

MĚŘENÍ TRANSPIRACE PROSTŘEDNICTVÍM TRANSPIRAČNÍHO PROUDU A ZJIŠŤOVÁNÍ OPERAČNÍCH STRUKTUR DŘEVIN VÝZNAMNÝCH PRO JEJICH HOSPODAŘENÍ S VODOU

Jan Čermák, Naděžda Naděždina

Ústav ekologie lesa, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Zemědělská 3,
61300 Brno, cermak@mendelu.cz

Úvod

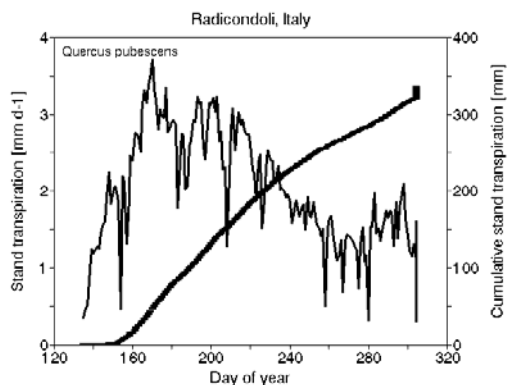
Na semináři zaměřeným na problematiku evaporace a evapotranspirace jistě není třeba připomínat význam těchto fenoménů. Jejich znalost je významná nejen pro klimatologii či hydrologii, ale také jako objektivní informace použitelná při hodnocení funkčního stavu lesních dřevin a jejich porostů i pro lesnictví a ekologii stejně jako pro ochranu krajiny. Přírodní abiotické faktory (např. voda, teplota) a k nim se družící antropogenní faktory (např. imise) modifikují stressovou odolnost k sekundárnímu poškození biotickými škodlivými činiteli (např. houbami a hmyzem) a tím působí jako významné predispoziční faktory. Ty často přímo a opakovaně podmiňují vznik rozsáhlých kalamit, které se pak mohou zdánlivě nečekaně odrazit ve změnách hydrologie krajiny. Voda slouží u živých organismů jako medium všech fyziologických procesů, ale u rostlin především k termoregulaci asimilačního aparátu, který může optimálně pracovat jen v poměrně úzkém rozmezí teplot. Strom mýtního věku spotřebuje ke svému růstu kilogramy minerálních látek, tuny uhlíku, ale tisíce tun vody. Největší podíl biomasy lesních porostů tvoří dřevo, tedy vodo-vodivý systém stromů. Voda patří k nejčastějším přírodním limitujícím faktorům růstu, avšak kvantitativní údaje o dynamice spotřeby vody, využití jejích zdrojů, stresovém působení nedostatku nebo nadbytku vody a hospodaření s vodou z hlediska růstu u různých druhů dřevin jsou dosud k dispozici jen v omezeném množství. Proto problematika evaporace a evapotranspirace z biologického hlediska ať již v souvislosti s globálním oteplením nebo z obecnějších důvodů jistě zasluhují větší pozornost.

Instrumentální studie toků vody a struktur v lesních porostech

S rozvojem moderní přístrojové techniky v současné době se ukazuje významná možnost doplnit existující údaje o stavu lesních porostů a možnosti jejich ovlivnění na větších souborech vybraných pokusných lokalit pomocí citlivých kvantitativních měření fyziologických procesů. Na Ústavu ekologie lesa Mendelovy zemědělské a lesnické univerzity v Brně a spolupracujících pracovištích bylo vyvinuto (a patentováno) několik nových měřících metod. Ve spolupráci s dalšími fyzikálními institucemi (např. Geofyzika Brno, Vysoké Učení Technické v Praze aj.) byly pak aplikovány další novodobé postupy při studiu celých stromů. Jde např. o dva z celkem pěti ve světě používaných a komerčně dostupných systémů pro měření toku vody (transpiračního proudu). Ty jsou založené na měření tepelné bilance kmene (Čermák a Deml 1972/74, Čermák et al. 1973, 1982, Kučera et al. 1976, Kučera 1977, Čermák a Kučera 1981, Deml et al. 1993) nebo měření deformace tepelného pole (Naděždina et al. 1998, 2000, Naděždina a Čermák 1998). Posledně jmenovaná metoda díky multibodovým čidlům umožňuje zpřesnění výsledků a zejména otevírá možnosti směrového hodnocení toků při studiu architektury dřevin (Čermák a Naděždina 2000, Naděždina et al. 2000). Přehledy různých autorů uvádějí i některé další metody (Campbell 1991, Cohen a Standhill 1994, Swanson 1994, Smith a Allen 1996, Kostner et al. 1998).

Transpirační proud je měřen automaticky u souborů stromových vzorníků jak krátkodobě, tak i po dlouhá období (např. vegetační sezónu po

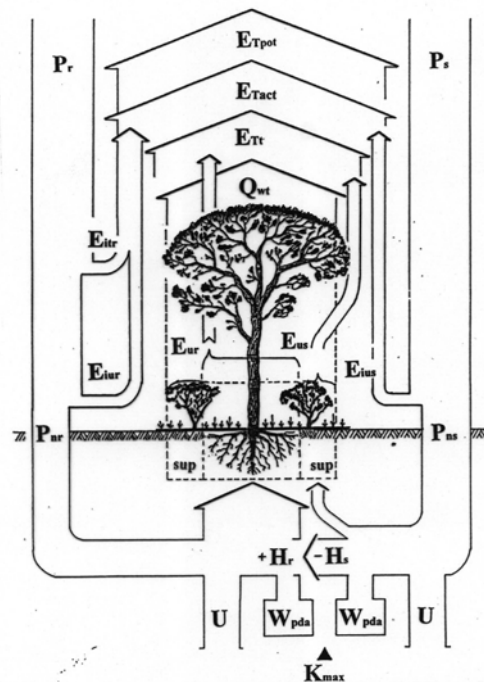
dobu několika let) nezávisle na počasí a v jakýchkoli terénních podmínkách, nevyžaduje žádné pomocné stavby (jako věže, skleníky apod.) a umožňuje současné zachycení většího počtu pokusných ploch, tedy aplikaci i v rámci např. povodí, větších lesních majetků ap. Nejnovější verze citovaných metod umožňují stanovení i velmi nízkých resaturačních toků (indikátorů stresu) a určení vektorů toku (tj. určení podzemních zdrojů a míst spotřeby vody v koruně), což je pod hranicí citlivosti, resp. mimo dosah jiných metod. Ve spolupráci se zainteresovanými zahraničními institucemi se



proto Mendelova univerzita účastní širšího zavádění takovýchto "celostromových" metod v rámci Evropy a USA (Tab.1).

Našimi i zahraničními výzkumnými kolektivy bylo nezávisle potvrzeno, že zmíněné metody měření toku jsou kvantitativní a to jak na úrovni jednotlivých stromů (Penka et al.1979, Schulze et al.1985, Lundblat et al. 2001), tak lesních porostů (Meiresonne et al.1999, Gurtz a Zappa 2000, Oltchev 2000). Příklad naměřeného sezónního průběhu transpirace lesního porostu ukazuje obr.1. Aplikace těchto metod byla rozšířena i na menší objekty než stromy, tedy na výhony, semenáčky apod. Je tedy možno podobným způsobem sledovat i nízké rostlinné porosty (Rychnovská et al. 1980, Lindroth et al. 1995). Od počátku studií před téměř třiceti lety se tyto metody osvědčily pro stanovení základních parametrů transpiračního proudu u lesních i ovocných druhů dřevin (Čermák et al. 1973, 1976, 1982, 1984, 1986, 1992, 1994, Kučera a Čermák 1989, Penka et al. 1976, 1983, Martin et al. 1995, Bauerle et al. 1999, Cienciala et al. 2000), shrnutých v několika souborných přehledech (Čermák 1986, 1994a, 1994b, 1996, Čermák a Kučera 1989, 1994, Pallardy et al. 1995). Zvláštní práce byly věnovány způsobům přepočtu dat transpirace ze stromových vzorníků

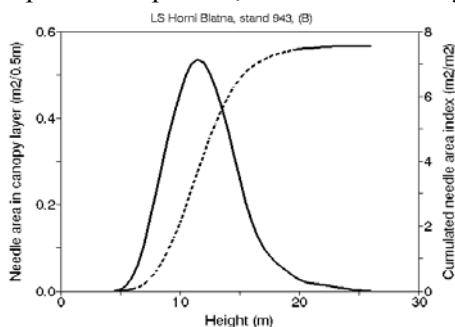
na lesní porosty (Čermák et al. 1982, 1996, Čermák a Michálek 1991, Čermák a Kučera 1990, Čermák et al. 2004), při kterých bylo za účelem přepočtu ze stromů a pokusných ploch na větší měřítko použito lesních taxačních dat (Čermák a Kučera 1987), kombinace s metodami dálkového průzkumu (Balek et al. 1986, Čermák a Kučera 1990) nebo hydrologických modelů (Gurtz a Zappa 2000, Oltchev 2000). Řada studií se týkala stanovení denní a sezónní dynamiky transpirace lesních porostů v temperátní zóně Evropy a USA (Čermák et al. 1982, 1983, 1987, 1991, 1995, 1998, Penka et al. 1983, Heimann et al. 1991, Balek et al. 1983, 1985, 1986, Cienciala et al. 1992, 1994, 1995, Hinckley et al.1993, Martin et al. 1997, Meiresonne et al. 2000 aj.). Podobné postupy se osvědčily v mediteránních lesích (Jimenez et al. 1996, 1999) i v tropických oblastech (Cienciala et al. 2000). Výsledky posloužily jako podklad výpočtů vodní bilance lesních porostů (viz příklad schematického



znázornění toků vody v kontinuu půda-strom-atmosféra v lužním lese na Břeclavsku na obr.2), posuzování chování různých druhů dřevin v porostech a regionálních hydrologických studiích, aj.

Analýza absolutních hodnot transpirace i dynamiky transpiračního proudu se osvědčila při diagnostice zdravotního stavu stromů s rozlišením korun a kořenových systémů (Čermák a Kučera 1990a, 1990b, 1990c, 1990d, Naděžhdina a Čermák 1999). V kombinaci s pedologickými metodami byly

podobné údaje použity při intaktních studiích vztahů funkce a struktury vzrostlých stromů, např. hloubky a šířky zakořenění (Čermák et al. 1980, Čermák a Kučera 1990), efektivních rozměrů a tvarů korun (Čermák et al. 1982, Čermák a Kučera 1990d) extrémním změnám toku (Čermák a Kučera 1991), specifickým parametrům vodivého systému kmene (Čermák a Kučera 1990, Čermák et al. 1992, Nadeždina a Čermák 1998a, 1998b, Nadeždina et al. 2000, Morales et al. 2000, Jimenez et al. 2000). To vše jsou nezbytné parametry pro aplikaci podrobnějších hydrologických modelů. Specifickou otázkou je např. možnost optimální regulace závlah v sadech na základě měření transpiračního proudu v kmenech stromů (Nadeždina 1998a, 1998b, 2000). U některých druhů dřevin bylo sledováno hospodaření s vodou a souvislosti transpirace s růstem (Čermák et al. 1987, Krejzar et al. 1998, Tatarinov a Čermák 1999). Některé studie byly věnovány srovnání listnatých a jehličnatých porostů a chování různých druhů a sociálních skupin stromů za podmínek kontrastního zásobování vodou (Čermák 1986, Čermák a Kučera 1991, Čermák a Nadeždina 2000). Analýza transpiračního proudu a struktury stromů byla prakticky aplikována v lesnictví při hodnocení stability a vitality porostů. Tak např. byly vysvětleny důvody náhlého odumírání vyspělých buků v proředěných porostech (Matyssek et al. 1991, Čermák et al. 1993a, 1993b), středně starých smrků ve smíšených porostech (Čermák et al. 1984, 1985) a vzrostlých dubů v lužních lesích po melioračních úpravách krajiny (Čermák a Prax 2001, Čermák et al. 1991). Zhodnocení efektivity listoví je jedním ze základních předpokladů optimalizace struktury porostů (Čermák 1998) s tím, že ještě dokonalejší informace poskytují studie zahrnující kořenové systémy (Čermák a Nadeždina 2000). Z tohoto hlediska se ukázalo významným i posouzení kompetice plevelných podrostních listnatých druhů a lesnický významných druhů porostu (Nadeždina et al. 2000). Analýza transpiračního proudu, růstu a struktury byla



podobně použita i při posuzování stability systému strom-budovy ve městech (Čermák et al. 1980, 1981, 1986, Prax a Čermák 2003).

V rámci komplexních studií lesních dřevin byla studována i jejich struktura, jmenovitě distribuce listoví (Čermák et al. 1989, 1998a, 1998b, Morales et al. 1996a 1996b, Nadeždina et al. 1997, Tatarinov et al. 1997). Index listové plochy a nověji také distribuci listoví v korunách porostů umožňují různé optické techniky (např. Licor či nová konstrukce ČSAV) včetně objektivu "rybí oko". Některé z nich jsou schopné stanovit distribuci i u jednotlivých stromů, kterou bývalo možné studovat jen geometricky. Příklad stanovení distribuce jehličí ve smrkovém porostu je uveden na obr. 3. Mezi nově použité fyzikální metody pro studium kořenových systémů přímo aplikovatelné na úrovni stromů a porostů a to bez nutnosti obtížné extrapolace z jednotlivých málo rozměrných orgánů na celé stromy, patří např. podzemní, resp. geofyzikální radar (Hruška et al. 1999, Čermák et al. 1997, 2000, Šustek et al. 1999a, 1999b). Studie kořenových systémů umožňují i další metody, např. téměř bezeškodná exkavační technika supersonického proudu vzduchu – obr. 4 kde je uveden příklad aplikace u smrkového porostu (Čermák et al. 1998b, Stokes et al. 2001, Nadeždina a Čermák 2003). Kvantifikaci absorpčních povrchů kořenových systémů celých stromů umožňuje modifikovaná metoda měření elektrické impedance půdy a stromů (Staněk 1997, Aubrecht et al. 2003). Distribuci absorpčních kořenů v půdě lze nepřímo odvodit prostřednictvím zjištění radiálního profilu transpiračního proudu v bělové části dřeva kmene spojující různé části stromu (Nadeždina a Čermák 2000). Kombinace takovýchto údajů s celkovými hodnotami transpiračního proudu umožňuje posouzení efektivity vodivého systému různých druhů dřevin (Čermák et al. 1989, 2000, Krejzar a Kravka 1998), energeticky podmíněné růstové limity stromů (Čermák et al. 1998) a zjištění řady dalších ekologicky i hydrologicky významných



parametrů lesních dřevin, které jsou obtížně získatelné jinými metodami.

Z á v ě r

V současné době je na Ústavu ekologie lesa Mendelovy zemědělské a lesnické univerzity v Brně používán komplex moderních měřících a vyhodnocovacích systémů schopných zjišťovat parametry vodního provozu, architektury a růstu na úrovni celých stromů a lesních porostů. Komplex byl ověřován doma i v zahraničí přibližně na padesáti lokalitách a dlouhodobě se osvědčuje ve velmi rozdílných prostředích. Transpirace a další charakteristiky stromů jsou získávané v jakýchkoli terénních podmínkách a jsou na základě mnohaletých zkušeností podle potřeby interpretovány jak z klimatologického či hydrologického, tak z ekologického či lesnického hlediska. Je tak stanovována dynamika spotřeby vody lesními porosty, plantážemi nebo ovocnými sady jako jedna z rozhodujících položek vodní bilance. Jsou identifikovány faktory limitující transpiraci ať již jde o nedostatek vody v půdě nebo její nadbytek spojený s nedostatkem vzduchu, zdravotní stav porostů apod. Na evapotranspiraci rostlinných porostů mají význam nejen terénní a půdní parametry lokality a nadzemní charakteristiky vodivého systému stromů ale také méně dostupné parametry podzemní. Je tedy třeba dobře je znát, chybějící znalosti doplňovat dnes již dostupným přístrojovým měřením a počítat s nimi i v příslušných modelech povodí či krajiny. Výsledky jsou použitelné pro optimalizaci porostní struktury, zhodnocení vitality a funkční stability porostů, jako podklad pro návrhy opatření směřujících ke zlepšení současného stavu apod. To platí jak v místním, tak po zahrnutí většího počtu přímo sledovaných lokalit i v širším měřítku.

L iteratura

- Aubrecht L. Čermák J. Koller J. and Staněk Z. 2000. "Electrical methods for sapwood measurements" (in Czech). In: Proc."Elektrina a lesní stromy", Faculty of Nat.History & Pedagog.Faculty, Ostrava Univ., Ostrava, Czech Rep. 14-21 pp., October 11, 2000.
- Aubrecht L. Čermák J. Koller J. Plocek J. and Staněk Z. 2000. "Temperature, voltage and frequency dependence of live woody tissue resistivity" (in Czech). In: Proc."Elektrina a lesní stromy", Faculty of Nat.History & Pedagog.Faculty, Ostrava Univ., Ostrava, Czech Rep. 22-28 pp., October 11, 2000.
- Balek J. Čermák J. Kučera J. 1983. A direct method for forest transpiration measurement. J.of Hydrology 66: 123-131.
- Balek J. Čermák J. Kučera J. Palouš M. Prax A. 1985. "The possibilities to estimate transpiration by remote sensing" (in Czech). Vodohospodarský časopis 33(5): 497-505.
- Balek J. Čermák J. Kučera J. Prax A. Palouš M. 1986. Regional transpiration assessment by remote sensing. In: Proc. Cocoa Beech Workshop, "Hydrological application of space technology" Florida, August 1985. IAHS Publ. No.160: 141-148.
- Bauerle WL. Hinckley TM. Čermák J. Kučera J. Bible K. 1999. The canopy water relations of old-growth Douglas-fir trees. Trees 13: 211-217.
- Čermák J. Deml M. Penka M. 1973. A new method of sap flow rate determination in trees. Biologia Plantarum (Praha) 15(3): 171-178.
- Čermák J. Deml M. 1974. "Method of water transport measurements in woody species, especially in adult trees" (in Czech). Patent (Certification of authorship) CSFR, No.155622 (P.V.5997-1972).
- Čermák J. Palát M. Penka M. 1976. Transpiration flow rate in fully-grown tree *Prunus avium* L. by heat balance method estimated, in connection with some meteorological factors. Biologia Plantarum (Praha) 18(2): 111-118.
- Čermák J. Kučera J. Penka M. 1976. Improvement of the method of sap flow rate determination in adult trees based on heat balance with direct electric heating of xylem. Biologia Plantarum (Praha) 18(2): 105-110.
- Čermák J. Huzulák J. Penka M. 1980. Water potential and sap flow rate in adult trees with moist and dry soil as used for the assessment of the root system depth. Biologia Plantarum (Praha) 22: 34-41.
- Čermák J. Kučera J. 1981. The compensation of natural temperature gradient in the measuring point during the sap flow rate determination in trees. Biologia Plantarum (Praha) 23(6): 469-471.
- Čermák J. Úlehla J. Kučera J. Penka M. (1982). Sap flow rate and transpiration dynamics in the full-grown oak (*Quercus robur* L.) in floodplain forest exposed to seasonal floods as related to potential evapotranspiration and tree dimensions. Biologia Plantarum (Praha) 24(6): 446-460.
- Čermák J. Kučera J. Simon J. Dušek V. 1983. The electric conductance of seedlings stems and the water content of spruce and pine on course of desiccation. Biologia Plantarum (Praha) 25(6): 468-471.
- Čermák J. Jeník J. Kučera J. Židek V. 1984. Xylem water flow in a crack willow tree (*Salix fragilis* L.) in relation to diurnal changes of environment. Oecologia (Berlin) 64: 145-151.
- Čermák J. Prax A. Kučera J. 1986. "Ecological conditions of permanent coexistence of fully grown trees and constructions in housing developments" (in Czech). In: Proc."Zakladani (staveb) na objemově nestálých zeminách se zohledněním vlivu vegetace" (p.31-78), Dům techniky ČSVTS Brno.
- Čermák J. Kučera J. Prax A. Balek J. 1986. "Transpiration and water regime of the pine stand in the sand-rock region of poor pine forests" (in Czech). In: Proc.Symp.VSZ v Brně "Funkce lesů v životním prostředí" (p.67-73), Brno.
- Čermák J. 1986. Short- and long-term response of transpiration flow rate in full-grown trees to water stress. In: Proc. 18th IUFRO World Congress, Whole-Plant Physiology Working Party (S 2.01-15) 7-21.Sept 1986, Ljubljana, Yugoslavia, Yugoslav IUFRO World Congress Organiz. Committee (ed.), Plesko Ljubljana pp.187-193.
- Čermák J. Kučera J. Štěpánková M. 1987. "Water consumption of fully grown oak in floodplain forest during transient period after cessation of

floods" (in Czech). Acta Univ.Agric. (Brno), Ser.C, 56(1-4): 5-25.

Čermák J. and Kučera J. **1987**. Transpiration of fully grown trees and stands of spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) estimated by the tree-trunk heat balance method. In: Proc. Forest Hydrology and Watershed Measurements, Vancouver, Canada Aug. 1987, Swanson R.H. Bernier P.Y. and Woodward P.D. (eds.). Publ.No.167, IAHS-AISH, Wallingford, UK, 311-317pp.

Čermák J. **1989**. "A practical functional parameter of assimilating organs of trees and forest stands - solar equivalent leaf area" (in Czech). Lesnictví-Forestry 35(8): 695-707.

Čermák J. **1989**. Solar equivalent leaf area as the efficient biometric parameter of individual leaves, trees and stands. Tree Physiology 5: 269-289.

Čermák J. Kučera J. **1990**. Water uptake in healthy and ill trees under drought and hypoxia and non-invasive assessment of the effective size of root systems. (p. 185-195) In: Proc. COST 612 Workshop "Above and belowground interactions in forest trees in acidified soils" Persson H. (ed.), Simlångsdalen, May 21-23, 1990, Sweden.

Čermák J. Kučera J. **1990**. Scaling up transpiration data between trees, stands and watersheds. Silva Carelica 15:101-20.

Čermák J. Kučera J. **1990**. Changes in transpiration of healthy mature trees due to environmental conditions and of those with damaged water conductive system. In: Proc. Cs.MAB Natl.Comm./IUFRO Internat. Workshop "Verification of hypotheses and possibilities of recovery of forest ecosystems", Klimo E. Materna J. (eds.), p.275-286, Beskydy Mt., Czechoslovakia, Sep.4-8, 1989. Agr.Univ.Brno.

Čermák J. Kučera J. **1991**. Extremely fast changes of xylem water flow rate in mature trees, caused by atmospheric, soil and mechanical factors. 181-190pp. In: Proc.CEC Int.Workshop "Methodologies to assess the impacts of climatic changes on vegetation: Analysis of water transport in plants and cavitation of xylem transport in plants and cavitation of xylem conduits". Raschi A. Borghetti M. (eds.), May 29-31, 1991. Firenze, Italy.

Čermák J. **1991**. "Transpiration of trees and its significance in forest ecology" (in Czech). Habilitation Thesis, Agr.Univ.Brno 95p.

Čermák J. Michálek J. **1991**. "Selection of sample trees in forest stands using the "quantils of total" (in Czech). Lesnictví (Forestry) 37(1): 49-60.

Čermák J. Kučera J. Štěpánková M. **1991**. Water consumption of full-grown oak (*Quercus robur* L.) in a floodplain forest after the cessation of flooding. In: "Floodplain forest ecosystem II", Penka M. Vyskot M. Klimo E. Vašíček F. (eds.), p.397-417, Elsevier (Developments in Agricult.& Managed Forest Ecology 15B), Amsterdam-Oxford-N.York-Tokyo.

Čermák J. Cienciala E. Kučera J. Lindroth A. Hallgren J-E. **1992**. Radial velocity profiles of water flow in stems of spruce and oak and response of spruce tree to severing. Tree Physiology 10: 367-380.

Čermák J. Kučera J. Janiček R. **1992**. The "Roof" project in Rajec. In: Proc. Experimental manipulations of Ecosystems: Symposium in Copenhagen, May 18-20, 1992. (7 p.).

Čermák J. Matyssek R. Kučera J. **1993**. Rapid response of large, drought stressed beech trees to irrigation. Tree Physiology, 12: 281-290.

Čermák J. Matyssek R. Kučera J. **1993**. "The causes of beech decline on heavy soils after sudden reduction of stand density" (in Czech). Lesnictví-Forestry 39(5): 175-183.

Čermák J. Cienciala E. Kučera J. Lindroth A. Bednářová E. **1995**. Individual variation of sap flow rate in large pine and spruce trees and stand transpiration: A pilot study at the central NOPEX site. J.of Hydrol.168:17-27.

Čermák J. **1998**. Leaf distribution in large trees and stands of the floodplain forests in southern Moravia. Tree Physiol. 18:727-737.

Čermák J. and Nadezhdina N. **1998**. Sapwood as the scaling parameter - defining according to xylem water content or radial pattern of sap flow? Ann.Sci.For.55: 509-521.

Čermák J. Riguzzi F. and Ceulemans R. **1998**. Scaling up from the individual trees to the stand level in Scots pine: 1. Needle distribution, overall crown and root geometry. Ann.Sci.For.55: 63-88.

Čermák J. and Nadezhdina N. **1998**. Brief review of present techniques used for sap flow measurements in intact plants. Proc. 4th. International Workshop on Measuring Sap Flow in Intact Plants. Židlochovice, Czech Republic, Oct.3-5, 1998. 4-11 pp. IUFRO Publications. Publishing house of Mendel Univ.Brno.

Čermák J. Nadezhdina N. Raschi A. Tognetti R. **1998**. Sap flow in *Quercus pubescens* and *Q.cerris* stands in Italy. Proc. 4th. International Workshop on Measuring Sap Flow in Intact Plants. Židlochovice, Czech Republic, Oct.3-5, 1998. 134-141 pp. IUFRO Publications. Publishing house of Mendel Univ.Brno.

Čermák J. and Nadezhdina N. **1998**. Radial profile of sap flow and scaling from the measuring point to the whole tree level. Proc. 4th. International Workshop on Measuring Sap Flow in Intact Plants. Židlochovice, Czech Republic, Oct.3-5, 1998. Abstr.142 p. IUFRO Publications. Publishing house of Mendel Univ.Brno.

Čermák J. **1999**. Vertical distribution of foliage in Moravian floodplain forests. Ekologia (Bratisl.),Sup.1999,Vol.18:15-24.

Čermák J. Hruška J. Martinková M. Prax A. **2000**. Urban tree root systems and their survival near houses analyzed using ground penetrating radar and sap flow techniques. Plant and Soil 219(1-2): 103-115.

Čermák J. and Nadezhdina N. **2000**. Some new methods for studies of root structure and physiology in large trees (in Czech). In: Proc."Elektrina a lesní stromy", Faculty of Nat.History & Pedagog.Faculty, Ostrava Univ., Ostrava, Czech Rep. 5-13 pp., October 11, 2000.

Čermák J. and Nadezhdina N. **2000**. Water relations in mixed versus pure stand. In: Proc. of the International Conference, H.Hasenauer (ed.): Forest Ecosystem Restoration (Ecological and Economical Impacts of Restoration Processes in Secondary Coniferous Forests), pp.70-76, Vienna, Austria, 10-12. April, 2000.

Čermák J. and Prax A. **2001**. Water balance of the floodplain forests in southern Moravia considering rooted and root-free compartments under contrasting water supply and its ecological consequences. Ann.Sci.For. 58: 1-12.

Čermák J. Kučera J. Prax A. Bednářová E. Tatarinov F. Nadezhdin V. **2001**: Long-term course of transpiration in a floodplain forest in southern Moravia associated with changes of underground water table. Ekologia (Bratisl.) Vol.20, Suppl.1: 92-115. (195)

Čermák J. Jimenez M.S. Gonzales-Rodriguez A.M. Morales D. **2002**: Laurel forests in Tenerife, Canary Islands: Efficiency of water conducting system in *Laurus azorica* trees. Trees 16: 538-546.

Čermák J., Kučera J. and Nadezhdina N. **2004**. 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 18: 529-546.

Chiesi M. Maselli F. Bindi M. Fibbi L. Bonora L. Raschi A. Čermák J. Nadezhdina N. **2001**: Calibration and application of forest-BCG in a Mediterranean area by the use of conventional and remote sensing data. Ecological Modeling 154:251-262.

Cienciala E. Lindroth A. Čermák J. Hallgren J-E. Kučera J. **1992**. Assessment of transpiration estimates for *Picea abies* trees during a growing season. Trees 6: 121-127.

Cienciala E. Lindroth A. Čermák J. Hallgren J-E. and Kučera J. **1994**. The effect of water availability on transpiration, water potential and growth of *Picea abies* during a growing season. J.of Hydrology 155: 57-71.

Cienciala E. Kučera J. Lindroth A. Čermák J. Grelle A. Halldin S. **1997**. Canopy transpiration from a boreal forest in Sweden during a dry year. Agricultural and Forest Meteorology 86: 157-167.

- Cienciala,E., Kučera,J., Malmer,A. **2000**: Tree sap flow and stand transpiration of two *Acacia mangium* plantations in Sabah, Borneo. *J.of Hydrology* 236:109-120.
- Edwards WRN. Becker P. and Čermák J. **1996**. A unified nomenclature for sap flow measurements. *Tree Physiol.*17: 65-67. (136)
- Gartner,K., Leitgeb,E., Nadezhdina,N., English,M. and Čermák,J. **2003**: Soil moisture and diurnal variation of sap flow in birch and Norway spruce. Effects of the summer drought 2003. In: Conference on water and society. Needs, Challenges and Restrictions, BOKU Vienna, Nov.19-21,2003. p.59
- Gurtz,A. a Zappa,B. **2000**: Partner final report. In: The response of water flows of the boreal forest region at the Volga's source area to climatic and land use changes. Research report IC15-CT98-0120, Oct.2000.Hinckley,T.M., Brooks,J.R.,
- Heimann J. Čermák J. Kučera J. Gruber F. **1991**. "Measurements of the sap flow rate in spruce in Langen Bramke, Harz (in German). (p.196-200). In: *Berichte des Forschungszentrums Waldekosysteme, Reihe B, Bd.22. Beitrage zur Tagung der Okosystem Forschungszentren in Gottingen vom 24.-26.10.1990.*
- Hinckley TM. Brooks JR. Čermák J. Ceulemans R. Kučera J. Meinzer FC. and Roberts DA. **1993**. Water flux in a hybrid poplar stand. *Tree Physiology* 14: 1005-1018.
- Hruška J. Čermák J. Šustek S. **1999**. Mapping of tree root systems by means of the ground penetrating radar. *Tree Physiology* 19: 125-130.
- Huzulák,J., Štěpánková,M. **1984**: Water potential and saturation deficit of one-year shoots of Norway spruce. In: Vašíček,F. (ed.): "Ecophysiological and ecomorphological studies of individual trees in the spruce ecosystems of the Dražanska vrchovina uplands (Czechoslovakia)" p.64-70. *Folia Univ.Agric.Fac.Silv.A,Brno.*
- Jimenez,M.S., Nadezhdina,N., Čermák,J., Morales,D. **(2000)**: Radial variation in sap flow rate in five laurel forest tree species in Tenerife, Canary Islands. *Tree physiology* 20(17): 1149-1156.
- Janssens IA. Sampson DA. Čermák J. Meiresonne L. Riguzzi F. Overloop S. Ceulemans R. **1999**. Above- and belowground phytomass and carbon storage in a Belgian Scots pine stand. *Ann.For.Sci.* 56:81-90.
- Jimenez MS. Morales D. Kučera J. and Čermák J. **1999**. The annual course of transpiration in a laurel forest of Tenerife. Estimation with *Myrica faya*. *Phyton* 39(4): 85-90.
- Jimenez,M.S., Nadezhdina,N., Čermák,J., Morales,D. **(2000)**: Radial variation in sap flow rate in five laurel forest tree species in Tenerife, Canary Islands. *Tree physiology* 20(17): 1149-1156.
- Janssens IA. Sampson DA. Čermák J. Meiresonne L. Riguzzi F. Overloop S. Ceulemans R. **1999**. Above- and belowground phytomass and carbon storage in a Belgian Scots pine stand. *Ann.For.Sci.* 56:81-90.
- Jimenez MS. Čermák J. Kučera J. Morales D. **1996**. Laurel forests in Tenerife, Canary Islands: The annual course of sap flow in *Laurus* trees and stand. *J.of Hydrology* 183(3-4): 305-319.
- Jimenez MS. Morales D. Kučera J. and Čermák J. **1999**. The annual course of transpiration in a laurel forest of Tenerife. Estimation with *Myrica faya*. *Phyton* 39(4): 85-90.
- Jimenez,M.S., Nadezhdina,N., Čermák,J., Morales,D. **(2000)**: Radial variation in sap flow rate in five laurel forest tree species in Tenerife, Canary Islands. *Tree physiology* 20(17): 1149-1156.
- Kostner,B., Falge,E., Alsheimer,M., Geyer,R. & Tenhunen,J.D. **1998**: Estimating tree canopy water use via xylem sapflow in an old Norway spruce forest and a comparison with simulation-based canopy transpiration estimates. *Ann.Sci.For.* 55:125-139.
- Kostner B. Granier A. Čermák J. **1998**. Sap flow measurements in forest stands-methods and uncertainties. *Ann. Sci. For.* 55:13-27.
- Kravka M. Krejzar T. and Čermák J. **1999**. Water content in stem wood of large pine and spruce trees in natural forests in central Sweden. *Agricultural and Forest Meteorology* 98-99: 555-562.
- Krejzar.T. and Kravka,M. **1998**: Sap flow and vessel distribution in annual rings and petioles of large oaks. *Lesnictvi-Forestry* 44(5):193-201.
- Kučera J. **1977**. "A system for water flux measurements in plants" (in Czech). Patent (Cert.of authorship) CSFR No.185039 (P.V. 2651-1976).
- Kučera J. Čermák J. Penka M. **1977**. Improved thermal method of continual recording the transpiration flow rate dynamics. *Biologia Plantarum (Praha)* 19(6): 413-420.
- Leitgeb,E., Gartner,K., Nadezhdina,N., English,M., Čermák,J. **2002**: Ecological effects of pioneer species on soil moisture regime in an early successional stage, following wind-throw in a spruce stand. *Proceedings of the IUFRO Conference on Restoration of Boreal and Temperate Forests. Vejle, Denmark, May 2002. Gardiner,E.S., Breland,L.J. [Comp.] Reports / Skov & Landskab, (11): 193-194.*
- Lindroth A. Čermák J. Kučera J. Cienciala E. Eckersten H. **1995**. Sap flow by heat balance method applied to small size *Salix*-trees in a short-rotation forest. *Biomass and Bioenergy, Elsevier Sci.,Ltd. Vol.8,No.1:7-15.*
- Martin TA. Brown K. Čermák J. Ceulemans R. Kučera J. Meinzer R. Rombolt J. Sprugel D. and Hinckley TM. **1997**. Crown conductance and tree and stand transpiration in a second-growth *Abies amabilis* forest. *Can.J.For.Res.* 27(6): 797-808.
- Meiresonne L. Nadezhdina N. Čermák J. Van Slycken J. Ceulemans R. **1999**. Transpiration of a monoclonal poplar stand in Flanders (Belgium). *Agricultural and Forest Meteorology* 96: 165-179.
- Meiresonne L, D.A. Sampson, A.S. Kowalski, I.A. Janssens, N. Nadezhdina, J. Čermák, J. Van Slycken and R. Ceulemans. **2003**. Water flux estimates from a Belgian scots pine stand: a comparison of different approaches. *J.of Hydrology, 270(3-4): 230-252.*
- Morales D. Gonzalez-Rodriguez AM. Čermák J. & Jimenez MS. **1996**. Laurel forests in Tenerife, Canary Islands: The vertical profiles of leaf characteristics. *Phyton (Horn, Austria)* 36(2):1-13.
- Morales D. Jimenez MS. Gonzalez-Rodriguez AM. and Čermák J. **1996**. Laurel forests in Tenerife, Canary Islands: I.The site stand structure and leaf distribution. *Trees* 11: 34-40.
- Morales D. Jimenez MS. Gonzalez-Rodriguez AM. and Čermák J. **(1996)**. Laurel forests in Tenerife, Canary Islands: II. Leaf distribution patterns in individual trees. *Trees* 11: 41-46.
- Morales D. Jimenez MS. Gonzalez-Rodriguez AM. Čermák J. **2002**: Laurel forests in Tenerife, Canary Islands: Vessel distribution in stems and in petioles of *Laurus azorica* trees. *Trees* 16: 529-537.
- Nadezhdina N. Čermák J. **1997**. Automatic control unit for irrigation systems based on sensing the plant water status. *An.Inst.Sup.Agronom.,* 46: 149-157.
- Nadezhdina N. Čermák J. Nadezhdin V. **1998**. Heat field deformation method for sap flow measurements. *Proc. 4th. International Workshop on Measuring Sap Flow in Intact Plants. Židlochovice, Czech Republic, Oct.3-5, 1998. 72-92 pp. IUFRO Publ. Publ. house of Mendel Univ.Brno.*
- Nadezhdina N. Čermák J. **1998**. Response of sap flow rate along tree stem and coarse root radii to changes of water supply. (p.81) In: *Proc.Internat.Symp. "The supporting roots - structure and function" (A.Stokes, ed.), Bordeaux, France, 20-24 July 1998.*
- Nadezhdina N. and Čermák J. **1998**. "The technique and instrumentation for estimation the sap flow rate in plants". Patent No.286438 (PV-1587-

98).

- Nadezhdina N. **1999**. Sap flow index as an indicator of plant water status. *Tree Physiology* 19: 885-891.
- Nadezhdina N. and Čermák J. **1999**. Responses of sap flow rate along tree stem and coarse root radii to changes of water supply. *Plant and Soil* 12:1-12. (In: Proc. The Supporting Roots of Trees and Woody Plants: Form, Function and Physiology, A.Stokes, ed., pp.227-238, Kluwer Acad.Publ., Dordrecht-Boston-London, 430 p.).
- Nadezhdina N. **1999**. Woody plant behavior and stress assessment based on sap flow measurement. Application in forestry and horticulture. Assoc.Prof.Thesis at the Mendel University of Agric.and Forestry in Brno, Czech Rep., 118p.
- Nadezhdina N. Jimenez MS. Čermák J. Morales D. **2000**. Changes in sap flow rate along radius in laurel forest trees of different social positions in Tenerife, Canary Islands. *Ann.Sci.For.* (submitted).
- Nadezhdina N. and Čermák J. **2000**. Changes in sap flow rate in tree trunks and roots after mechanical damage. pp.167-175. In: Proc.Int.Conf., Spruce Monocultures in Central Europe - Problems and Prospects. (Klimo,E., Hager,H. and Kulhavý,J. (eds.). 22-25 June, 1998. EFI Proceedings No.33: 167-175, 2000.
- Nadezhdina N. Čermák J. Tributsch H. **2000**. Heat field around the linear heater used for sap flow measurement by the HFD-method as observed by the infra-red camera. 155-161pp. In: 5th International Workshop on Measuring Sap Flow in Intact Plants. Tognetti,R. and Raschi A. (eds.), Firenze, Italy, 9-10 Nov.2000. Fondazione per la Meteorologie Applicata, 2003.
- Nadezhdina N. Čermák J. Ceulemans R. **2002**: Radial pattern of sap flow in woody stems related to positioning of sensors and scaling errors in dominant and understorey species. *Tree Physiology* 22:907-918.
- Nadezhdina, N. and Čermák, J. **2003**: Instrumental methods for studies of structure and function of root systems in large trees. *J.of Experimental Botany* 54 (387): 1511-1521.
- Nadezhdina N, Čermák J, Neruda J, Prax A, Ulrich R, Nadezhdin V, Gašpárek J, Pokorný E. **2004**: Roots under the load of heavy machinery in spruce trees. *European J.For.Res.* (in press)
- Nadezhdina N. Tatarinov F. Ceulemans R. **2004**. Leaf area and biomass of *Rhododendron* understorey in a stand of Scots pine. *Forest Ecology and Management* 187: 235-246.
- Nadezhdina N., Čermák, H. Tributsch. **2004**. Infra-red images of sap flow in stems of lime trees under natural and experimental conditions. *Ann.Sci.For.*61: 203-213.
- Nadezhdina N, Ferreira M.I, Silva R, Pacheco C.A, Meiresonne L, Minnaert M, Gartner K. **2004**: Variable function of tree root systems depicted through long-term sap flow observations in roots and different stem xylem layers. In: COST E38 Proc. Woody Root Processes under a Changing Environment, Radoglou P. (ed.), p.31, Thessaloniki-Greece, 27-20.October 2004.
- Nadezhdina,N., Čermák,J., Nadezhdin,V., Gašpárek,J., Ulrich,R., Neruda,J. **2004**: Roots under the load of heavy machinery in spruce trees. II. Responses of sap flow in stems and roots. *European J. of Forest Research* (submitted).
- Oltchev,A. **2000**: Partner final report. In: The response of water flows of the boreal forest region at the Volga's source area to climatic and land use changes. Research report IC15-CT98-0120, Oct.2000.
- Oltchev,A., Čermák,J., Nadezhdina,N., Tatarinov,F., Tischenko,A. , Ibrom,A. and Gravenhorst,G. **2002**: Transpiration of a mixed forest stand: field measurements and simulation using SVAT models. *Boreal Environ.Research*, 7(4):389-397.
- Oltchev,A., Čermák,J., Gurtz,J., Tischenko,A., Kiely,G., Nadezhdina,N., Zappa,M., Lebedeva,N., Vitvar,T., Albertson, J.D., Tatarinov,F., Tischenko,D., Nadezhdin,V., Kozlov,B., Ibrom,A., Vygodskaya,N., Gravenhorst,G. **2002**: The response of the water fluxes of the boreal forest region at the Volga's source area to climatic and land-use changes. *Physics and Chemistry of the Earth* 27: 675-690.
- Pallardy SG. Čermák J. Ewers FW. Kaufmann MR. Parker WC. and Sperry JS. **1995**. Water transport dynamics in trees and stands. In: Smith PG. and Hinckley TM. (eds.): *Resource Physiology of Conifers - Acquisition, Allocation and Utilization*, p.301-389. Acad.Press. San Diego, N.York, Boston, London, Sydney, Tokyo, Toronto.
- Penka M. Štěpánek V. Čermák J. (1972). A study of the water regime in oak (*Quercus robur* L.). *Acta Univ.Agric. (Brno)*, Ser.C, 42: 121-137.
- Penka M. Čermák J. Deml M. **1973**. Water transport estimates in adult trees based on measurement of heat transfer by mass flow. *Acta Univ.Agric. (Brno)*, Ser.C, 42: 3-23.
- Penka M. Čermák J. Palát M. **1976**. Behavior of the transpiration flow rate and its variations due to weather conditions observed in full-grown tree of *Prunus avium* L. *Acta Univ.Agric. (Brno)*, Ser.C, 45(3-4): 123-147.
- Penka M. Čermák J. Štěpánek V. Palát M. **1979**. Diurnal courses of transpiration rate and transpiration flow rate as determined by the gravimetric and thermometric methods in a full-grown oak tree (*Quercus robur* L.). *Acta Univ.Agric. Brno*, Ser C,48(1-4):3-30. Penka M.
- Čermák J. Prax A. Úlehla J. Židek V. **1983**. "Water consumption of oak (*Quercus robur* L.) in the alluvium of the Dyje river in non-limiting moisture conditions" (in Czech). *Lesnictví-Forestry* 29(6): 481-496.
- Phillips,N.G., Ryan,M.G., Bond,B.J., McDowell,N.G., Hinckley,T.M. and Čermák,J. **2003**. Reliance on stored water with tree size in three species in the Pacific Northwest. *Tree Physiology* 23: 237-245.
- Pietsch S. Hasenauer H. Kučera J. and Čermák J. **2003**: Modelling the effects of hydrological changes on the carbon and nitrogen balance of oak in floodplains. *Tree Physiology* 23: 735-746.
- Prax,P. and Čermák,J. **2003**: Urban tree root systems and tree survival near sewers and another constructions. 1-10pp. In: Proc. NATO ARW Enhancing Urban Environment: Environmental Upgrading of Municipal Pollution Control Facilities and Restoration of Urban Waters. Rome, Italy, Nov.5-8, 2003.
- Rychnovská M. Čermák J. Šmíd P. **1980**. Water output in a stand of *Phragmites communis* Trin. A comparison of three methods. *Acta Scientia Naturalis (Brno)* 14(2): 1-27.
- Schulze E-D. Čermák J. Matyssek R. Penka M. Zimmermann R. Vašíček F. Gries W. Kučera J. **1985**. Canopy transpiration and flow rate fluxes in the xylem of the trunk of *Larix* and *Picea* trees-a comparison of xylem flow, porometer and cuvette measurements. *Oecologia(Berlin)*66:475-483
- Smith,D.M., Allen,S.J. **1996**: Measurement of sap flow in plant stems. *J.Exp.Bot.* 47(305): 1833-1844.
- Stokes A. Fourcaud T. Hruška J. Čermák J. Nadezhdina N. Nadezhdin V. Praus L. **2002**: An evaluation of different methods to investigate root system architecture of urban trees *in situ*. I. Ground penetrating radar. *Journal of Arboriculture* 28-1:1-9.
- Šustek S. Druckmuller F. **1999**. "Application of image analysis for selection of planting material in forestry" (in Czech). *Lesnictví-Forestry* 45(1): 48-50.
- Šustek S. Hruška J. Druckmuller M. Michalek T. **1999**. "Root surfaces in the large oak tree estimated by image analysis of the map obtained by the ground penetrating radar" (in Czech). *Lesnictví-Forestry* 45(3): 139-143.
- Swanson,R.H. **1994**: Significant historical development in thermal methods for measuring sap flow in trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 72:113-132.
- Tatarinov F. Čermák J. **1999**. Daily and seasonal variation of stem radius in oak. *Ann.Sci.For.* 56: 579-590.

Tab. 1

Studie vodního provozu a architektury stromů a lesních porostů prováděné Ústavem ekologie lesa Mendelovy zemědělské a lesnické univerzity v Brně v České republice a v zahraničí (významnější lokality).

Lokality	Druhy	Roky
Česko - Soběšice	Quercus petraea, Betula alba	1973-1977
-“-	Pseudotsuga, Quercus, Pinus sylv., Tilia cor., Acer pseud.	2000-2004
- Lednice	Quercus robur, Fraxinus excelsior, Tilia cordata	1972-1998
- Lanžhot	Quercus robur, Fraxinus excelsior	1998-2000
- Rajec	Picea abies	1978-1999
- Liběchovka	Pinus sylvestris, Betula alba	1979-1980
- Hodonín	Quercus robur	1980-1981
- Hartvíkov	Picea abies	1977
- Želízy	Pinus sylvestris	1978
- ŠLP Křtiny	Picea abies, Fagus sylvatica	2001-2004
- Trnávka	Picea abies	1978
- Nedamov	Picea abies, Quercus robur	1981-1985
- Světlá n/S.	Picea abies	1985-1986
- Křivoklátsko	Quercus petraea, Picea abies	1988-1990
- Litovelsko	Quercus robur, Tilia cordata	1998-1999
Německo - Bayerwald:	Larix europaea, Picea abies	1983
- Hartz:	Picea abies	1988-1992
- Gottingen:	Quercus petraea, Fagus sylvatica	2000
- Harz-	Picea abies	1988
- Harz-	Picea abies, Fagus sylvatica	2003
- Ulm	Picea abies, Fagus sylvatica	2004
Švédsko - Skogaby:	Picea abies	1992
- Uppsala:	Salix alba	1993
- Uppsala:	Picea abies, Pinus sylvestris	1994-1998
- Simlångsdalen	Picea abies, Fagus sylvatica, Quercus petraea	2002
Holandsko - Kotveik:	Pseudotsuga taxifolia	1992
Španělsko - Tenerife-Garcia	Laurus azorica, Persea indica, Myrica faya,	1992-1998
-“-	Ilex perado, Erica arborea,	
- Tenerife-Naran	Vitis vinifera, five species of fruit trees	1999
- Pyreneas	Quercus pubescens	2004
Švýcarsko - Hegiwald:	Fagus sylvatica	1989
Itálie - Radicondoli:	Quercus pubescens, Q.cerris, Pinus pinea, Cupressus,	1997-1999
- San Vito	Picea abies	1995
- Andria	Olea europea	2002-2003
Belgie - Brasschaat	Pinus sylvestris, Prunus, Rhododendron,	1995-2000
- Balegem	Populus interamericana	1997
- Wilrijk	Populus tremula, Quercus robur	2000,2004

Rusko	- prameny Volhy:	Picea abies, Populus trem., Betula al., Alnus inc, Sorbus au.,	1999-2000
USA	- Harvard Forest:	Quercus rubra, Betula sp., Acer sp.	1991-1992
	- Cedar river WA:	Abies amabilis	1994
	- Wind river WA:	Pseudotsuga taxifolia	1996
	- Olympia WA:	Picea mariana	1999
Rakousko	- Kreisbach:	Picea abies, Fagus sylvatica	2000
	- Furstenfed.	Betula alba, Picea abies, Populus tremula	2001-2004
Portugalsko	- Atalaia	Prunus persica, Vitis vinifera	2001
	- Rio Frio	Quercus suber	2002-2003
Slovinsko	- Brčko	Picea abies, Fagus sylvatica	2003
