,3$   $W.m^{-1}K^{-1}$ ;  $Q_{wmax} = 0,04$   $kg.m^{-2}.s^{-1}$ ).

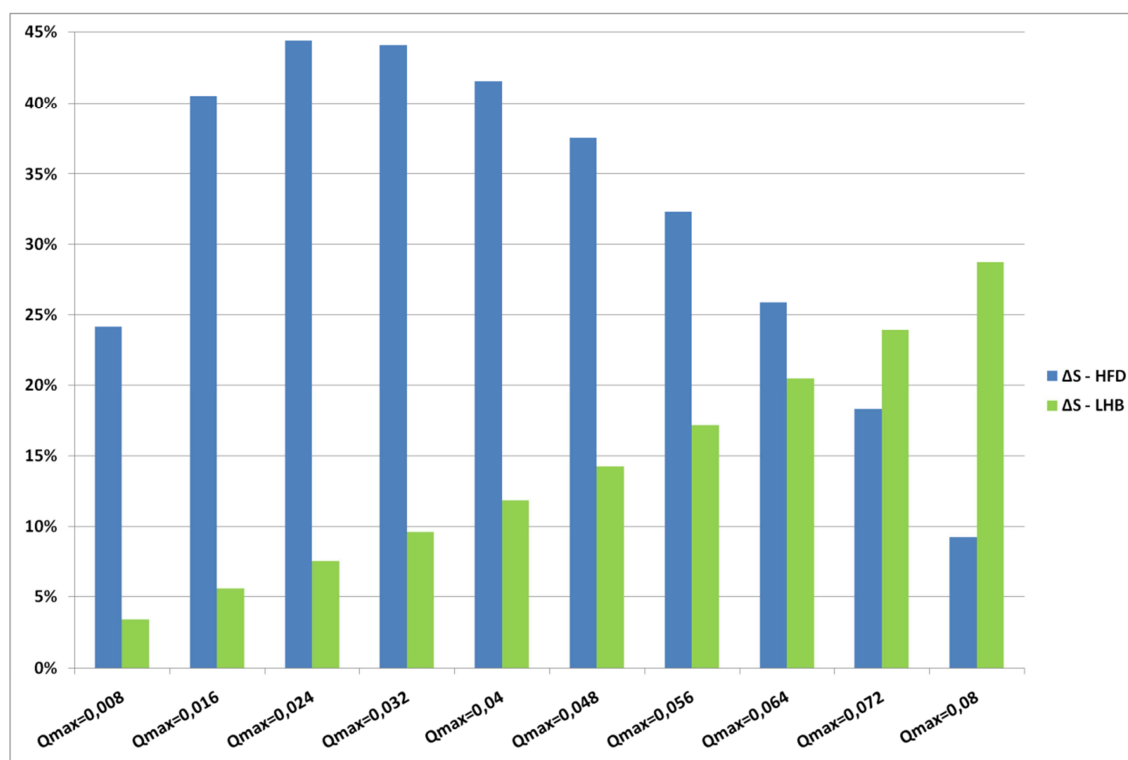
Zde na Obr.13 můžeme pozorovat, že obě křivky HFD (modrá) i LHB (zelená) opisují při velmi nízkém průtoku tvar původní křivky (červená) už jen velmi přibližně. Metoda HFD ji i o něco více podhodnocuje.



**Obr.13:** Hodnoty transpiračního proudu v radiálním směru (*Cupressus arizonica*;  $\lambda = 0,3$   $W.m^{-1}K^{-1}$ ;  $Q_{wmax} = 0,008$   $kg.m^{-2}.s^{-1}$ ).

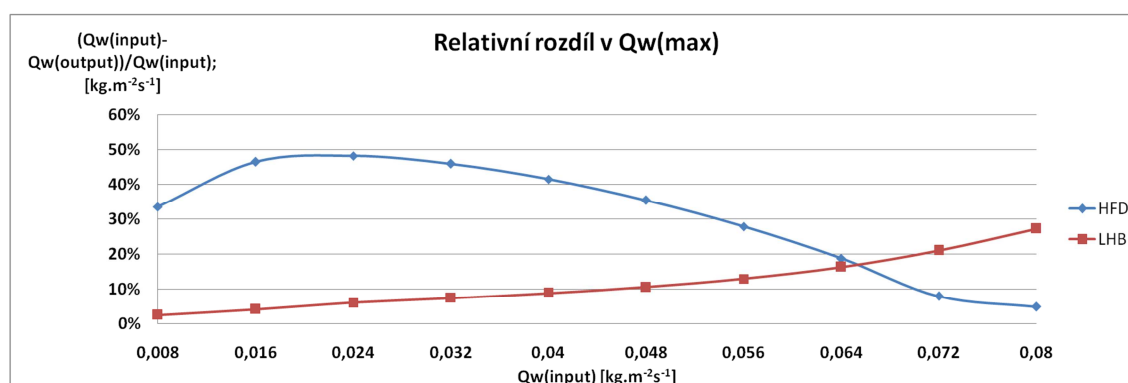
Tento sloupcový graf (Obr.14) nám vypovídá o celkových rozdílech obsahu ploch pod křivkami pro jednotlivé rychlosti  $\Delta S_{HFD} \Delta S_{LHB}$ . Z grafu je patrné, že mezi rychlostmi 0,064 a 0,072  $kg.m^{-2}.s^{-1}$  se nachází bod přelomu, kde jsou výsledky obou metod srovnatelné. Při

nižších rychlostech jsou pak lepší výsledky pro metodu LHB a při vyšších zase pro metodu HFD.



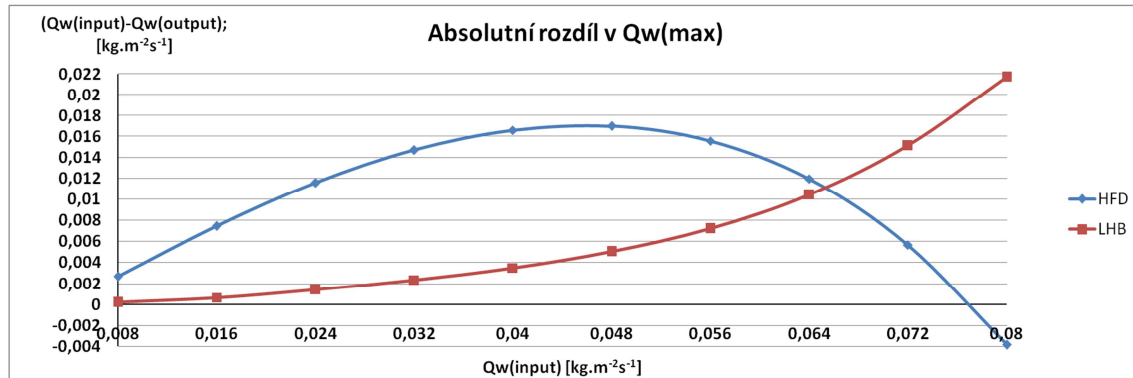
**Obr.14:** Sloupcový graf relativních odchylek celkového proudění  $\Delta SHFD$  a  $\Delta SLHB$  při rychlostech  $Q_{wmax} = 0,008$  až  $0,08 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Zde na tomto grafu (Obr.15) vidíme relativní rozdíl v místě bodu nejvyššího průtoku v radiálním směru křivky. Z grafu můžeme vyčíst, že tento rozdíl u metody LHB (červená) napříč všemi rychlostmi nepřesahuje 30% a nejmarkantnější je při nejvyšší rychlosti, zato u metody HFD dosahuje až 50% a to naopak u nižších rychlostí, u rychlostí nad  $0,064 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  jsou však výsledky přesnější než u LHB.



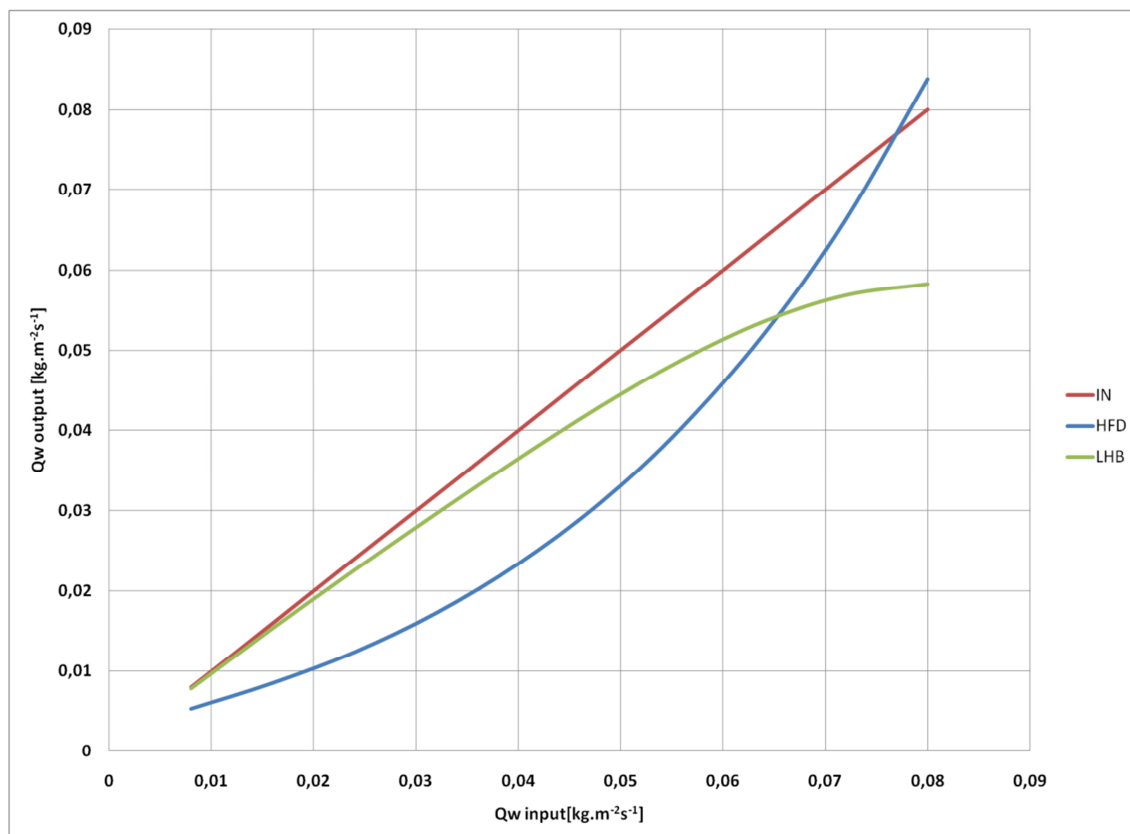
**Obr.15:** Relativní rozdíl v místě bodu nejvyššího průtoku v radiálním směru kmene. (*Cupressus arizonica*;  $\lambda = 0,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )

Zde (Obr.16) vidíme absolutní rozdíl v místě bodu nejvyššího průtoku v radiálním směru křivky. Z grafu můžeme vyrozumět, že tento rozdíl u metody LHB (červená) s narůstající rychlostí také roste a u nejvyšší rychlosti dosahuje až  $0,02171 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . U metody HFD (modrá) dosahuje nejvýše  $0,01699 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  a to naopak u nižších rychlostí, u rychlostí nad  $0,064 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  jsou však výsledky přesnější než u LHB.



**Obr.16:** Absolutní rozdíl v místě bodu nejvyššího průtoku v radiálním směru kmene. (*Cupressus arizonica*;  $\lambda = 0,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ )

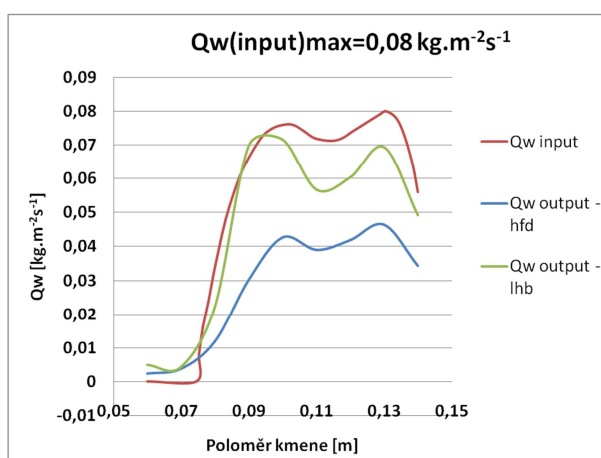
U tohoto grafu (Obr.17) se jedná o grafický přehled vstupu a výstupů, kde na ose x jsou hodnoty vstupu a na ose y hodnoty výstupů. I zde můžeme pozorovat, že metoda HFD je přesnější pokud se měření týká rychlostí větších než  $0,064 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  u nižších rychlostí je to naopak metoda LHB, která se více přibližuje skutečnosti.



**Obr.17:** Graf srovnání vstupu a výstupů (output : input) jednotlivých metod. (*Cupressus arizonica*  $\lambda=0,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )

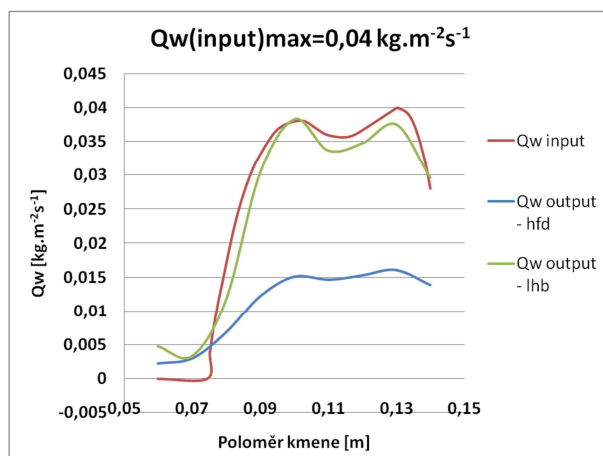
## 6.2 Cypřiš arizonský – *Cupressus arizonica* $\lambda=0,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Na Obr.18 vidíme, že obě křivky LHB(zelená) i HFD (modrá) přibližně opisují tvar nasimulované křivky (červená). Metoda HFD ji tvarově obepisuje o něco lépe, je však podhodnocená a tím pádem jsou i její hodnoty méně přesné.



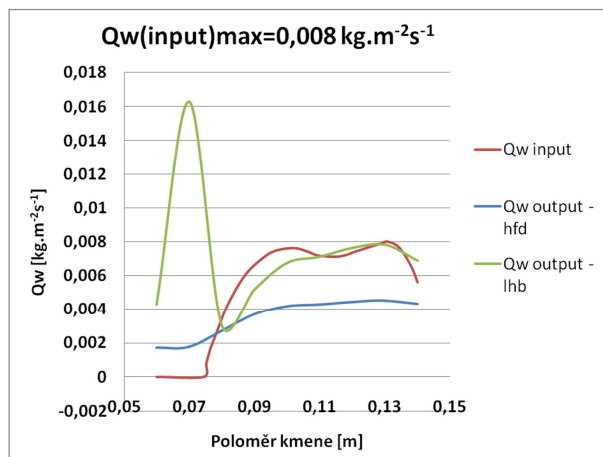
**Obr.18:** Hodnoty transpiračního proudu v radiálním směru (*Cupressus arizonica*;  $\lambda= 0,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ;  $Q_{wmax}= 0,08 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

Z Obr.19 je patrné, že metoha LHB (zelená) opisuje nasimulovanou reálnou křivku (červená) poměrně přesně, bez větších odchylek, zatímco metoda HFD (červená) dosahuje přibližně polovičních hodnot.



**Obr.19:** Hodnoty transpiračního proudu v radiálním směru (*Cupressus arizonica*;  $\lambda = 0,4$   $W.m^{-1}K^{-1}$ ;  $Q_{wmax} = 0,04$   $kg.m^{-2}s^{-1}$ ).

Zde u této křivky (Obr.20) vidíme, že rozdíl mezi metodami LHB (zelená) a HFD (modrá) není již tak výrazný, u metody LHB tu však dochází ke zřetelným odchylkám, které jsou způsobeny tím, že vpočetní vztahy pro LHB u nulového toku nebo jemu blízkému nefungují. Tento fakt je možný brát jako výhodu, kde můžeme říci: „zde je tok již tak nízký, že jej můžeme považovat za nulový“. K obdobné odchylce došlo i u  $Q_w = 0,016$   $kg.m^{-2}s^{-1}$ .

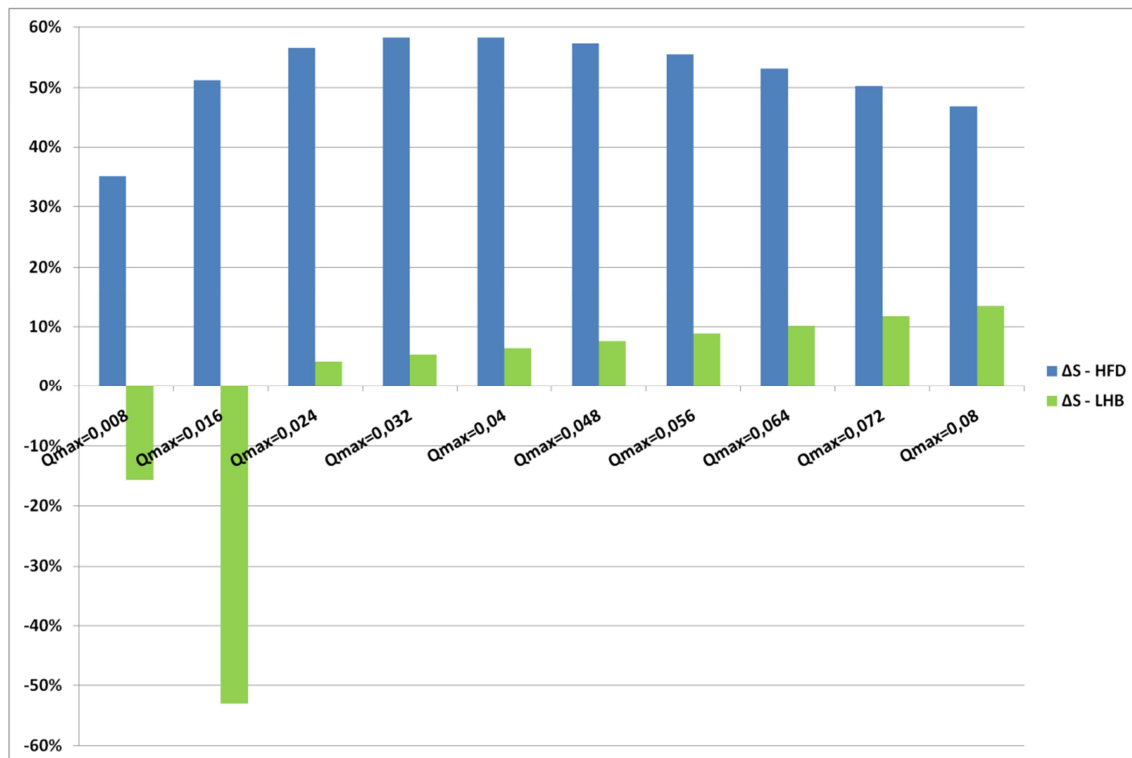


**Obr.20:** Hodnoty transpiračního proudu v radiálním směru (*Cupressus arizonica*;  $\lambda = 0,4$   $W.m^{-1}K^{-1}$ ;  $Q_{wmax} = 0,008$   $kg.m^{-2}s^{-1}$ ).

V tomto grafu (Obr.21) můžeme vidět porovnání celkových rozdílů obsahu ploch pod křivkami  $\Delta S_{HFD}$  a  $\Delta S_{LHB}$  pro jednotlivé rychlosti. Z grafu je patrné, že při koeficientu vodivosti  $\lambda = 0,4$   $W.m^{-1}.K^{-1}$  jsou výsledky metody LHB značně lepší než u metody HFD. Výrazné

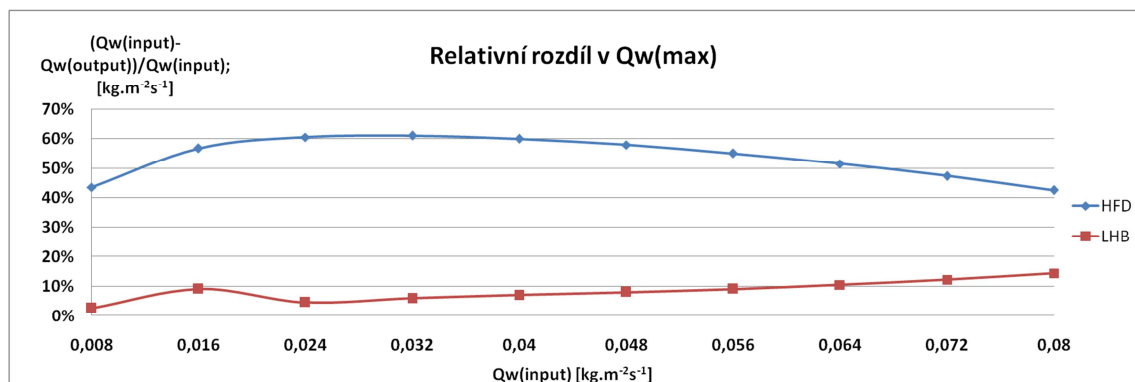


výkyvy u LHB, u nižších rychlostí, jsou v důsledku odlehlých hodnot u daných profilů, které jsou způsobeny faktem, že metoda LHB při nulových hodnotách není funkční.



**Obr.21:** Sloupcový graf relativních odchylek celkového proudění  $\Delta SHFD$  a  $\Delta SLHB$  při rychlostech  $Q_{wmax} = 0,008$  až  $0,08 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ .

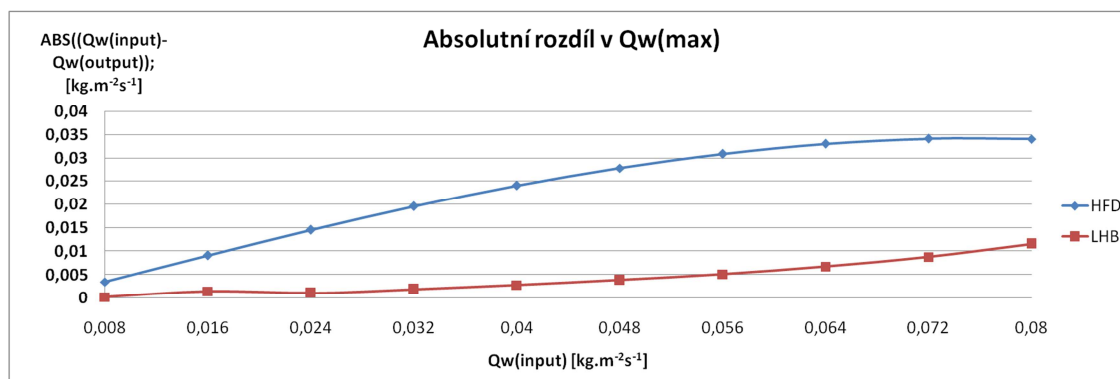
Zde na tomto grafu (Obr.22) vidíme relativní rozdíl v místě bodu nejvyššího průtoku v radiálním směru křivky. Z grafu můžeme vyčíst, že tento rozdíl u metody LHB (červená) napříč všemi rychlostmi nedosahuje ani 20% a až po rychlost  $0,064 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  se drží pod 10%. Zato u metody HFD se pohybuje mezi 40 až 60%.



**Obr.22:** Relativní rozdíl v místě bodu nejvyššího průtoku v radiálním směru kmene. (*Cupressus arizonica*;  $\lambda = 0,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )

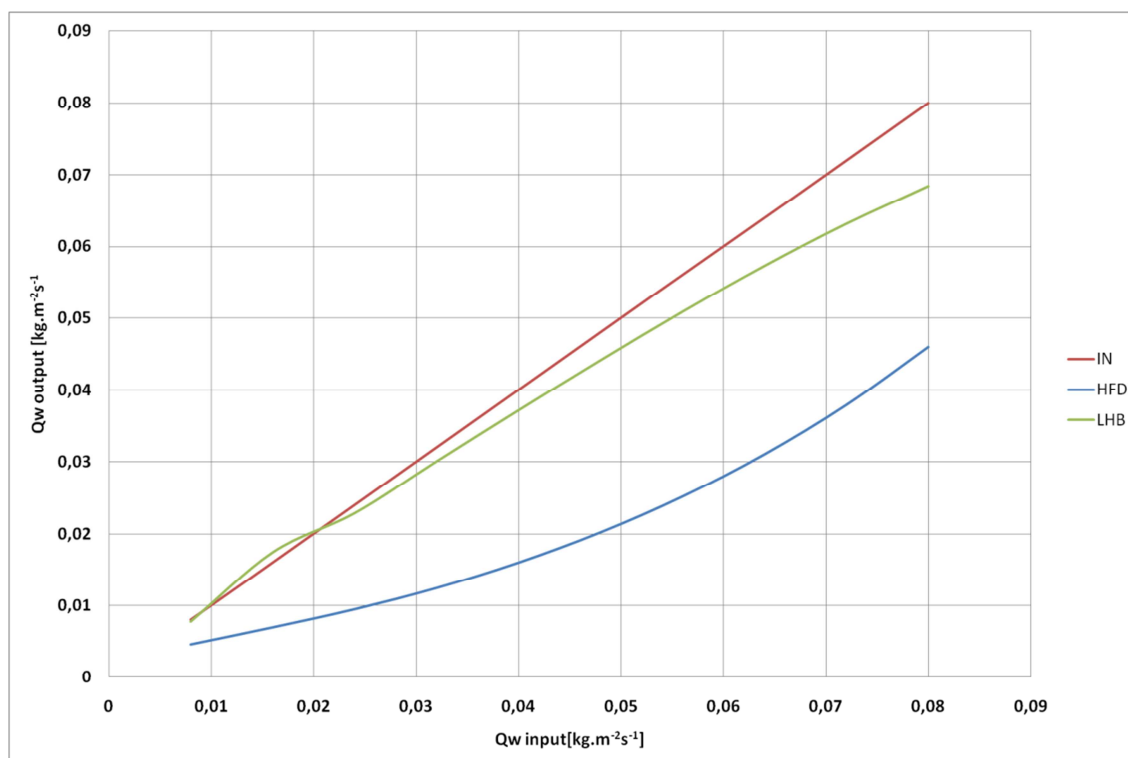
Zde (Obr.23) vidíme absolutní rozdíl v místě bodu nejvyššího průtoku v radiálním směru křivky. Z grafu vyplývá, že tento rozdíl u metody LHB (červená) s narůstající rychlostí také

roste a u nejvyšší rychlosti dosahuje až  $0,01153 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . U metody HFD (modrá) dosahuje nejvýše  $0,03410 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  a to u  $Q_w = 0,072 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . Metoda LHB je tedy při  $\lambda=0,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  na základě teoretické analýzy přesnější než metoda HFD.



**Obr.23:** Absolutní rozdíl v místě bodu nejvyššího průtoku v radiálním směru kmene. (*Cupressus arizonica*;  $\lambda = 0,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )

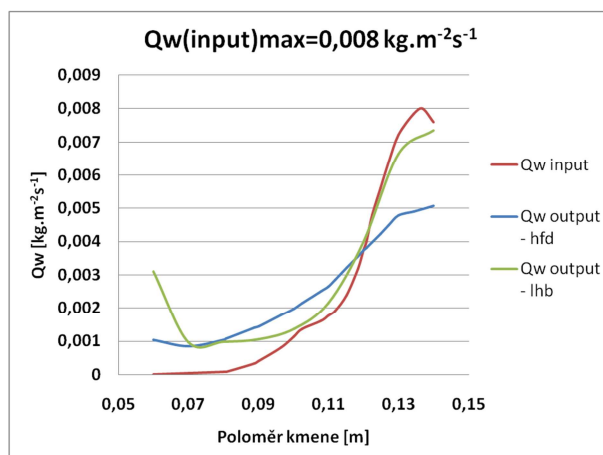
U tohoto grafu (Obr.24) se jedná o grafický přehled vstupu a výstupů, kde na ose x jsou hodnoty vstupu a na ose y hodnoty výstupů. Můžeme tu vidět, že metoda LHB je tu ve všech výsledcích přesnější než metoda HFD.



**Obr.24:** Graf srovnání vstupu a výstupů (output : input) jednotlivých metod. (*Cupressus arizonica*  $\lambda=0,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )

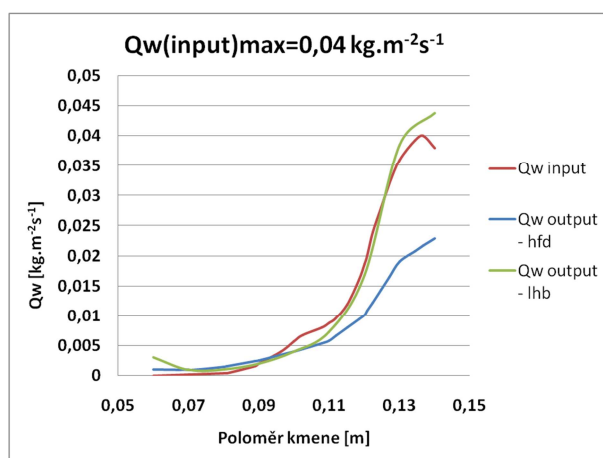
### 6.3 Olivovník evropský - *Olea europaea*; $\lambda=0,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Na tomto grafu (Obr.25) je patrné, že obě dvě metody – jak HFD (modrá), tak LHB (zelená) opisují nasimulovanou křivku (červená) velmi obstojně, bez nějakých výraznějších odchylek.



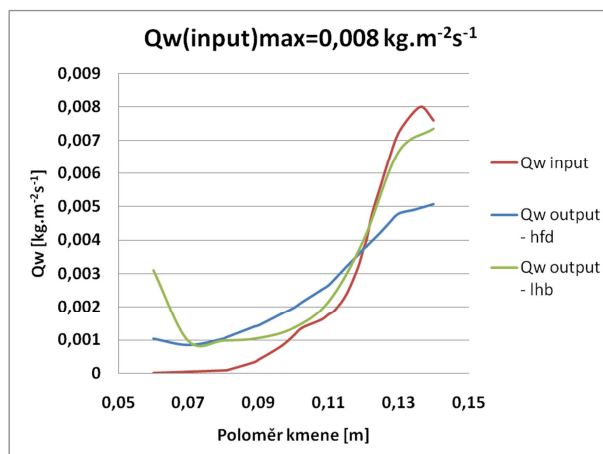
**Obr.25:** Hodnoty transpiračního proudu v radiálním směru (*Olea europaea*;  $\lambda = 0,3 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ;  $Q_{wmax} = 0,08 \text{ kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ).

Zde na Obr.26 můžeme pozorovat, že metoda LHB (zelená) kopíruje křivku úspěšněji, než metoda HFD(modrá), i přestože v místě největšího průtoku ji lehce nadhodnocuje. Metoda HFD zde nasimulovaný model podhodnocuje.



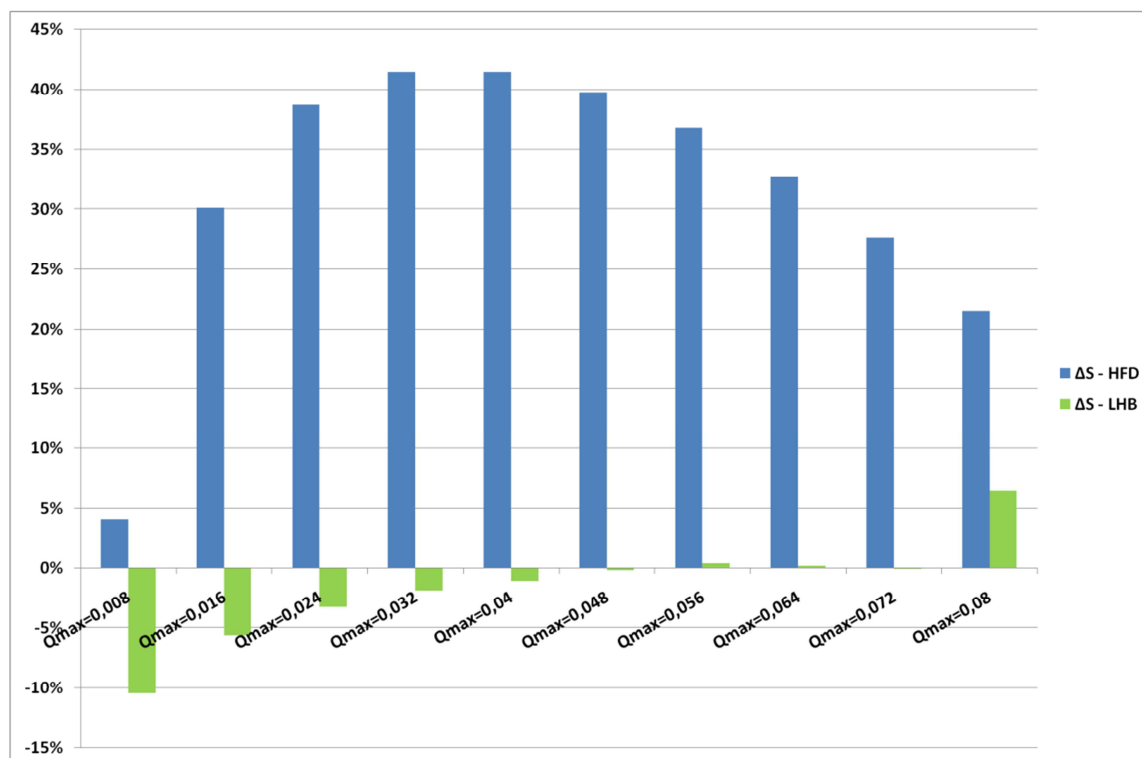
**Obr.26:** Hodnoty transpiračního proudu v radiálním směru (*Olea europaea*;  $\lambda = 0,3 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ;  $Q_{wmax} = 0,04 \text{ kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ).

Zde (Obr.27) vidíme, že obě metody opisují tvar křivky spíše přibližně, metoda HFD (modrá) zde v celkovém součtu vychází lépe než metoda LHB (zelená).



**Obr.27:** Hodnoty transpiračního proudu v radiálním směru (*Olea europaea*;  $\lambda = 0,3 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ;  $Q_{wmax} = 0,008 \text{ kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ).

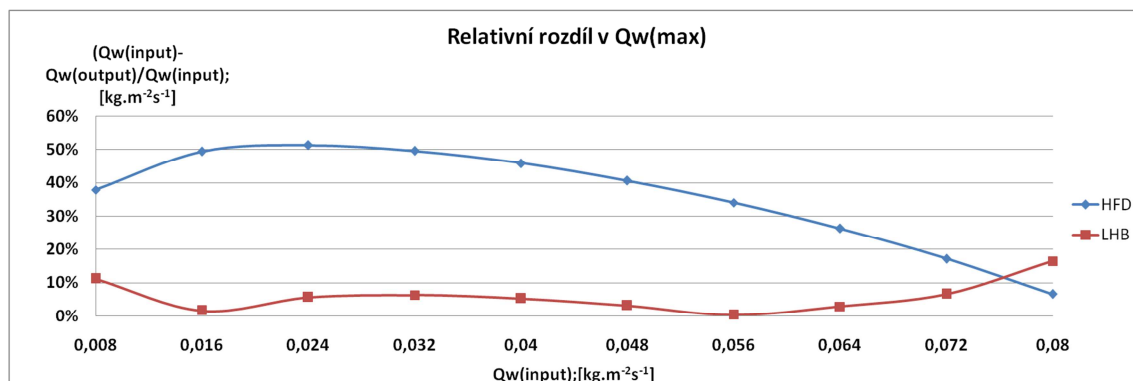
V tomto sloupcovém grafu (Obr.28) můžeme vidět porovnání celkových rozdílů obsahu ploch pod křivkami  $\Delta S_{HFD}$  a  $\Delta S_{LHB}$  pro jednotlivé rychlosti. Z grafu je patrné, že při koeficientu vodivosti  $\lambda = 0,3 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$  jsou výsledky metody LHB lepší než u metody HFD. Metoda HFD zde vychází lépe pouze při  $Q_w = 0,008 \text{ kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Je dobré brát v potaz, že se jedná o nízký tok, který je u LHB problematický.



**Obr.**

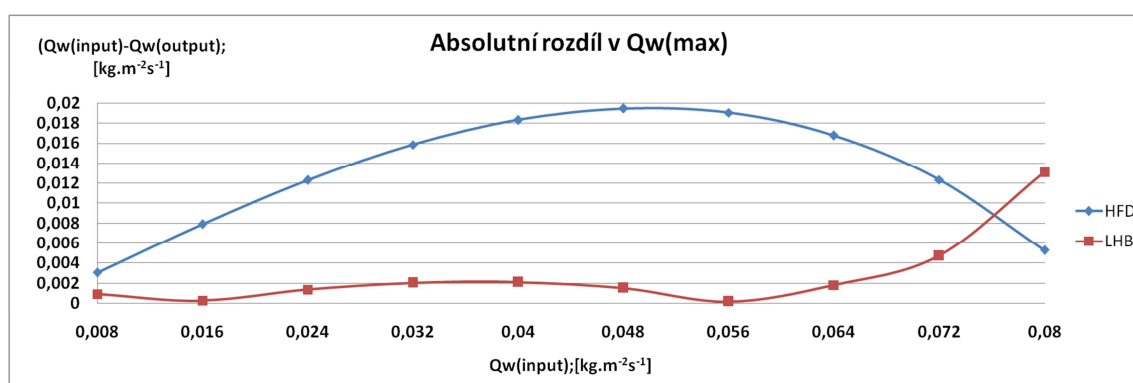
**28:** Sloupcový graf relativních odchylek celkového proudění  $\Delta S_{HFD}$   $\Delta S_{LHB}$  při rychlostech  $Q_{wmax} = 0,008$  až  $0,08 \text{ kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ .

Zde na tomto grafu (Obr.29) vidíme relativní rozdíl v místě bodu nejvyššího průtoku v radiálním směru křivky. Z grafu můžeme vyčíst, že tento rozdíl u metody LHB (červená) nedosahuje ani 20% a kromě rychlostí 0,08 a 0,008  $\text{cm}^3\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  se drží pod 10%. Zato u metody HFD přesahuje u rychlosti 0,024  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$  až 50%, na obě strany pak pozvolně klesá, u rychlosti 0,08  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$  je odchylka cca poloviční než u LHB.



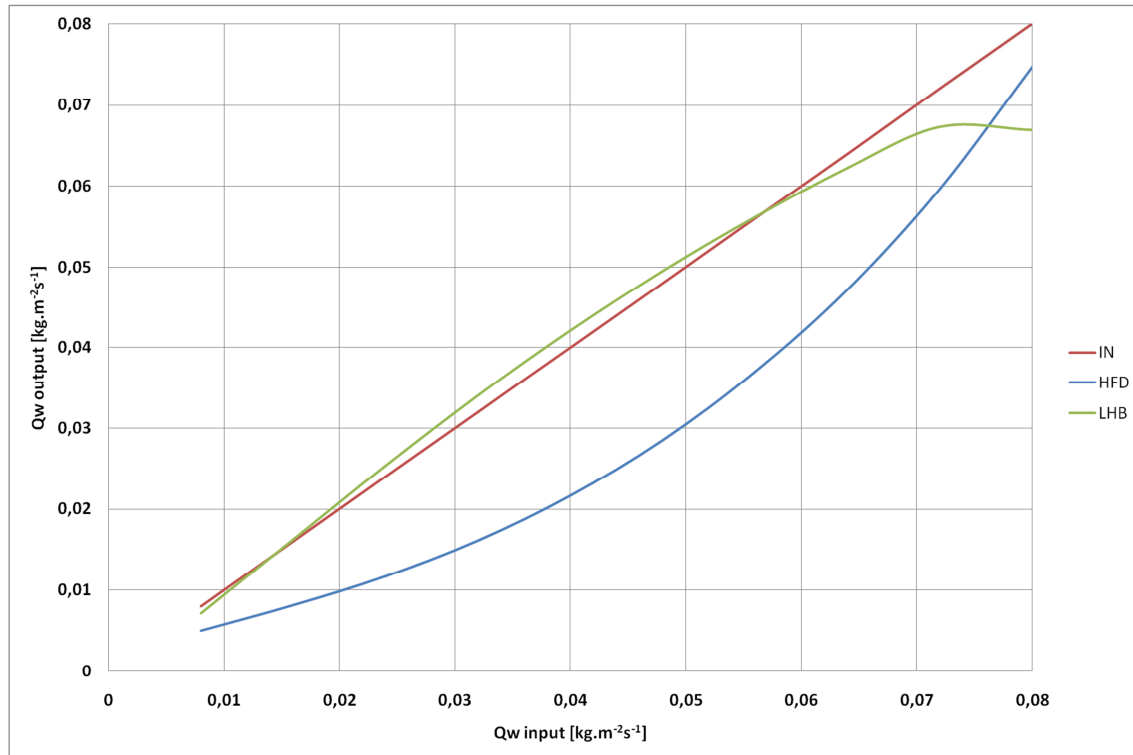
**Obr.29:** Relativní rozdíl v místě bodu nejvyššího průtoku v radiálním směru kmene. (*Olea europaea*;  $\lambda = 0,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ )

Zde (Obr.30) vidíme absolutní rozdíl v místě bodu nejvyššího průtoku v radiálním směru křivky. Z grafu plyne, že tento rozdíl u metody LHB (červená) je až na rychlosti vyšší než 0,072  $\text{m}^3\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$  příznivější než u metody HFD (modrá), tento rozdíl se s narůstající rychlostí až do  $Q_w = 0,064 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$  nijak výrazně nemění, pak však začíná růst a dosahuje až 0,01310  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Metoda HFD dosahuje nejvyšších rozdílů u středních rychlostí a to až 0,01946  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ . U  $Q_w = 0,08 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$  má však metoda HFD odchylku přibližně poloviční než LHB.



**Obr.30:** Absolutní rozdíl v místě bodu nejvyššího průtoku v radiálním směru kmene. (*Olea europaea*;  $\lambda = 0,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ )

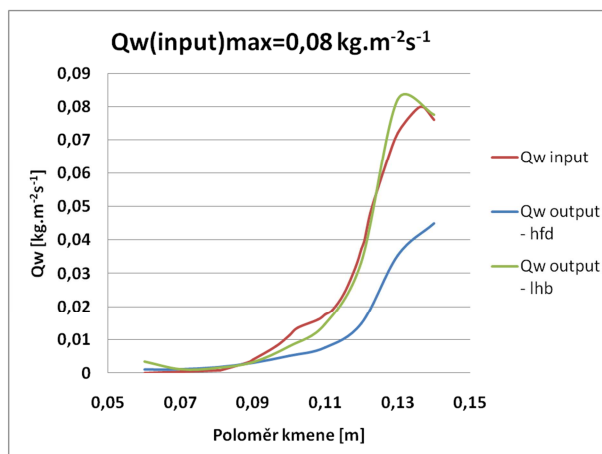
U tohoto grafu (Obr.31) se jedná o grafický přehled vstupu a výstupů, kde na ose x jsou hodnoty vstupů a na ose y hodnoty výstupů. Metoda LHB (zelená) tu až po  $0,064 \text{ kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$  opisuje nasimulovanou křivku jen s minimální odchylkou, pak ji začíná podhodnocovat a u  $0,072 \text{ kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$  se od ní začíná výrazněji odklánět. U rychlosti  $0,08 \text{ kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$  nám už přesnější výsledky dává metoda HFD (modrá).



**Obr.31:** Graf srovnání vstupu a výstupů (output : input) jednotlivých metod. (*Olea europaea*  $\lambda=0,3 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )

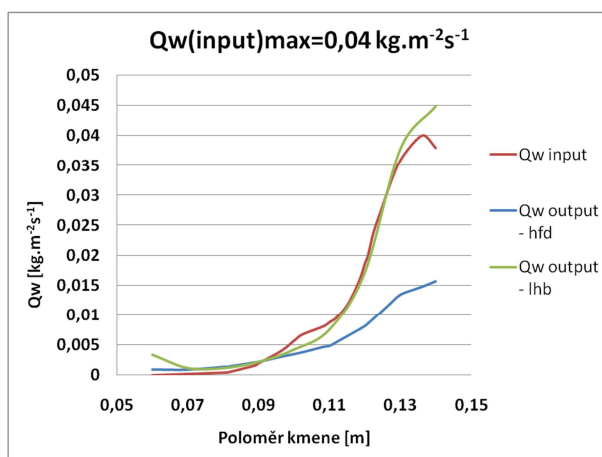
#### 6.4 Olivovník evropský – *Olea europaea*; $\lambda=0,4 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Na Obr.32 můžeme pozorovat, že metoda LHB (zelená) kopíruje křivku úspěšněji, než metoda HFD(modrá), i přestože v místě největšího průtoku ji nadhodnocuje. Metoda HFD zde nasimulovaný model (červená) podhodnocuje. Graf připomíná předcházející graf pro poloviční rychlost a  $\lambda=0,3 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .



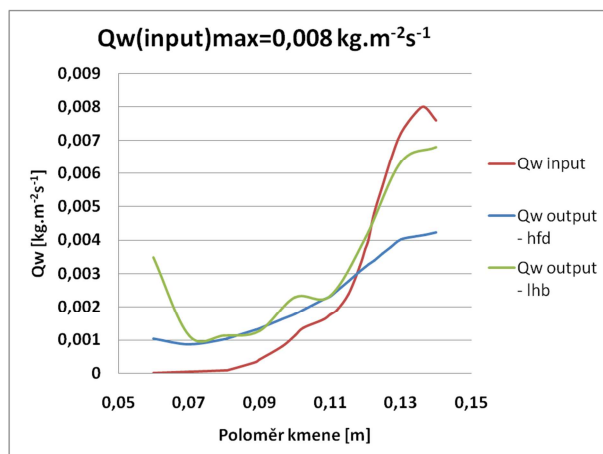
**Obr.32:** Hodnoty transpiračního proudu v radiálním směru (*Olea europaea*;  $\lambda = 0,4 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ;  $Q_{wmax} = 0,08 \text{ kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ).

Na tomto grafu (Obr.33) můžeme vidět, že metoda LHB (zelená) úspěšně kopíruje křivku, v bodě největšího průtoku ji však již nadhodnocuje. Metoda HFD(modrá), opisuje tvar jen přibližně, navíc model podhodnocuje.



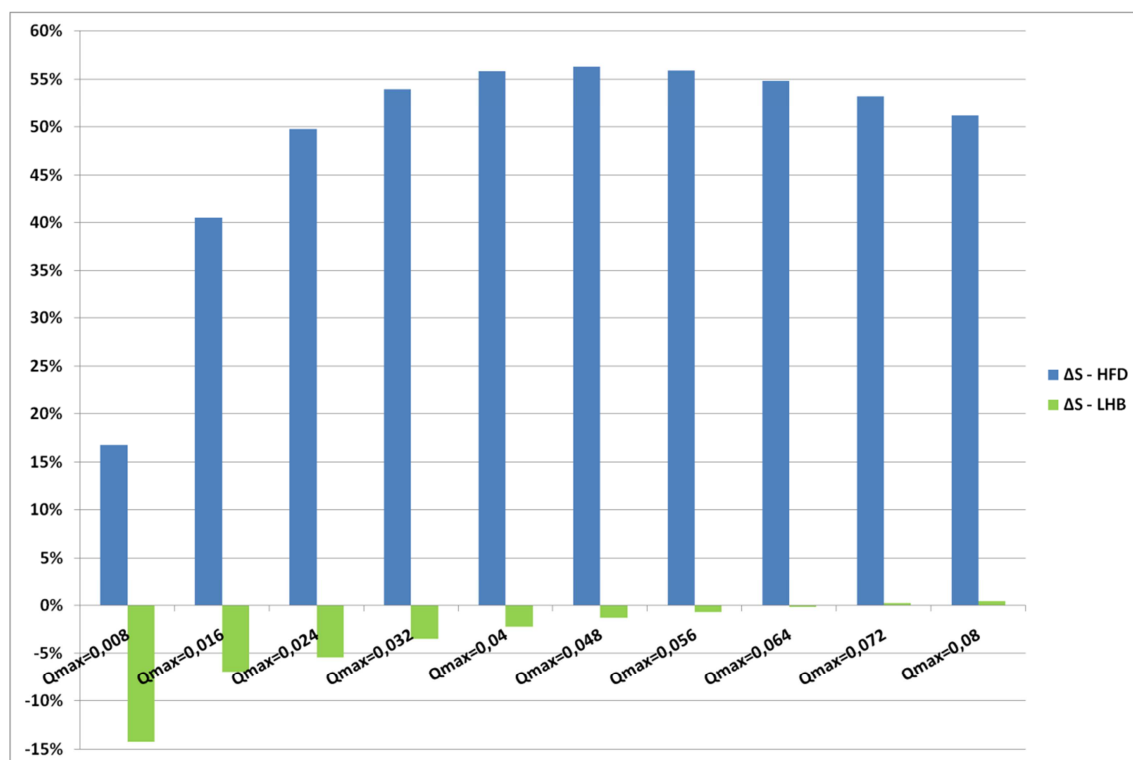
**Obr.33:** Hodnoty transpiračního proudu v radiálním směru (*Olea europaea*;  $\lambda = 0,4 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ;  $Q_{wmax} = 0,04 \text{ kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ).

U tohoto grafu (Obr.34) je patrné, že křivky jak LHB (zelená) tak i HFD (modrá) opisují nasimulovaný radiální profil jen přibližně, obě jej jak nadhodnocují, tak podhodnocují, metoda LHB i zde v celkovém součtu vychází přece jen o něco lépe než HFD.



**Obr.34:** Hodnoty transpiračního proudu v radiálním směru (*Olea europaea*;  $\lambda = 0,4 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ;  $Q_{wmax} = 0,008 \text{ kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ).

V tomto grafu (Obr.35) můžeme opět vidět porovnání celkových rozdílů obsahu ploch pod křivkami  $\Delta S_{HFD}$  a  $\Delta S_{LHB}$  pro jednotlivé rychlosti. Z grafu je patrné, že při koeficientu vodivosti  $\lambda = 0,4 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$  jsou výsledky metody LHB velmi příznivé, u nižších rychlostí spíše nadhodnocují. U metody HFD jsou tyto odchylky výraznější.

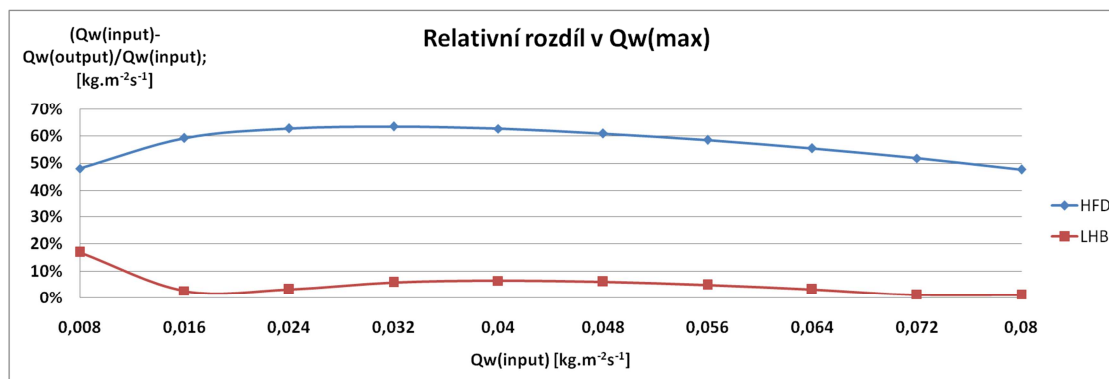


**Obr.**

**35:** Sloupcový graf relativních odchylek celkového proudění  $\Delta S_{HFD}$  a  $\Delta S_{LHB}$  při rychlostech  $Q_{wmax} = 0,008$  až  $0,08 \text{ kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ .

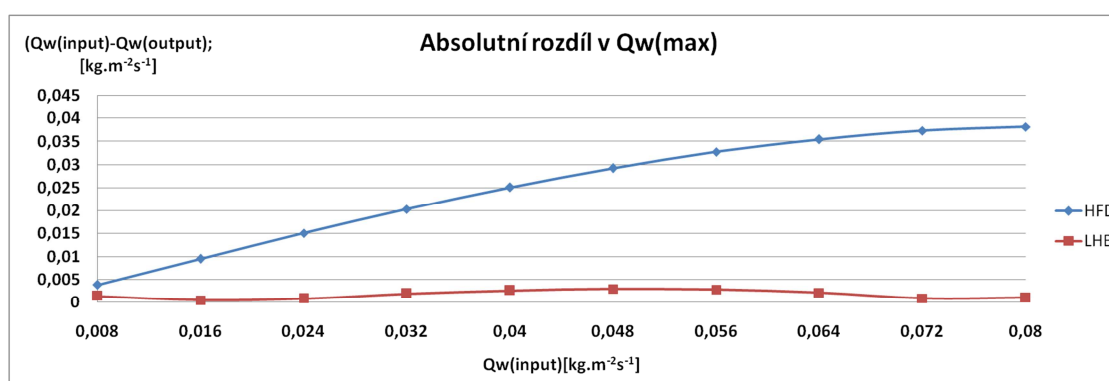


Zde na tomto grafu (Obr.36) vidíme relativní rozdíl v místě bodu nejvyššího průtoku v radiálním směru křivky. Z grafu můžeme vyčíst, že tento rozdíl u metody LHB (červená) dosahuje maximálně 20% a to pouze u rychlosti  $0,008 \text{ kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , poté klesá a nepřesahuje 10%. U metody HFD (modrá) je nejmenší relativní rozdíl lehce pod 50% a maximální se pohybuje okolo 65%.



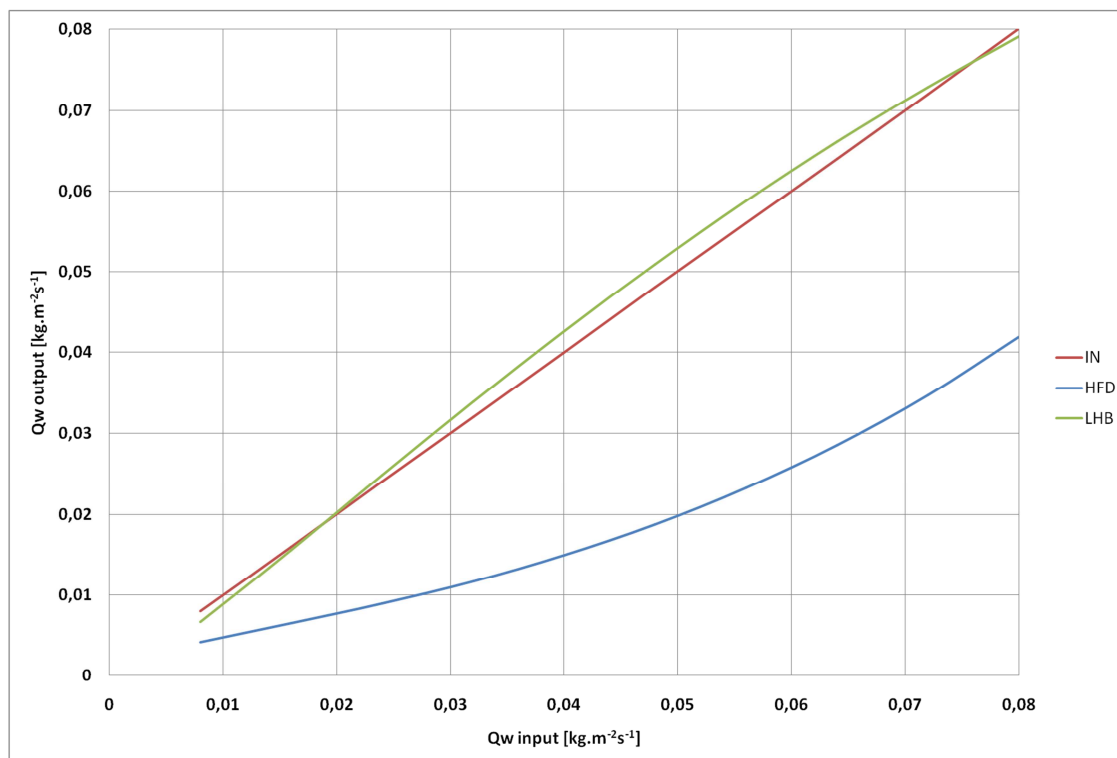
**Obr.36:** Relativní rozdíl v místě bodu nejvyššího průtoku v radiálním směru kmene. (*Olea europaea*;  $\lambda = 0,4 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ )

Zde na Obr.37 vidíme absolutní rozdíl v místě bodu nejvyššího průtoku v radiálním směru křivky. Z grafu jasně plyne, že tento rozdíl u metody LHB (červená) nikde nepřesahuje hodnotu  $0,005 \text{ kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ . U metody HFD (modrá) tento rozdíl se s narůstající rychlostí narůstá až do  $0,03816 \text{ kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ .



**Obr.37:** Absolutní rozdíl v místě bodu nejvyššího průtoku v radiálním směru kmene. (*Olea europaea*;  $\lambda = 0,4 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ )

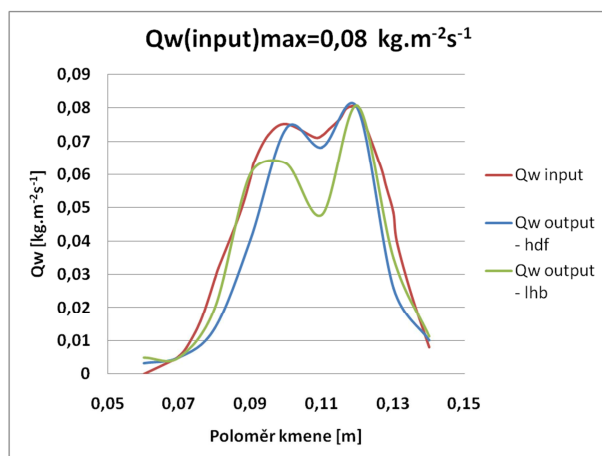
U tohoto grafu (Obr.38) se jedná o grafický přehled vstupu a výstupů, kde na ose x jsou hodnoty vstupu a na ose y hodnoty výstupů. Metoda LHB (zelená) tu v tomto případě vychází nejlépe ze všech provedených měření, nedochází zde k žádným výrazným odklonům. Metoda HFD (modrá), se zde naopak od nasimulovaných dat poměrně odchyluje.



**Obr.38:** Graf srovnání vstupu a výstupů (output : input) jednotlivých metod. (*Olea europaea*  $\lambda=0,4 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )

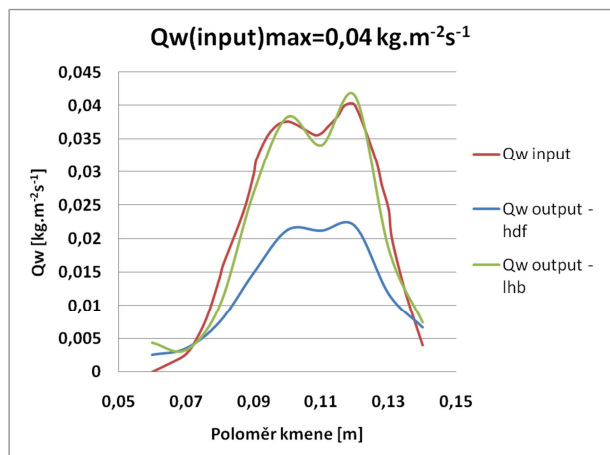
### 6.5 Topol středoamerický - *Populusinteramericana*; $\lambda=0,3 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Zde na Obr. 39 můžeme vidět, že nasimulovanou křivku (červená) v radiálním směru velice dobře opisuje metoda HFD(modrá), metoda LHB(zelená) ji opisuje spíše přibližně, ve výsledku však rozdíl v bodě nejvyššího průtoku je minimální a v součtu celkových odchylek vychází metoda LHB o něco málo lépe.



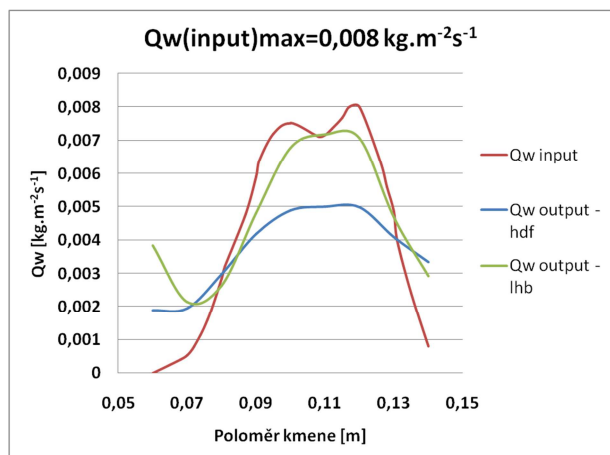
**Obr.39:** Hodnoty transpiračního proudu v radiálním směru (*Populusinteramericana*;  $\lambda=0,3 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ;  $Q_{wmax}=0,08 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ).

Na rozdíl od předchozího obrázku, na tomto grafu (Obr.40) nasimulovaný radiální profil velmi dobře opisuje metoda LHB (zelená) a metoda HFD (modrá) jej opisuje jen přibližně a také ji i podhodnocuje.



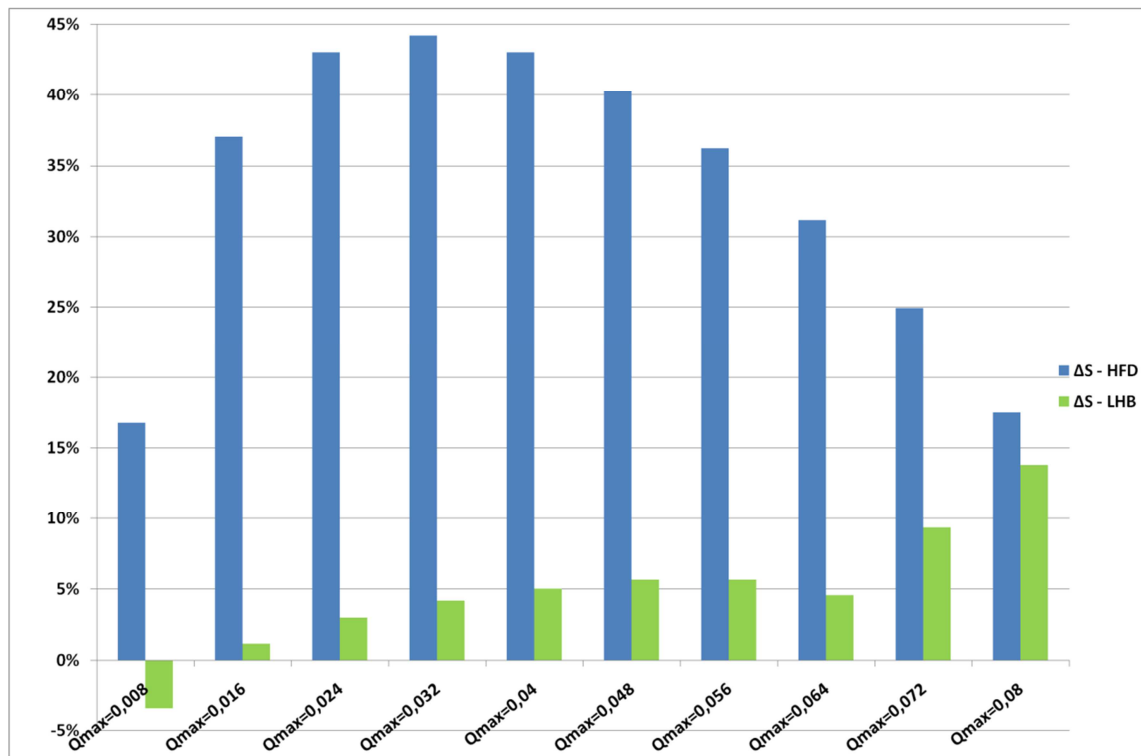
**Obr.40:** Hodnoty transpiračního proudu v radiálním směru (*Populusinteramericana*;  $\lambda = 0,3 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ;  $Q_{wmax} = 0,04 \text{ kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ).

V tomto případě Obr.41 vypovídá o tom, že při nízké rychlosti obě metody opisují nasimulovanou křivku jen přibližně, přičemž metoda HFD (modrá) ji podhodnocuje o něco málo více než metoda LHB (zelená).



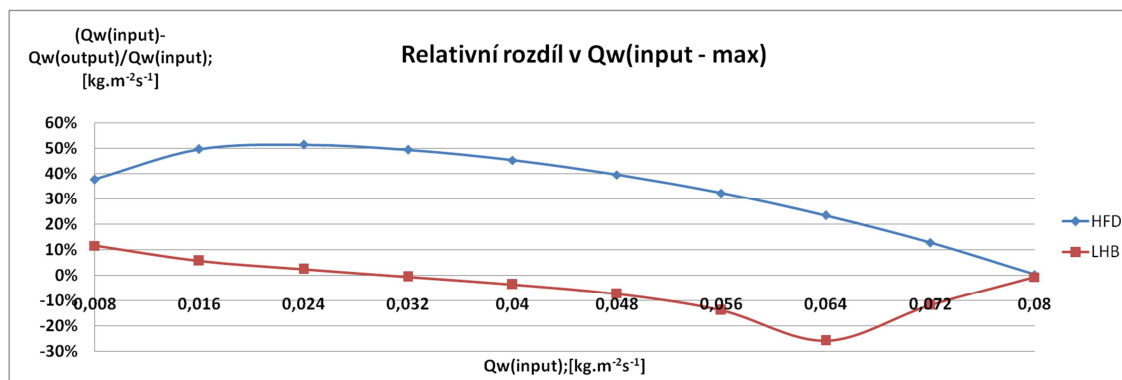
**Obr.41:** Hodnoty transpiračního proudu v radiálním směru (*Populusinteramericana*;  $\lambda = 0,3 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ;  $Q_{wmax} = 0,008 \text{ kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ).

V tomto grafu (Obr. 42) můžeme opět vidět porovnání celkových rozdílů obsahu ploch pod křivkami  $\Delta S_{\text{HFD}}$  a  $\Delta S_{\text{LHB}}$  pro jednotlivé rychlosti. Z grafu je patrné, že při koeficientu vodivosti  $\lambda=0,3 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$  jsou výsledky metody LHB podstatně příznivější než u metody HFD.



**Obr.42:** Sloupcový graf relativních odchylek celkového proudění  $\Delta SHFD$  a  $\Delta SLHB$  při rychlostech  $Q_{wmax} = 0,008$  až  $0,08 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ .

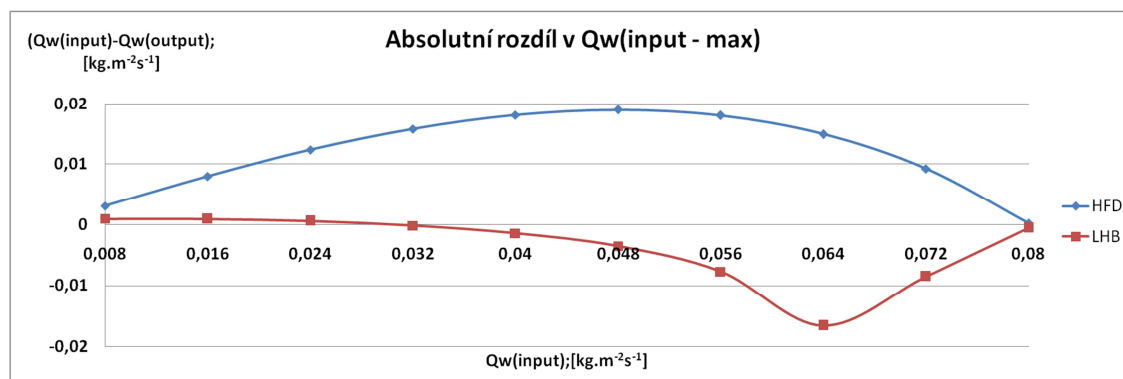
Tento graf (Obr.43) uvádí hodnoty relativního rozdílu v místě bodu nejvyššího průtoku v radiálním směru křivky. U metody LHB (červená) se pohybují od přibližně -25 % do +10%, přičemž větší odchylka je pouze u rychlosti  $0,064 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . U metody HFD (modrá) dosahuje až 50%, nejmenší odchylka vzniká u rychlosti  $Q_w = 0,08 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ .



**Obr.43:** Relativní rozdíl v místě bodu nejvyššího průtoku v radiálním směru kmene. (*Populusinteramericana*;  $\lambda = 0,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )

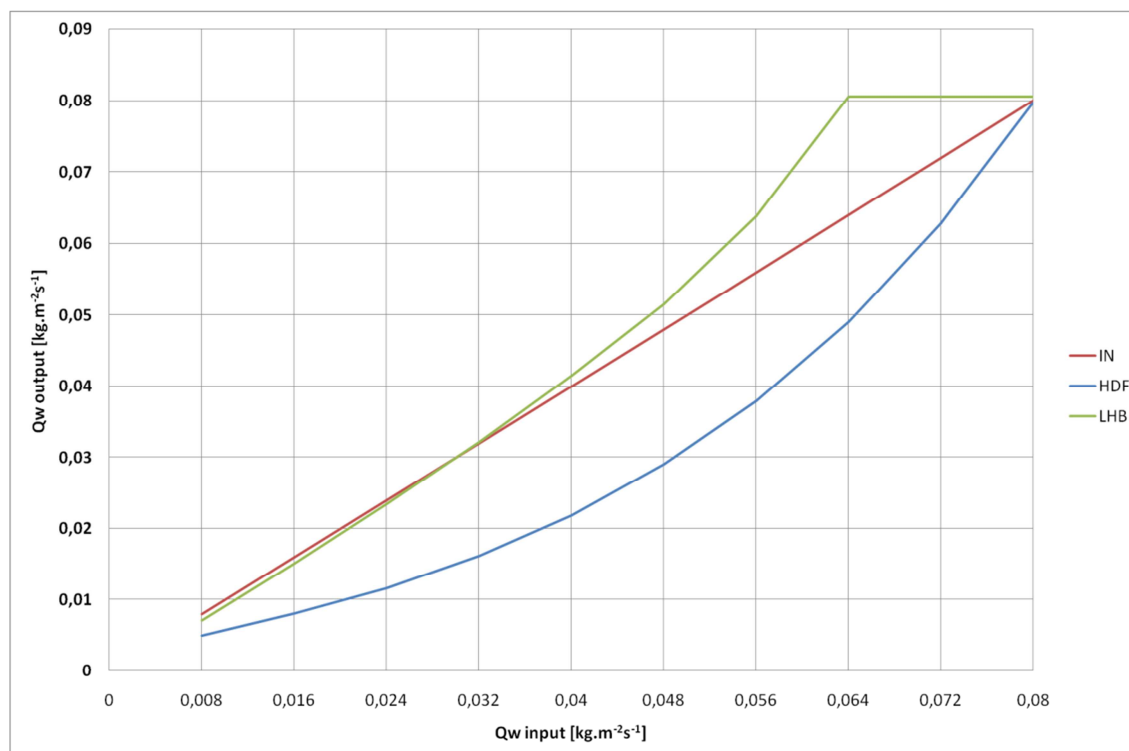
Zde na Obr.44 vidíme absolutní rozdíl v místě bodu nejvyššího průtoku v radiálním profilu. Z grafu je patrné, že tento rozdíl se u metody LHB (červená) je až na rychlosti  $0,064 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  pohybuje do -10% (záporné čísla značí nadhodnocení). U rychlosti  $0,064 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  dosahuje

rozdíl hodnoty  $-0,01658 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . Metoda HFD (modrá), dosahuje rozdílu až  $0,01897 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  a to u rychlosti  $Q_w=0,048 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , na obě strany se rozdíl snižuje a u hodnot  $0,08$  a  $0,008 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  je prakticky minimální.



**Obr.44:** Absolutní rozdíl v místě bodu nejvyššího průtoku v radiálním směru kmene. (*Populusinteramericana*;  $\lambda = 0,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )

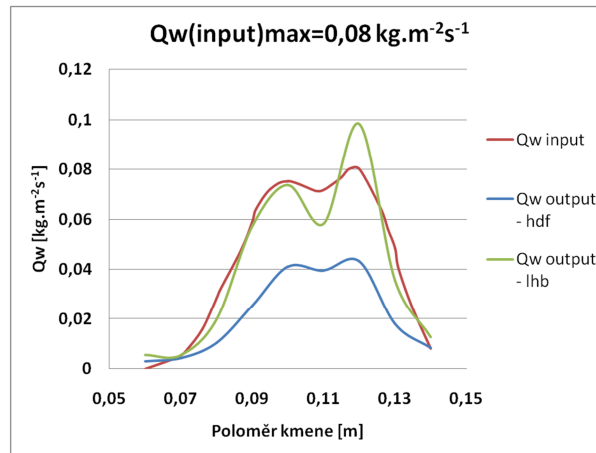
U tohoto grafu (Obr.45) se jedná o grafický přehled vstupu a výstupů, kde na ose x jsou hodnoty vstupu a na ose y hodnoty výstupů. Metoda LHB (zelená) zde při většině rychlostí své výsledky nadhodnocuje. Největší odchylka je tu při  $Q_w=0,064 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . Metoda HFD (modrá) tu až na rychlosti  $0,08$  a  $0,008 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  výsledky více či méně podhodnocuje.



**Obr.45:** Graf srovnání vstupu a výstupů (output : input) jednotlivých metod. (*Populusinteramericana*,  $\lambda=0,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )

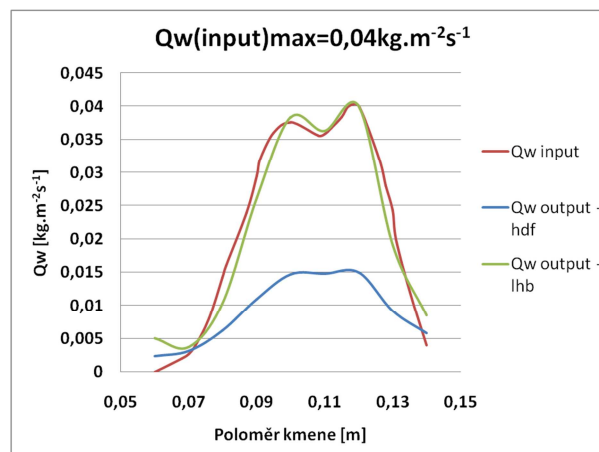
## 6.6 Topol středoamerický - *Populusinteramericana*; $\lambda=0,4 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Na Obr.46 vidíme, že obě metody HFD i LHB opisují nasimulovanou křivku spíše přibližně – metoda HFD(modrá) se jejímu tvaru přibližuje lépe, skoro o polovinu ji však podhodnocuje. Metoda LHB ji zase v bodě nejvyššího průtoku citelně nadhodnocuje a naopak v „sedle“ mezi dvěma vrcholy zase podhodnocuje.



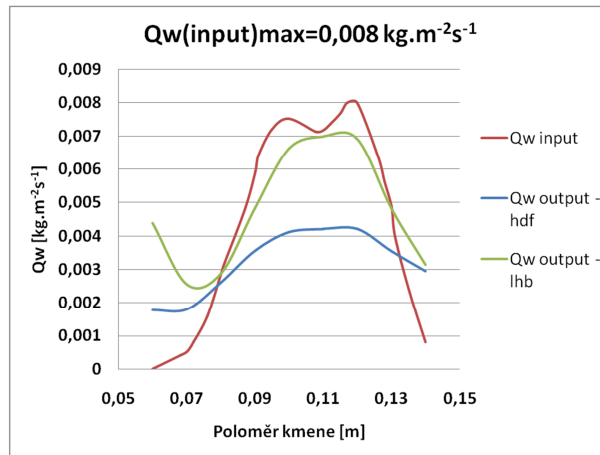
**Obr.46:** Hodnoty transpiračního proudu v radiálním směru (*Populusinteramericana*;  $\lambda= 0,4 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ;  $Q_{wmax}= 0,08 \text{ kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ).

Zde (Obr.47) můžeme vidět, že metoda LHB(zelená) opisuje nasimulovanou křivku (červená) velmi zdařile, zatímco metoda HFD (modrá) jen přibližně a navíc ji více než o polovinu podhodnocuje.



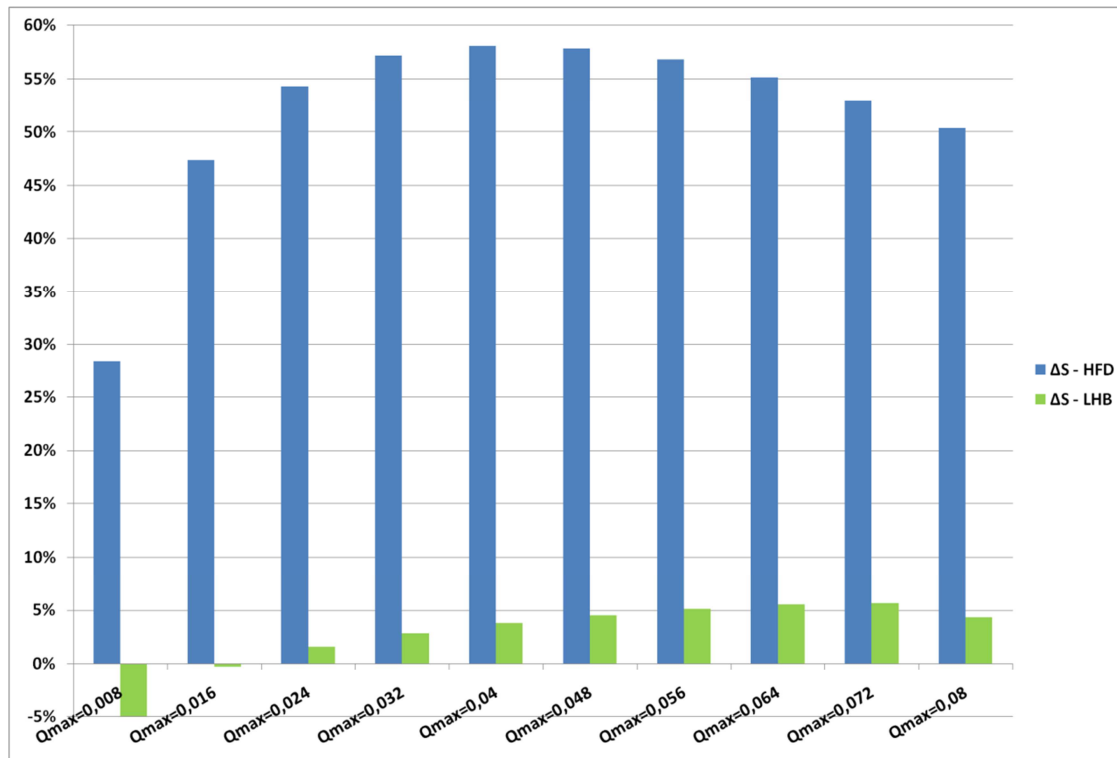
**Obr.47:** Hodnoty transpiračního proudu v radiálním směru (*Populusinteramericana*;  $\lambda= 0,4 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ;  $Q_{wmax}= 0,04 \text{ kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ).

Tento graf (Obr.48) nám ukazuje, že obě metody opis tvaru nasimulované křivky v radiálním směru zvládají spíše přibližně. Metoda LHB (zelná) ji opisuje o něco lépe než metoda HFD (modrá).



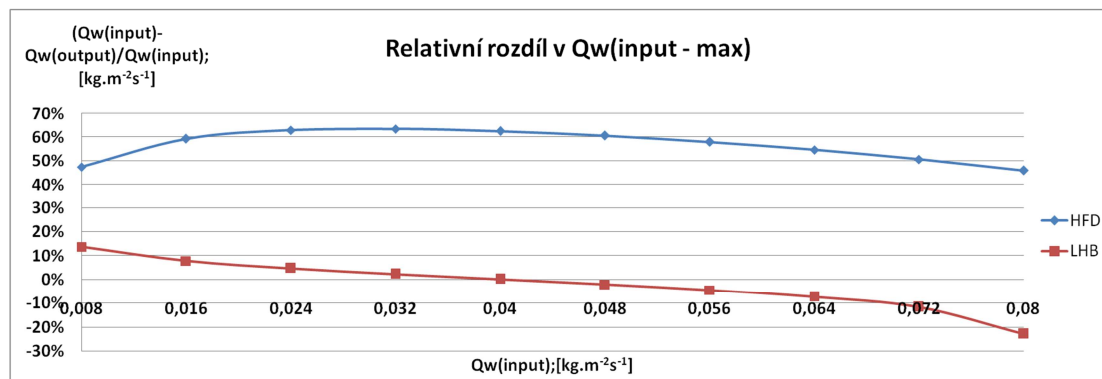
**Obr.48:** Hodnoty transpiračního proudu v radiálním směru (*Populus interamericana*;  $\lambda = 0,4 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ;  $Q_{wmax} = 0,008 \text{ kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ).

Tento sloupcový graf (Obr.49) nám ukazuje porovnání celkových rozdílů obsahu ploch pod křivkami  $\Delta S_{HFD}$  a  $\Delta S_{LHB}$  pro jednotlivé rychlosti. V grafu je patrné, že při koeficientu vodivosti  $\lambda = 0,4 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$  jsou výrazné rozdíly mezi metodami LHB a HFD.



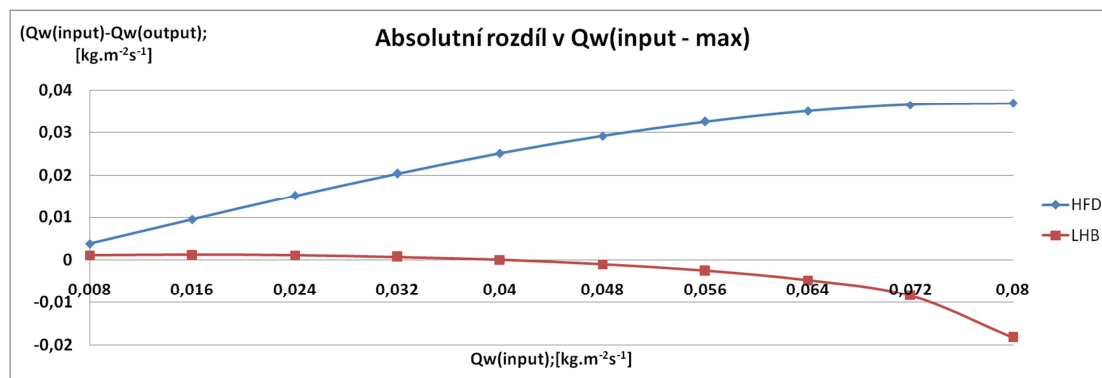
**Obr.49:** Sloupcový graf relativních odchylek celkového proudění  $\Delta S_{HFD}$   $\Delta S_{LHB}$  při rychlostech  $Q_{wmax} = 0,008$  až  $0,08 \text{ kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ .

Na tomto grafu (Obr.50) vidíme relativní rozdíl v místě bodu nejvyššího průtoku v radiálním směru křivky. Metoda LHB má relativní rozdíl v bodě nejvyššího průtoku v rozmezí od 14% po -23%, u metody HFD se tyto procentuální rozdíly pohybují v rozmezí 46% až 64%.



**Obr.50:** Relativní rozdíl v místě bodu nejvyššího průtoku v radiálním směru kmene. (*Populusinteramericana*;  $\lambda = 0,4 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ )

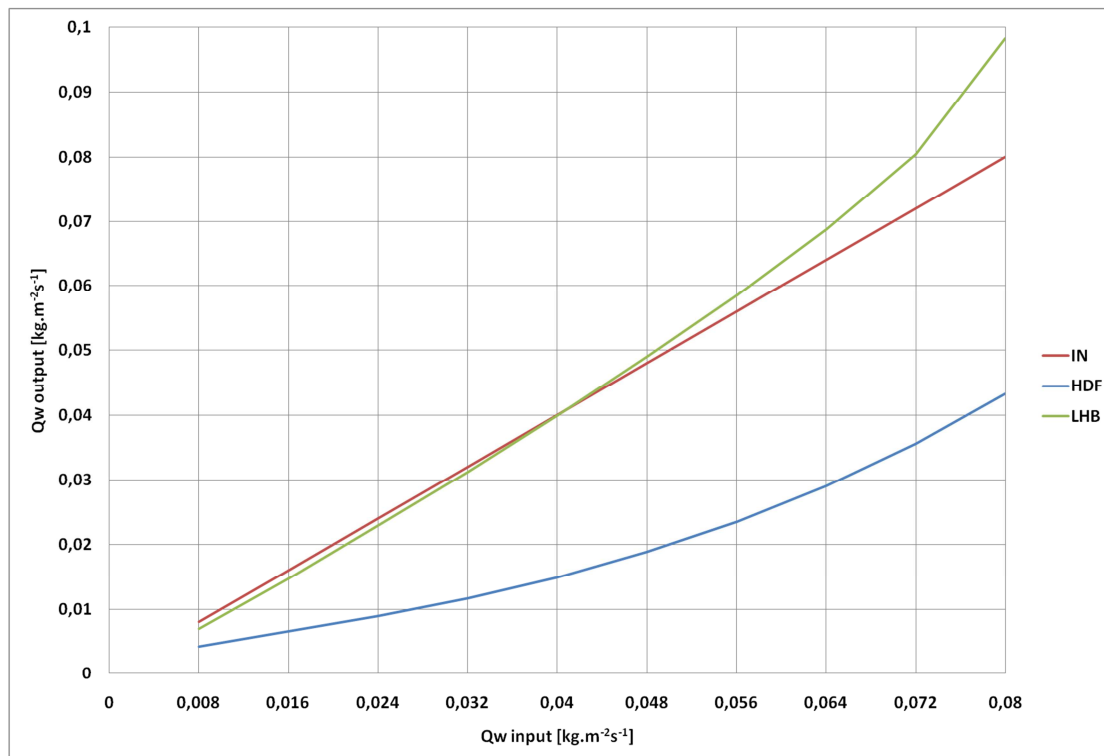
Zde na Obr.51 se jedná o absolutní rozdíl v místě bodu nejvyššího průtoku v radiálním směru křivky. U metody LHB klesá s narůstající rychlostí od hodnoty 0,001099 po -0,01828 kg.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>, záporné hodnoty značí nadhodnocení. U metody HFD naopak s narůstající hodnotou narůstá a to od hodnot 0,003798 po 0,03678 kg.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>.



**Obr.51:** Absolutní rozdíl v místě bodu nejvyššího průtoku v radiálním směru kmene. (*Populusinteramericana*;  $\lambda = 0,4 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ )

U tohoto grafu (Obr.52) se jedná o grafický přehled vstupu a výstupů, kde na ose x jsou hodnoty vstupu a na ose y hodnoty výstupů. Metoda LHB (zelená) opisuje nasimulovanou křivku velmi věrně až po rychlost 0,048 kg.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>, pak ji začíná lehce nadhodnocovat. U metody HFD (modrá) tu dochází k podhodnocování.





**Obr.52:** Graf srovnání vstupu a výstupů (output : input) jednotlivých metod. (Populusinteramericana,  $\lambda=0,4 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )

## 7 Závěr

Po vypracování této práce, srovnání výsledků a vyhotovených grafů mohu prohlásit, že výsledky, které byly získány pomocí metody LHB jsou příznivější než výsledky, které udává metoda HFD. Je však důležité si uvědomit, že tyto výsledky jsou pouze na základě teoretického modelu. Aby bylo možné učinit konečné závěry, je zapotřebí tyto výpočty experimentálně ověřit, což není součástí této práce.

Po porovnání dřevin navzájem mezi sebou bylo zjištěno, že odchylky ve tvaru radiálního profilu mají u metody HFD pro daný teplotní koeficient velkou podobnost, ta se mění změnou koeficientu ( $\lambda=0,3$  a  $0,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ). Aritmetický průměr rozdílů plochy pod křivkou činí 42% (32% u koeficientu  $\lambda=0,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$  a 51% u  $\lambda=0,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ). Pouze u prvních dvou dřevin (*Cupressus arizonica* a *Olea europaea*) dosahuje metoda HFD, při nejvyšší rychlosti ( $Q_w=0,08 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) a koeficientu tepelné vodivosti  $\lambda=0,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$  lepších výsledků než metoda LHB. Pro obě metody dostáváme nejpříznivější hodnoty u křivky, která má pouze jeden vrchol a ten se nachází poblíž kambia (*Olea europaea*). Druhou je dvou-peaková křivka s vrcholy přibližně uprostřed a nižším průtokem poblíž kambia (*populus iteram*.) Nejméně příznivé výsledky vyšly u dvou-peakové křivky s vrcholy přibližně uprostřed a vyšším tokem při obvodu stromu (*cupressus arizonica*).

Výpočty metodou LHB vychází vždy, až na výše uvedené případy, příznivěji než u metody HFD. Na rozdíl od metody HFD nemají křivky odchylek napříč dřevinami tak výraznou podobnost a jsou tedy více variabilní. Ve vyšších rychlostech proudění, se ale vždy vyskytují vyšší odchylky než u nižších rychlostí. Při změně koeficientu tepelné vodivosti  $\lambda$  z  $0,3$  na  $0,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$  dostáváme výsledky dokonce přesnější. Nejideálnější opis je u dřeviny *Olea europaea* při  $\lambda = 0,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ . Aritmetický průměr rozdílů plochy pod křivkou činí 3% (6% u koeficientu  $\lambda=0,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$  a 0% u  $\lambda=0,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ).

Pokud by experimentální měření potvrdilo tuto analýzu, doporučil bych pro výpočty intenzity transpiračního proudu používat výpočetních vztahů metody LHB. Pouze pokud by se jednalo o dřeviny s vyšším prouděním lokalizovaným do blízkosti kambia,  $\lambda = 0,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$  a hodnotami proudění blízcí se  $Q_w=0,08 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , tak by bylo vhodnější využít metodu HFD.

## 8 Summary

After completion of this thesis I can say that the results obtained by the method LHB are better than the results obtained by the method HFD. However it is important to note that these results are based only on the theoretical model. In order to make definitive conclusions, it is necessary these calculations verify by experiments, those experiments are not part of this work.

The arithmetic average of the differences of the area under the HFD curve and INPUT was 42% (32% at  $\lambda = 0.3$  the coefficient  $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  and 51% at  $\lambda = 0.4 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ). Only the first two species (*Cupressus arizonica* and *Olea europaea*) reach method HFD, at the fastest rate ( $Q_w = 0.08 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) and the coefficient of thermal conductivity  $\lambda = 0.3 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  outperform Method LHB. Both methods get the best values if the curve has only one peak which is located near the cambium (*Olea europaea*). The second one is Two-peak curve with peaks around the middle and lower flow near the cambium (*populus iterate*). The least favourable results are got for the two-peak curve with peaks around the middle and higher flow near the cambium (*Cupressus arizonica*).

Calculations based on LHB are always more favourably than HFD apart from the above mentioned causes. When we change the coefficient of thermal conductivity  $\lambda$  from  $0.3 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  to  $0.4 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  it brings even more accurate results. We get the most accurate copy of curve by *Olea europaea* at  $\lambda = 0.4 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ . The arithmetic average of the differences of the area under the LHB curve and INPUT raises 3% (6% for coefficient  $\lambda = 0.3 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ , and 0% at  $\lambda = 0.4 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ).

If the experimental measurement confirms this analysis, I can recommend LHB method for calculating the intensity of sap flow. Only if there were trees with higher flow localized near the cambium,  $\lambda = 0.3 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  values and flow approaching  $Q_w = 0.08 \text{ kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , it would be more appropriate to use the method HFD.

## 9 Seznam použité literatury

COMSTOCK, GL *Directional permeability of softwoods*. Wood Fiber 1:283-289, 1970

ČERMÁK, J., KUČERA, J. *Scaling up transpiration data between trees, stands and watersheds*, Silva Carelica 15 (1990a) 101-120.

ČERMÁK, J., KUČERA, J. *Transpiration, its limiting factors and hydrologically important biometric parameters of forest tree species (in Czech)*, in: Proc. Československý Príspevok Do MHP-UNESCO 1985-89", CSFR, Modra u Bratislavy, 1990b, p. 10. Sept. 11-13. 1989.

ČERMÁK, J., NADĚŽDINA, N., CEULEMANS, R. *Radial pattern of sap flow in wood systems related to positioning of sensors and scaling errors in dominant and understorey species*. *Tree Physiology*. 2002. sv. 22, č. 1, s. 907--918. ISSN 0829-318X.

ČERMÁK, J., NADĚŽDINA, N. 1998. *Sapwood as the scaling parameter - defining according to xylem water content or radial pattern of sap flow?* *Annals of Forest Science* 55: 509-521.

ČERMÁK, J., NADĚŽDINA, N., KUČERA, J. *Sap flow measurements with two thermodynamic methods, flow integration within trees and scaling up from sample trees to entire forest stands*. *Trees - Structure and Function*. 2004. sv. 18, č. 1, s. 529--546. ISSN 0931-1890.

ČERMÁK, J., NADĚŽDINA, N., KUČERA, J. *Sap flow measurements with two thermodynamic methods, flow integration within trees and scaling up from sample trees to entire forest stands*. *Trees - Structure and Function*. 2004. sv. 18, č. 1, s. 529--546. ISSN 0931-1890

ČERMÁK, J., NADĚŽDINA, N., RASCHI, A., TOGNETTI, R. (1998) *Sap flow in Quercus pubescens and Q. cerris stands in Italy*. In: Čermák, J., Naděždina, N. (eds) *Measuring sap flow in intact plants*. Proceedings of 4th International Workshop, Židlochovice, Czech Republic, IUFRO Publ. Mendel University, Brno, Czech Republic, pp 134-141

HORÁČEK, P. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I.* 2. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2008. 124 s. ISBN 978-80-7375-169-2.

HUBER, B. (1932) *Beobachtung und Messung pflanzlicher Saftströme*. Ber Dtsch Bot Ges 50:89–109

MACLEAN, J. D. *Thermal conductivity of wood*, Heat Pipe Air Cond. 13 (1941) 380e391.

NADĚŽDINA, N., ČERMÁK, J., CEULEMANS, R. (2002a) *Radial patterns of sap flow in wood systems of dominant and understory species: scaling errors associated with positioning of sensors*. *Tree Physiology* 22:907–918

NADĚŽDINA, N., ČERMÁK, J., CEULEMANS, R. *Radial patterns of sap flow in wood systems of dominant and understory species: scaling errors associated with positioning of sensors*. *Tree Physiology*. 2002. sv. 22, č. 13, s. 907–918. ISSN 0829-318X.

NADĚŽDINA, N., ČERMÁK, J., MORALES, D., JIMENEZ, M. S., RASCHI, A., TOGNETTI, R., FERREIRA, M. J. (2001) *Variations in conducting patterns of trees growing in three Mediterranean countries and relations to crown development*. In: Radoglu, K. (ed) *Forest research: a challenge for an integrated European approach*. Proceedings of the International Conference. Thessaloniki, Greece, pp 507–512

NADĚŽDINA, N., ČERMÁK, J., TRIBUTSCH, H. (2002b) *Heat field around the linear heater used for sap flow measurement by the HFD method as observed by the infra-red camera*. In: Tognetti, R., Raschi, A. (eds) *Proceedings of 5th International Workshop on Measuring Sap Flow in Intact Plants*, Firenze, Italy, 9–10, Nov 2000, pp 155–162

NADĚŽDINA, N., VANDEGEHUCHTE, M. W., STEPPE, K. *Sap flow measurements based on Heat Field Deformation method*. *Trees - Structure and Function*. 2012. sv. 26, č. 5, s. 1439–1448. ISSN 0931-1890.

NIEMZ, P. *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. DRW Verlag 1993

POLYANIN, A. D. 2002. *Handbook of linear partial differential equations for engineers and scientists*. Boca Raton–London: Chapman & Hall/CRC Press. ISBN 1584882999.

POŽGAJ, A., CHOVANEC, D., KURJATKO, S., BABIAK, M. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 1. vyd. Bratislava: Príroda, 1993. 485 s. ISBN 80-07-00600-1.

REGINÁČ, L., BABIAK, M., BENIČÁK, J., DUBOVSKÝ, J., KURJATKO, S., LADOMERSKÝ, J., MAKOVÍNY, I., POŽGAJ, A. *Náuka o dreve 2*, VŠLD 1990, ISBN 8022800627, 9788022800624 s.424 Vydání 5.

SIAU, J.F. *Transport Processes in Wood*. Berlin: Springer-Verlag, 1984. 245 s. ISBN 3-504-12574-4.

SIAU, J.F. *Flow in Wood*. Syracuse University Press, Syracuse, NY, 1971.

SIAU, J.F. *Wood. Influence of Moisture on Physical Properties*, Virginia Polytechnic Institute and State University, NY, 1995.

STEPPE, K., DE PAUW, D., SAVEYN, A., TAHON, P., NADĚŽDINA, N., ČERMÁK, J., LEMEUR, R. *Radial sap flux profiles and beyond: a easy software analysis tool*. *Acta Horticulturae*. 2009. sv. 846, č. 1, s. 85--92. ISSN 0567-7572.

TRCALA, M., ČERMÁK, J. 2014. *Nonlinear finite element analysis of thermal inertia in heat balance sap flow measurement*. *International Journal of Thermal Sciences* 76:200-207.

TRCALA, M., ČERMÁK, J. *Nonlinear finite element analysis of thermal inertia in heat balance sap flow measurement*. *International Journal of Thermal Sciences*. 2014. sv. 76, č. Feb 2014, s. 200--207. ISSN 1290-0729.

TRCALA, M., ČERMÁK, J., *A new heat balance equation for sap flow calculation during continuous linear heating in tree sapwood*; Department of Wood Science, Department of Forest Botany, Dendrology and Geobiocenology, Mendel University in Brno, Brno, Czech Republic *International Journal of Heat and Mass Transfer*

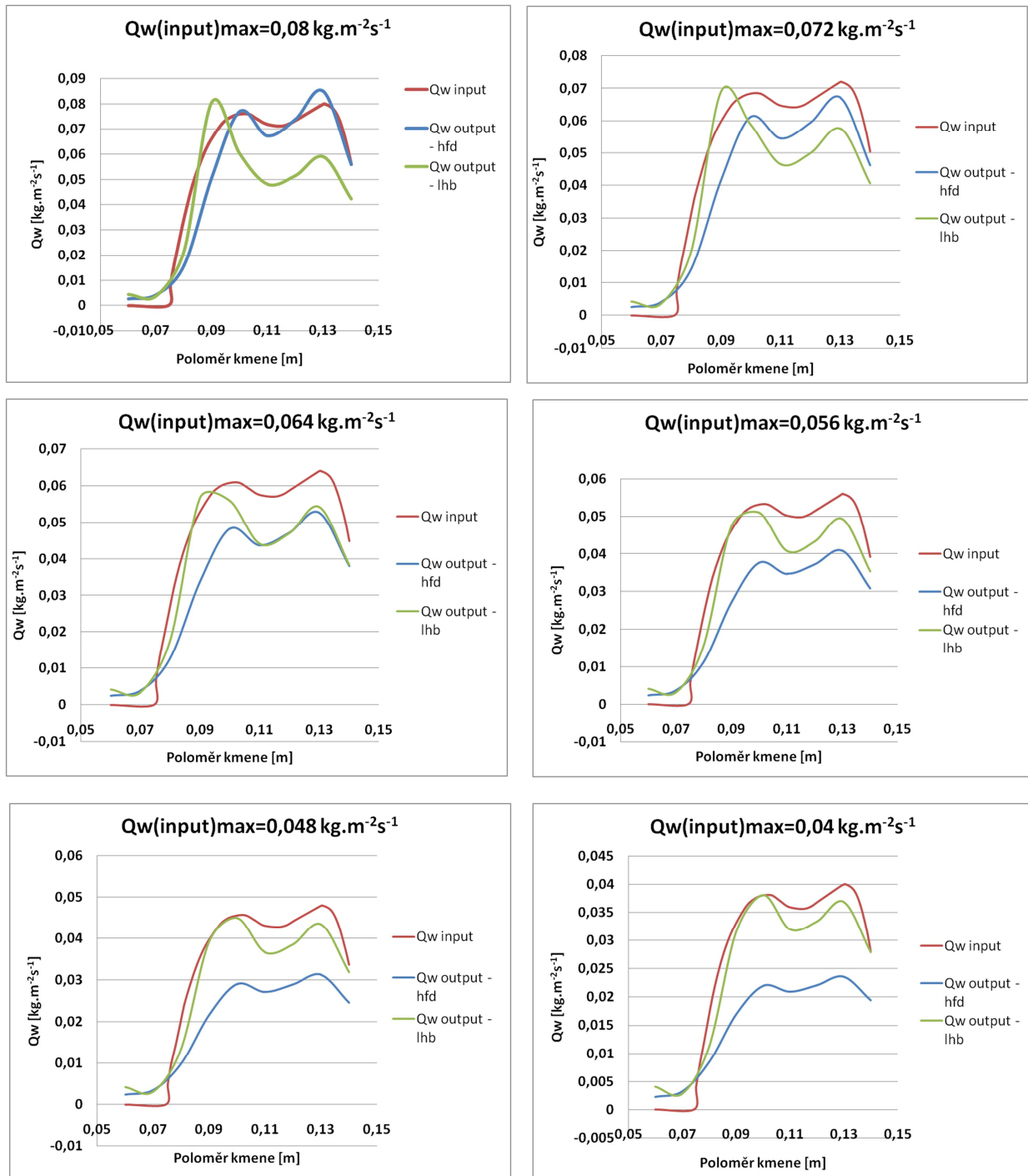
TRCALA, M., ČERMÁK, J., NADĚŽDINA, N. 2014. *Water content measurement in tree wood using a continuous linear heating technique*. *International Journal of Thermal Sciences* (In Press).

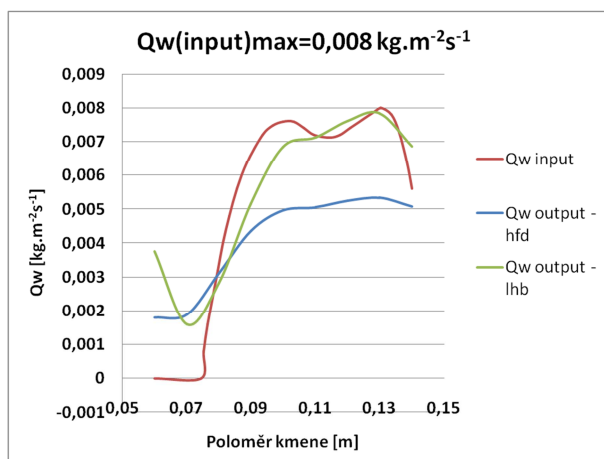
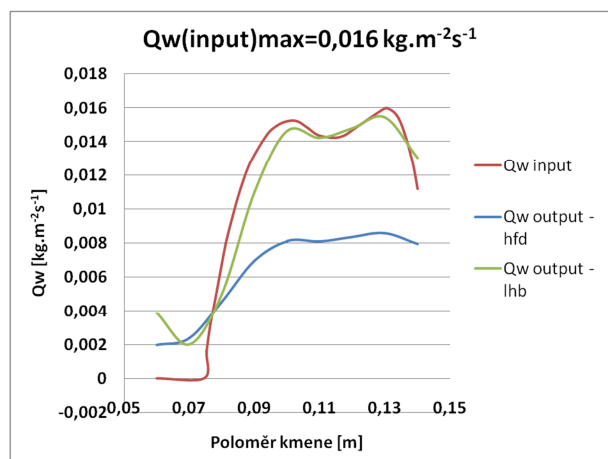
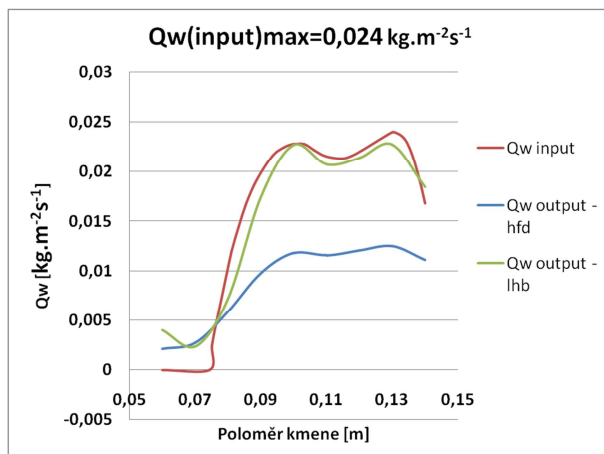
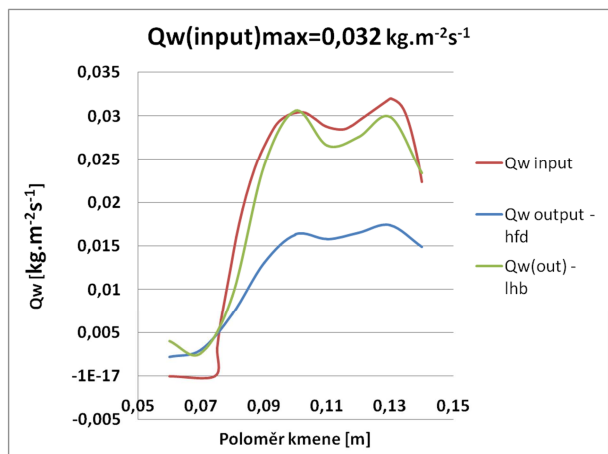
VINTER, Vladimír. *Rostliny pod mikroskopem; základy anatomie cévnatých rostlin*. 2. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2010.

# 10 Přílohy

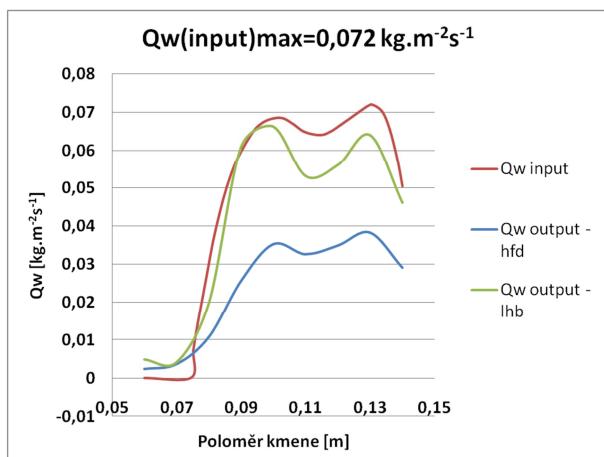
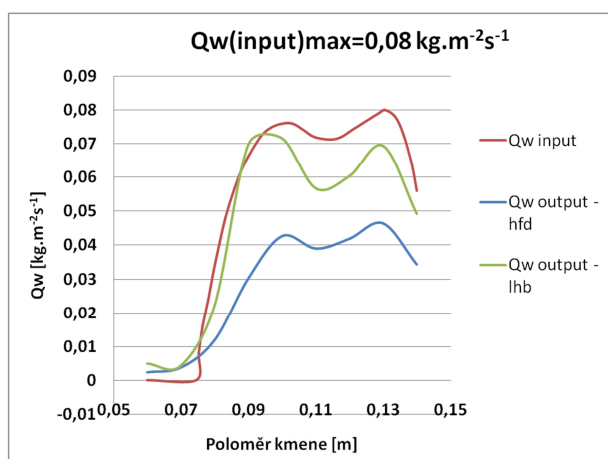
## 10.1 Grafické

Následující grafy zobrazují průběh transpiračního proudu v radiálním směru *Cupressus arizonica*,  $\lambda=0,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$

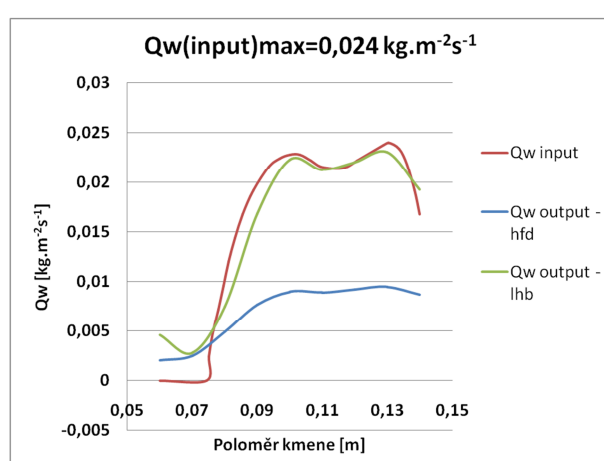
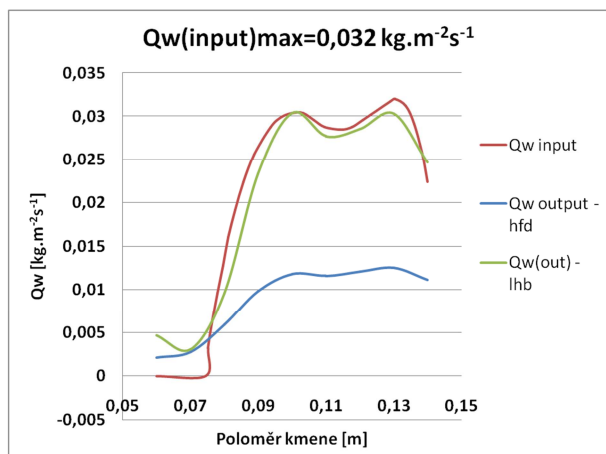
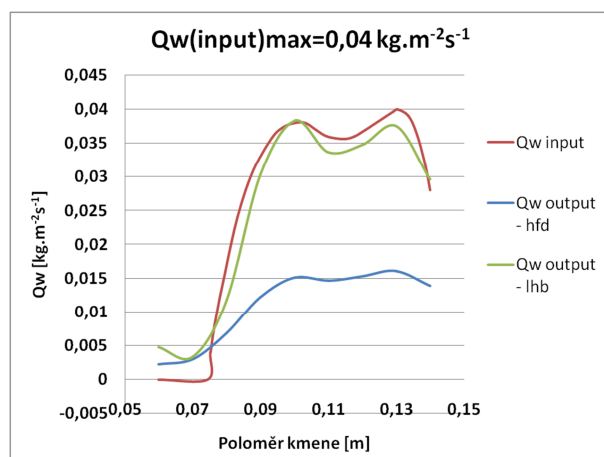
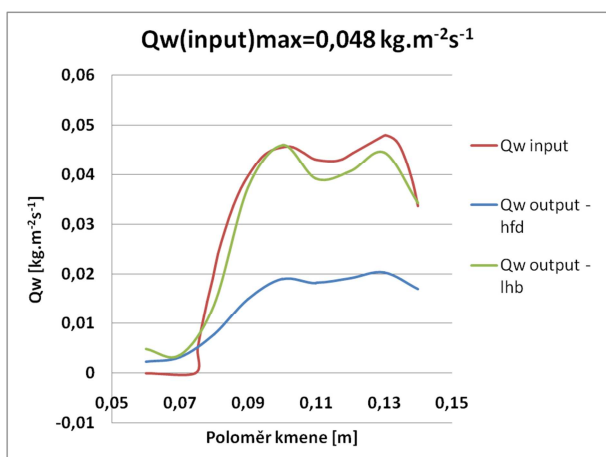
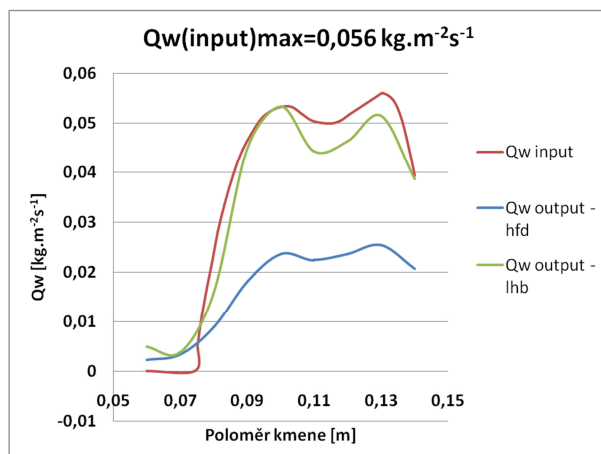
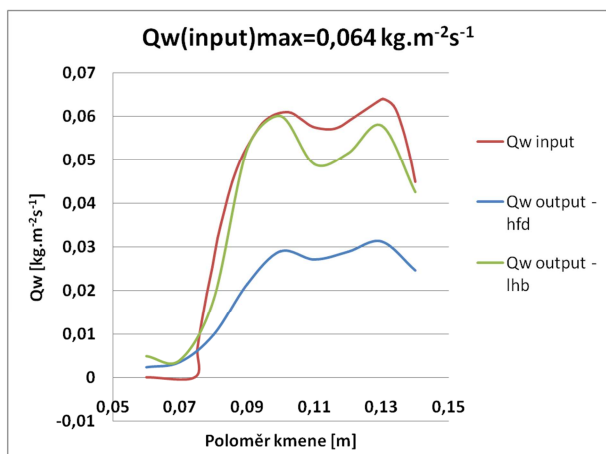


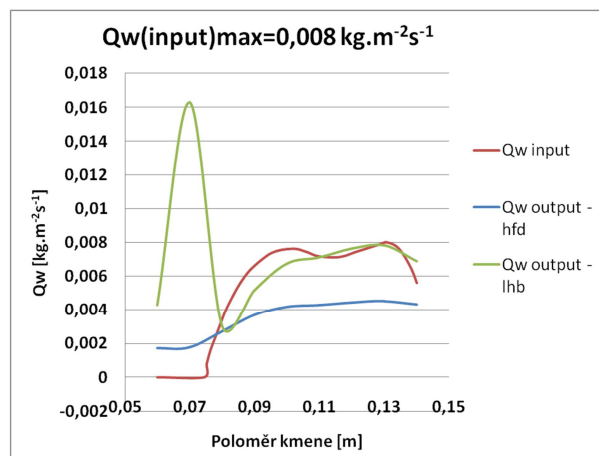
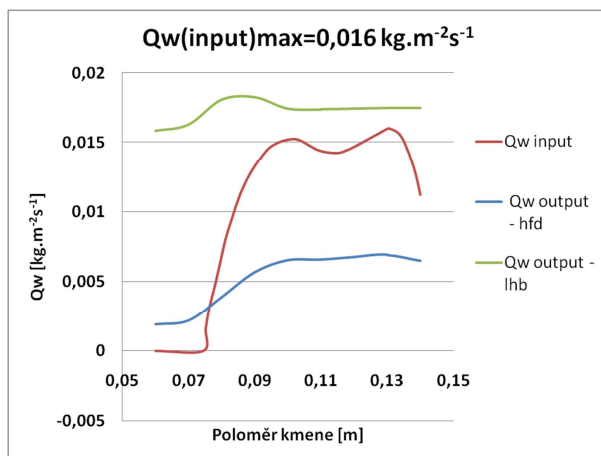


Následující grafy zobrazují průběh transpiračního proudu v radiálním směru *Cupressus arizonica*,  $\lambda=0,4 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$

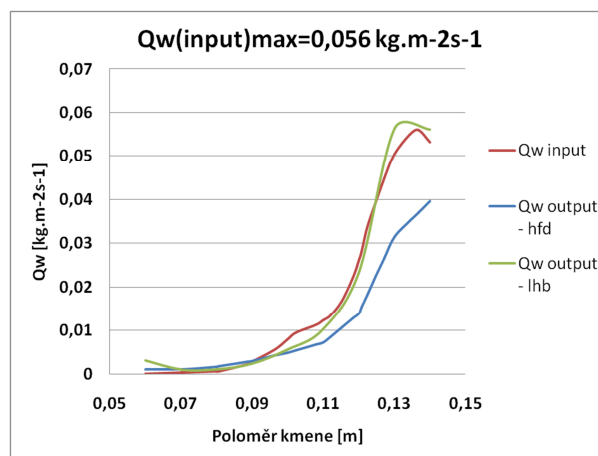
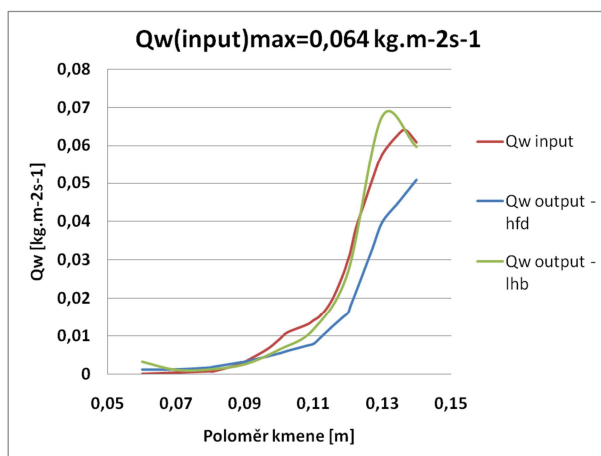
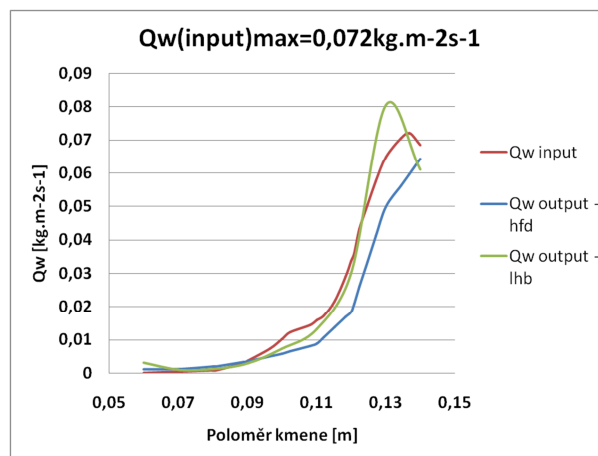
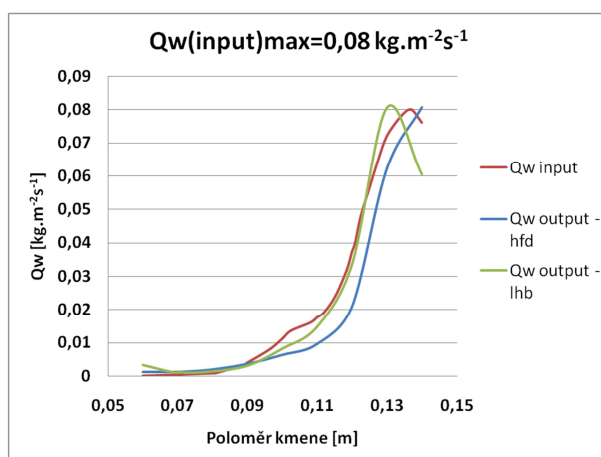


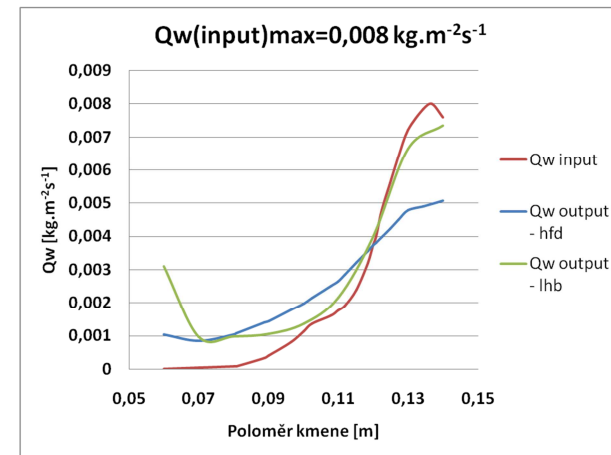
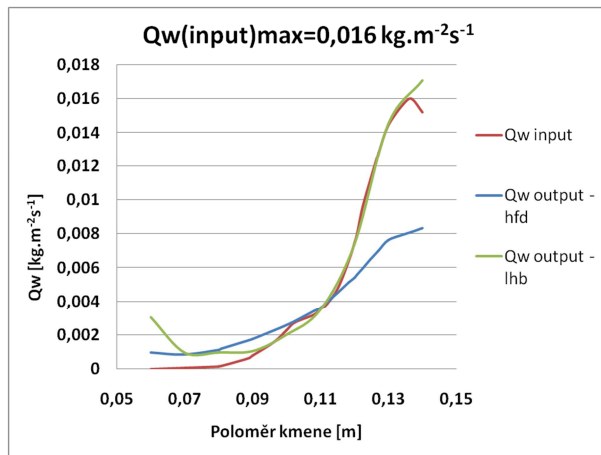
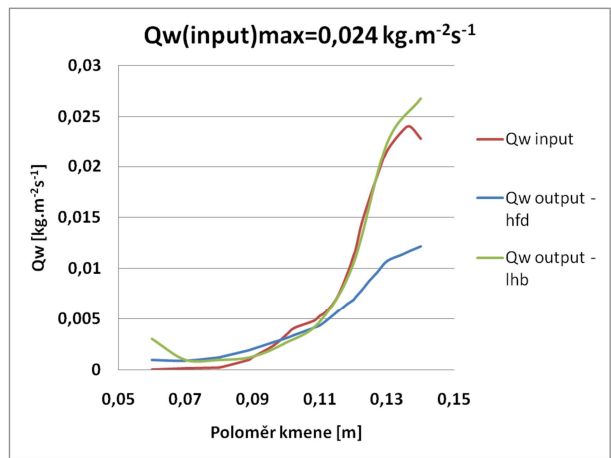
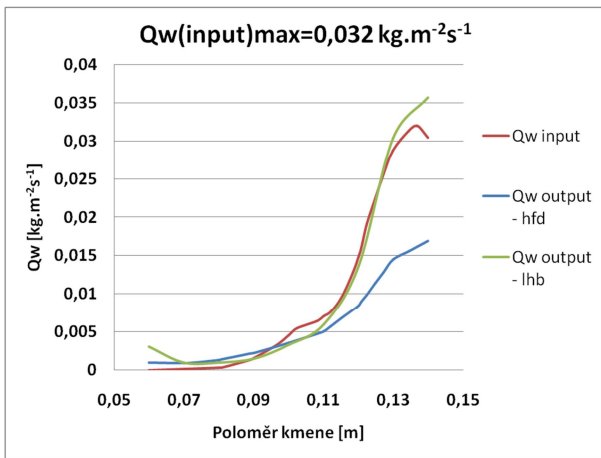
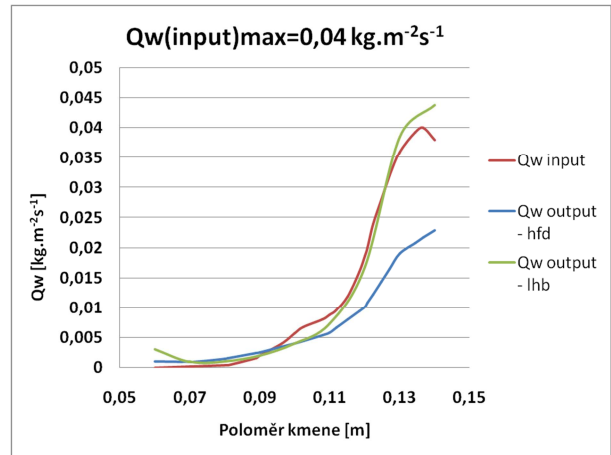
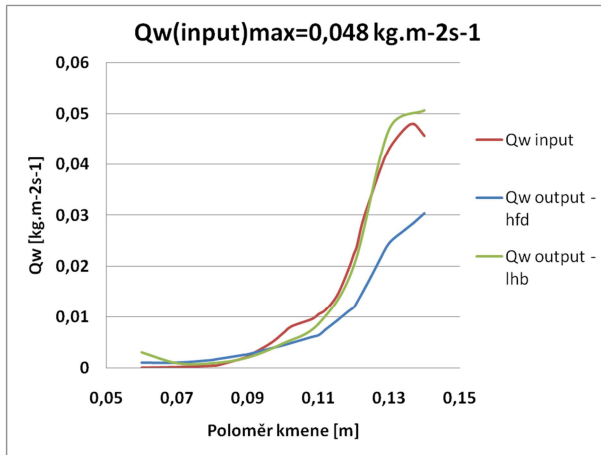




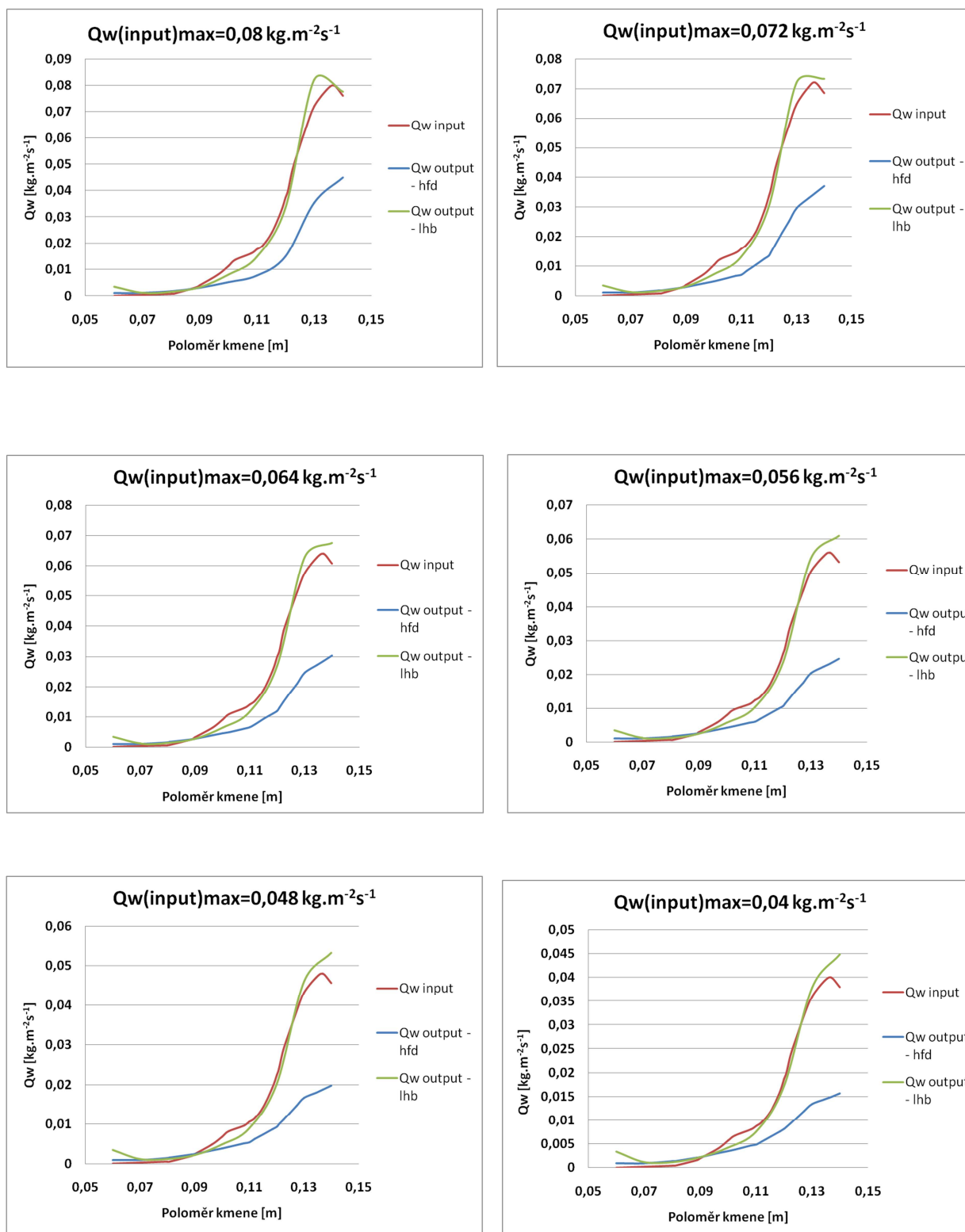


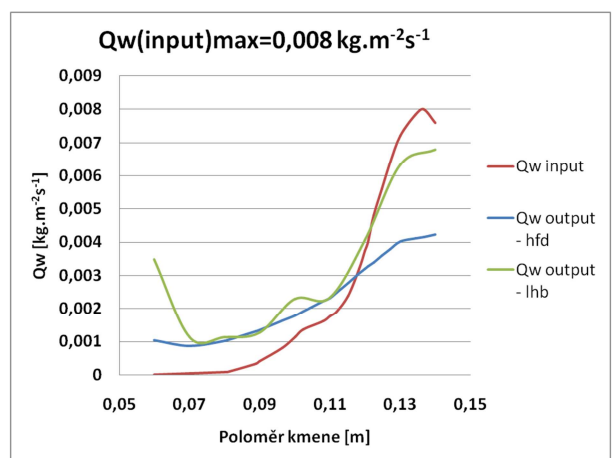
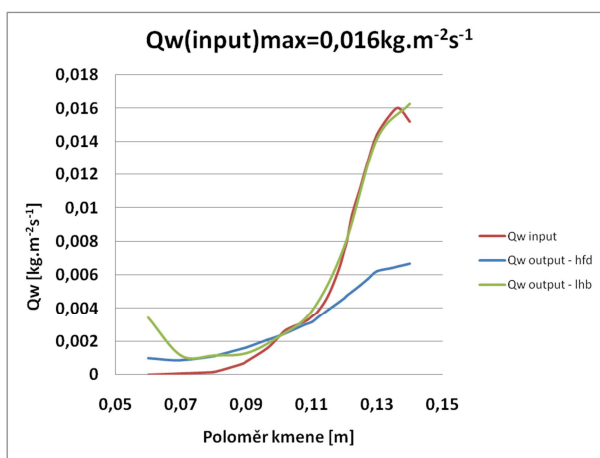
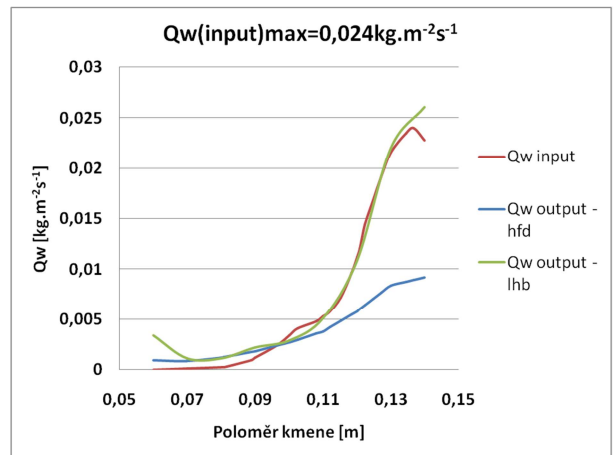
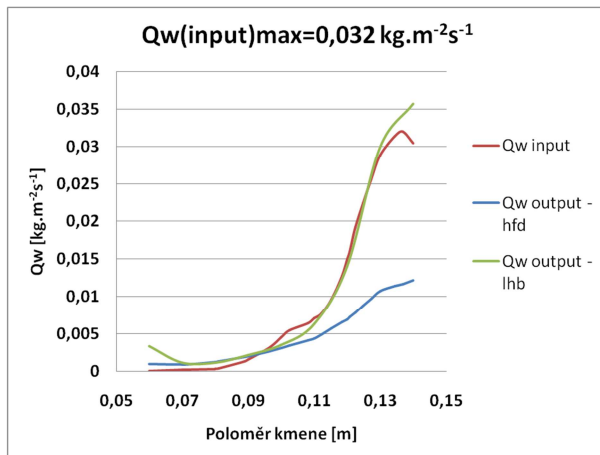
Následující grafy zobrazují průběh transpiračního proudu v radiálním směru *Olea europaea*,  $\lambda=0,3 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$



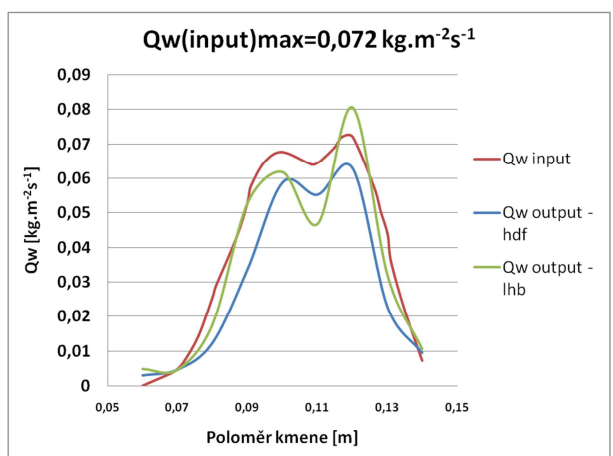
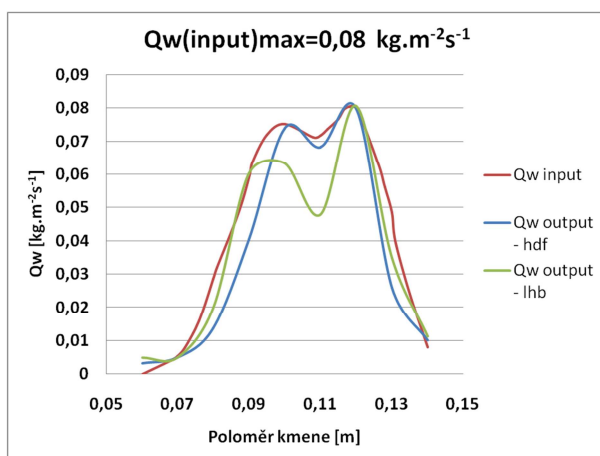


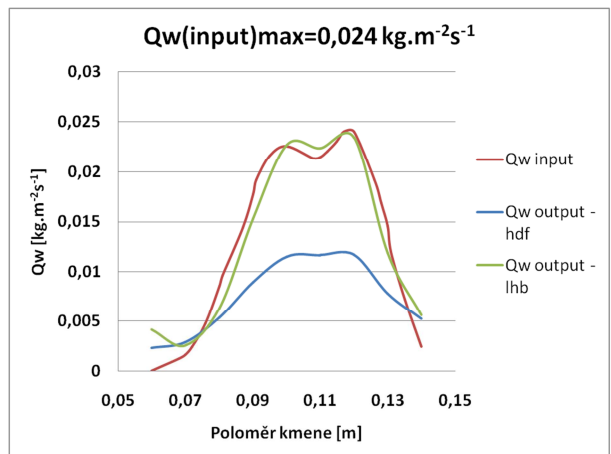
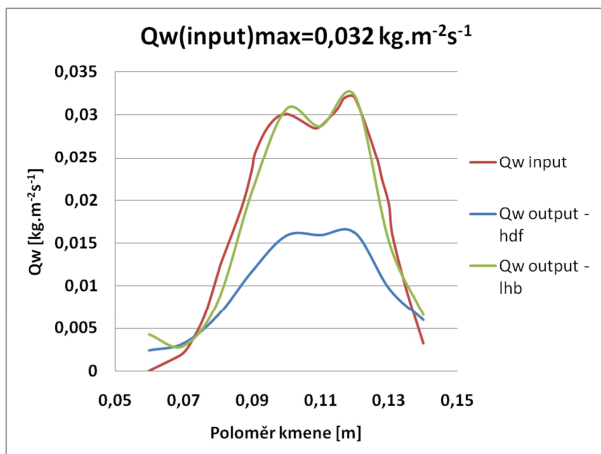
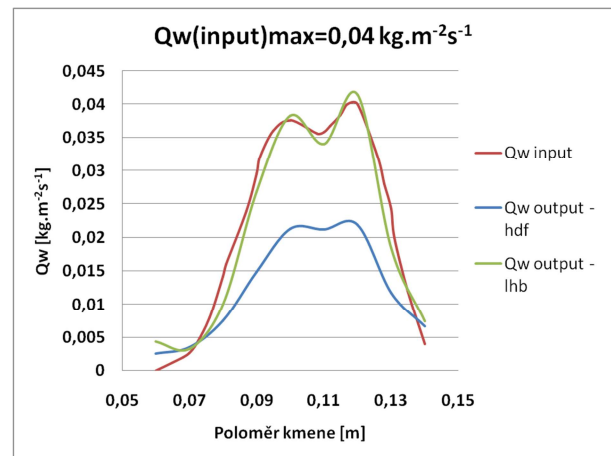
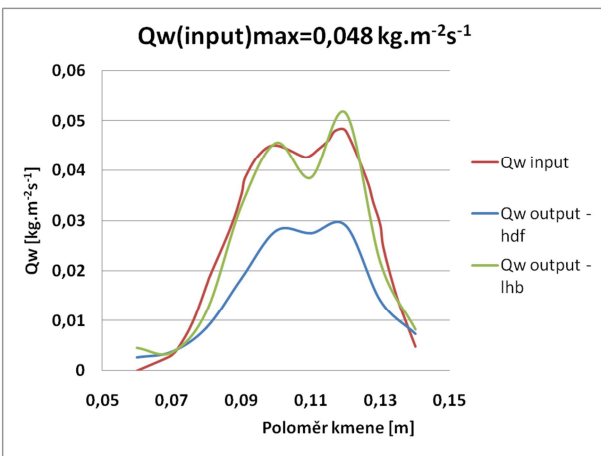
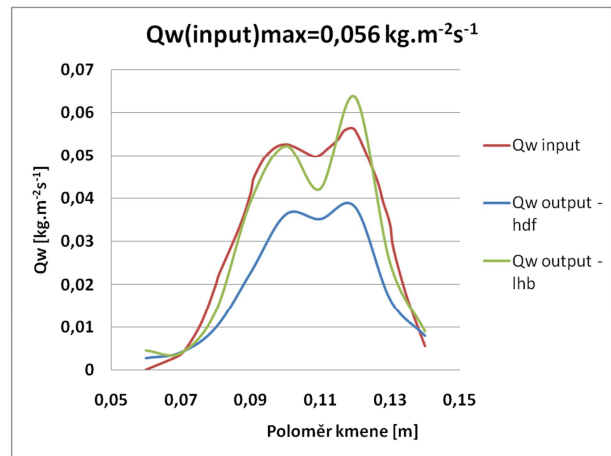
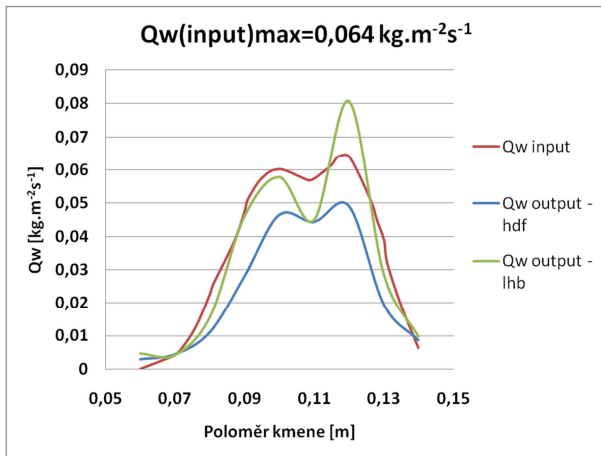
Následující grafy zobrazují průběh transpiračního proudu v radiálním směru *Olea europaea*,  $\lambda=0,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$

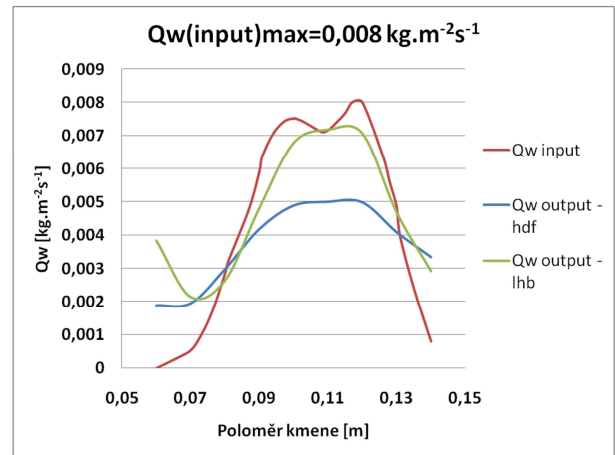
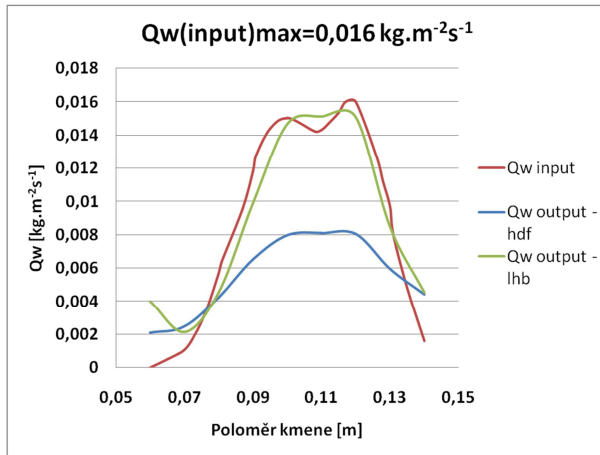




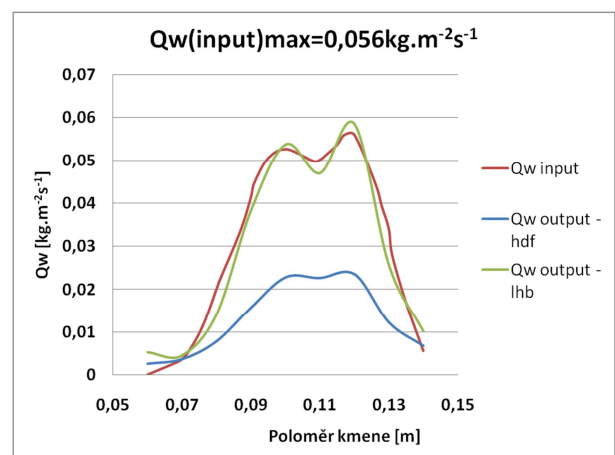
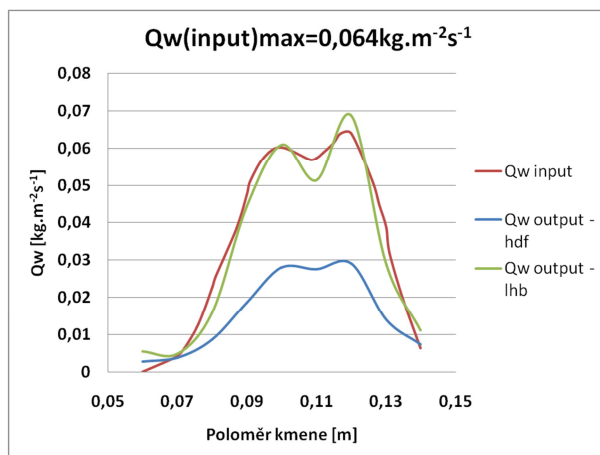
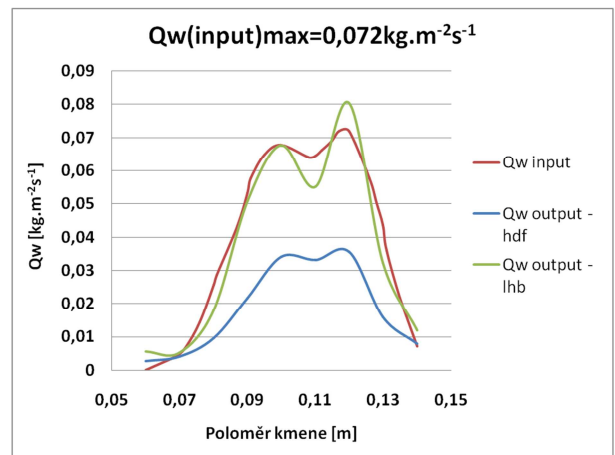
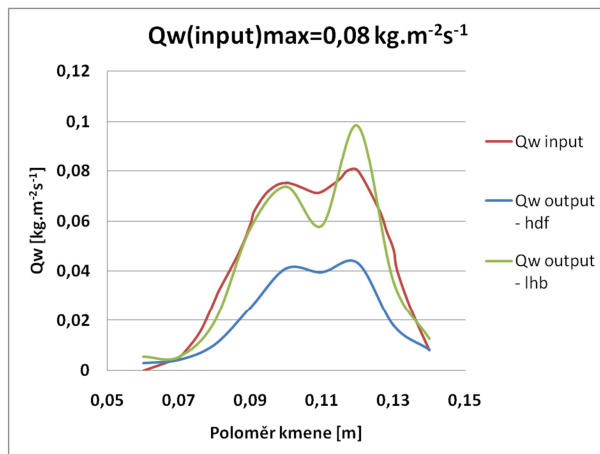
Následující grafy zobrazují průběh transpiračního proudu v radiálním směru *Populus interamericana*,  $\lambda=0,3 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$

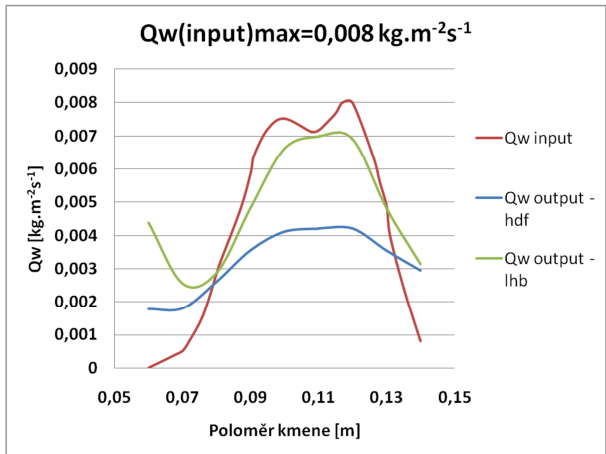
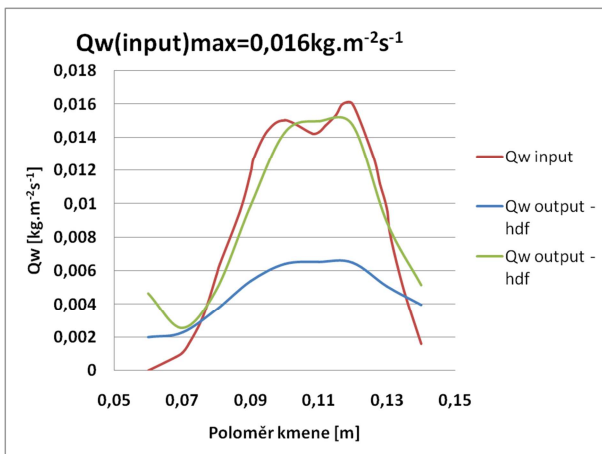
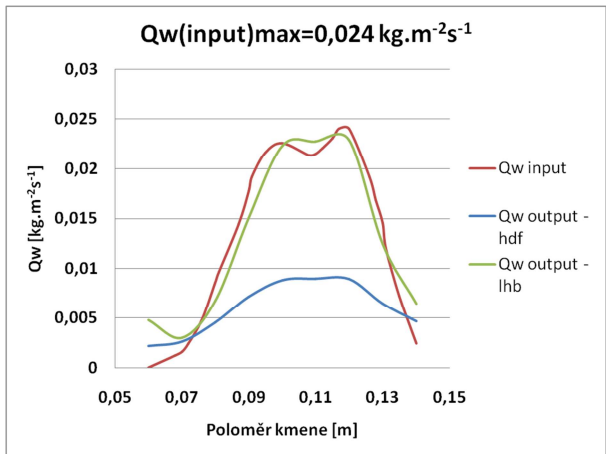
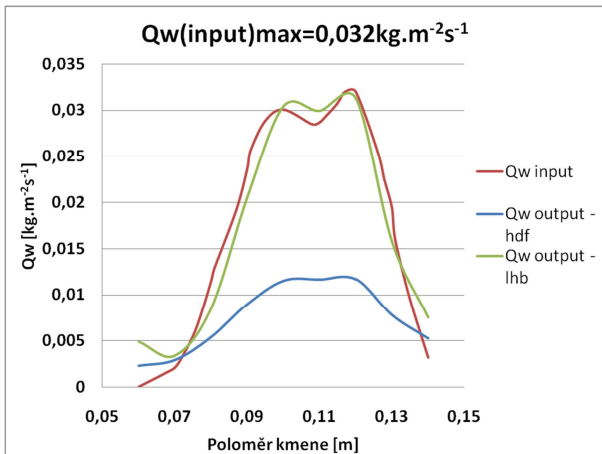
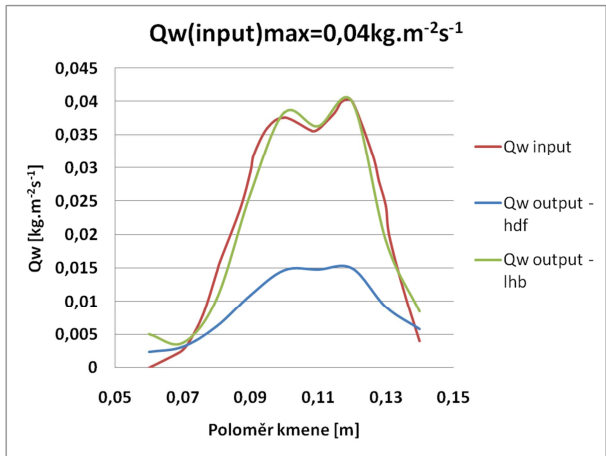
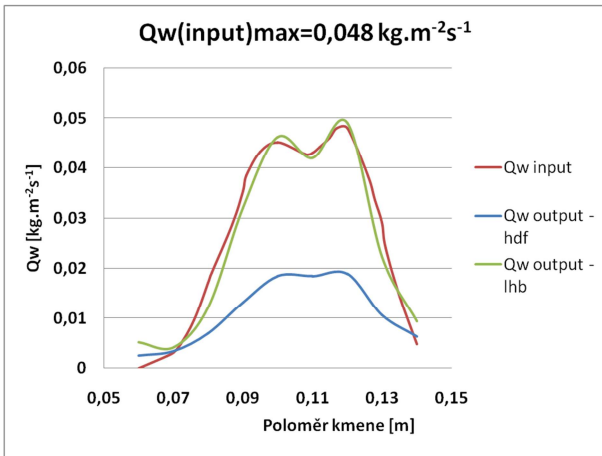






Následující grafy zobrazují průběh transpiračního proudu v radiálním směru *Populus interamericana*,  $\lambda=0,4 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$







## 10.2 Tabulkové přílohy

Tabulka relativních odchylek rozdílů součtu ploch pod křivkami;  $\Delta S_{HFD}$

	$\lambda$ [W.m-1K-1]	Qwmax=0,008 [kg.m-2s-1]	Qwmax=0,016 [kg.m-2s-1]	Qwmax=0,024 [kg.m-2s-1]	Qwmax=0,032 [kg.m-2s-1]	Qwmax=0,04 [kg.m-2s-1]	Qwmax=0,048 [kg.m-2s-1]	Qwmax=0,056 [kg.m-2s-1]	Qwmax=0,064 [kg.m-2s-1]	Qwmax=0,072 [kg.m-2s-1]	Qwmax=0,08 [kg.m-2s-1]
CA	0,3	24%	41%	44%	44%	42%	38%	32%	26%	18%	9%
	0,4	35%	51%	57%	58%	58%	57%	55%	53%	50%	47%
OE	0,3	4%	30%	39%	41%	41%	40%	37%	33%	28%	22%
	0,4	17%	40%	50%	54%	56%	56%	56%	55%	53%	51%
PI	0,3	17%	37%	43%	44%	43%	40%	36%	31%	25%	18%
	0,4	28%	47%	54%	57%	58%	58%	57%	55%	53%	50%
									průměr celkem		42%
									průměr $\lambda = 0,3$		32%
									průměr $\lambda = 0,4$		51%

Tabulka relativních odchylek rozdílů součtu ploch pod křivkami;  $\Delta S_{LHB}$

	$\lambda$ [W.m-1K-1]	Qwmax=0,008 [kg.m-2s-1]	Qwmax=0,016 [kg.m-2s-1]	Qwmax=0,024 [kg.m-2s-1]	Qwmax=0,032 [kg.m-2s-1]	Qwmax=0,04 [kg.m-2s-1]	Qwmax=0,048 [kg.m-2s-1]	Qwmax=0,056 [kg.m-2s-1]	Qwmax=0,064 [kg.m-2s-1]	Qwmax=0,072 [kg.m-2s-1]	Qwmax=0,08 [kg.m-2s-1]
CA	0,3	3%	6%	8%	10%	12%	14%	17%	21%	24%	29%
	0,4	-16%	-53%	4%	5%	6%	8%	9%	10%	12%	13%
OE	0,3	-10%	-6%	-3%	-2%	-1%	0%	0%	0%	0%	6%
	0,4	-14%	-7%	-5%	-4%	-2%	-1%	-1%	0%	0%	0%
PI	0,3	-3%	1%	3%	4%	5%	6%	6%	5%	9%	14%
	0,4	-5%	0%	2%	3%	4%	5%	5%	6%	6%	4%
									průměr celkem		3%
									průměr 0,3		6%
									průměr 0,4		0%