

**Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta
Ústav geologie a paleontologie**

**Charles University in Prague, Faculty of Science
Institute of Geology and Palaeontology**

Doktorský studijní program: Geologie se zaměřením
Ph.D. study program: Geology with specialisation

Autoreferát dizertační práce
Summary of the Ph.D. Thesis



***Studium fosilních dřev pomocí moderních analytických metod:
případové studie***

Study of fossil wood by modern analytical methods: case studies

RNDr. Petra Matysová

Školitel/Supervisor:
RNDr. Jakub Sakala, Ph.D.

Konzultant/Consultant:
Ing. Ivana Sýkorová, DrSc.

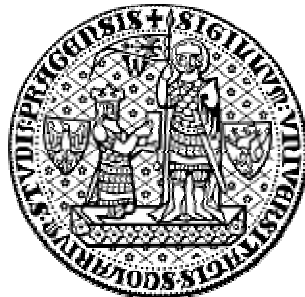
Praha, červen 2016

**Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta
Ústav geologie a paleontologie**

**Charles University in Prague, Faculty of Science
Institute of Geology and Palaeontology**

Doktorský studijní program: Geologie se zaměřením
Ph.D. study program: Geology with specialisation

Autoreferát dizertační práce
Summary of the Ph.D. Thesis



***Studium fosilních dřev pomocí moderních analytických metod:
případové studie***

Study of fossil wood by modern analytical methods: case studies

RNDr. Petra Matysová

Školitel/Supervisor:
RNDr. Jakub Sakala, Ph.D.

Konzultant/Consultant:
Ing. Ivana Sýkorová, DrSc.

Praha, červen 2016

Abstrakt

Zkřemenělá dřeva, která se řadí mezi permineralizované rostliny v trojrozměrné podobě, jsou odjakživa předmětem studia paleobotaniků. V jiných vědních disciplínách je jejich význam obvykle podceňován, jejich mineralogie a geochemie je málo známá a tudíž není vztahována ani k dalším známým faktům z jiných oborů. Kamenný vzhled a vlastnosti zkřemenělého dřeva jsou ceněny hlavně na mineralogických burzách. Pokud chceme více pochopit tafonomii těchto dřev a mechanismus jejich vzniku a zachování a poznat paleoprostředí, ze kterého tyto fosilie pocházejí, je nutný celostní přístup.

Tato disertační práce si klade za cíl odhalit možnosti instrumentálních analýz permineralizovaných dřev a navrhnout nevšední postupy zkoumání vzorků dřev. Petrograficky a geochemicky byly analyzovány a porovnávány vzorky pennsylvanského až pozdně triasového stáří z několika lokalit z České republiky, Německa, Brazílie, Ománu, Mongolska, USA – Arizony, Francie a Antarktidy.

Vybrané vzorky, jež byly povětšinou taxonomicky určeny, byly zkoumány kvalitativně a kvantitativně s pomocí detailního zobrazování a analytických metod. Byly prováděny jejich objemové (XRD) a bodové analýzy. Vzhledem k tomu, že jsou studované vzorky vysokého stáří, krystalinita SiO_2 v nich obsaženého je taktéž vysoká (podle výsledků z rentgenové difrakce byl α -křemen převažující složkou). Celkem neobvyklý metastabilní polymorf SiO_2 – moganit – byl detekován v koncentracích do 20% a jeho výskyt pravděpodobně souvisí s vulkanismem či evaporitickým prostředím.

Jako nejefektivnější technika studia se osvědčila horká katodoluminescence (CL), jež rychle zobrazila heterogenitu uvnitř vzorků, zvýraznila různé fáze silicifikace, druhotné přetisky, přítomnost neobvyklých minerálních příměsí, částečné kalcifikace či fosfatizace a alochtonní sedimentární zrna. CL spektroskopie byla použita k identifikaci různých CL emisí a přesnějšímu popisu luminiscence. Katodoluminescence se stala odrazovým můstkem pro další instrumentální bodová měření (SEM/EMPA, LA-ICP-MS, Ramanova spektroskopie), která probíhala již detailněji a pod větším zvětšením. Díky kombinaci různých analytických technik se v jednom vzorku podařilo identifikovat wakefieldit, vzácný vanadičnan, který byl tímto ve fosilním dřevě nalezen poprvé. Vzorek pochází z východních Čech, z oblasti s doloženým vulkanismem a výskytem menších rudních ložisek. Okolní křemenná hmota se zachovanou strukturou dřeva ve vzorku vykazovala výraznou geochemickou heterogenitu a dosvědčila migraci iontů vzácných zemin a vanadu během diagenese.

Zde předložený analytický přístup k fosilním dřevům nám umožňuje rozlišit aluviální a vulkanický způsob prokřemenění (silicifikace). Mohl by být použit jako výchozí bod pro další výzkum v celosvětovém měřítku, jehož výsledkem by mohla být rozsáhlá databáze materiálových signatur takto permineralizovaných materiálů. Současně by mohla vzniknout databáze CL odstínů křemenné hmoty ve fosilních dřevěch, jež by pomohla k hlubšímu porozumění procesu silicifikace dřeva probíhajícímu v různých (paleo-)environmentálních prostředích a po různě dlouhou dobu.

1. ÚVOD

Rostlinné fosílie přitahují pozornost paleobotaniků a široké veřejnosti po staletí, fakticky od doby, kdy je člověk poprvé objevil. Patří do skupiny tzv. pravých fosilií, zejména ve formě slisovaných zbytků, či nepravých fosilií (otisky, výplně, odlitky), přičemž reprezentují různé rostlinné orgány (Jones & Rowe 1999, Dernbach et al. 2002, Taylor et al. 2009). Prokřemenělé (silicifikované) “dřevo” je odlišná, mnohem hmotnější a robustnější forma tzv. pravé fosílie zachovaná ve trojrozměrné podobě (‘permineralizovaná’ fosílie). Obvykle jde o stonky, kořeny či větve stromovitých rostlin (často jejich fragmentů), které jsou člověkem ceněny přinejmenším stejně jako jiné druhy fosilií. Přidanou hodnotou prokřemenělin je jejich krása, zejména na vyleštěném řezu. Mezinárodní trh s fosilními dřevy dokládá tuto skutečnost a díváme-li se na tuto problematiku z jiné perspektivy, je to především velký byznys. Tato práce se zabývá prokřemenělými “dřevy”, která jsou velmi stará, pocházejí až z pozdního paleozoika, z doby, kdy první vegetace kolonizovala pánevní nížiny, aluviální plošiny či první pahorkatiny (Falcon-Lang et al. 2009). Tyto dnes již vyhynulé rostliny byly zachovány prokřemeněním ve dvou hlavních prostředích; jakožto celé ekosystémy pohřbené *in situ* během katastrofických událostí (tzv. T⁰ společenstva), anebo jako jednotlivé kusy transportované vodou (řeky, povodně), zbavené kůry, rozpadlé na části a rozseté daleko od místa jejich původního růstu, uložené v říčních náplavech, případně vlivem dalších tafonomických mechanismů v mladších sedimentech (Philippe et al. 2000).

Navzdory současnému výzkumu existuje kolem procesu prokřemenění (silicifikace) dřeva stále mnoho nezodpovězených otázek. Interakce mezi rostlinným tělem a minerální fází, vlivy zvodnělého prostředí, vulkanismu, mikrobů atd. nejsou zcela rozšířeny. Kdybychom dokázali říci s jistotou více, mohli bychom prokřemenělá dřeva použít jako indikátory paleoprostředí v celosvětovém měřítku. Absolutní většina vědeckých studií zabývajících se výzkumem těchto rostlinných zbytků vypadajících jako kámen se orientovala úžeji na systematickou paleobotaniku (morfologii, anatomii, taxonomii, či xylotomii). Skvělé shrnutí podali Taylor et al. (2009). Tyto prokřemenělé fosílie byly výhradně použity v paleobotanických rekonstrukcích, protože zachovávají složitou rostlinnou anatomii ve 3D podobě; to je jeden z mála existujících přímých důkazů pravěké vegetace a její fyzické formy blížící se té reálné. Naštěstí se v posledních dekádách objevují ve větší míře také studie, které pracují s těmito nálezy z hlediska paleontologie *sensu lato*, tzn. z pohledu paleoekologie, paleoklimatologie, sedimentologie či tafonomie (viz např. Francis 1984, Rex 1986, Rex & Scott 1987, Fielding & Alexander 2001, Cúneo et al. 2003, Parrish & Falcon-Lang 2007, Taylor & Ryberg 2007, Wagner & Mayoral 2007, Colombi & Parrish 2008, Pfefferkorn et al. 2008, Falcon-Lang et al. 2009, Falcon-Lang et al. 2011, Rößler et al. 2012, Capretz & Rohn 2013, Luthardt et al. 2016), ve kterých autoři berou v potaz také prostorové a paleoenvironmentální aspekty fosilních nalezišť.

Permineralizace je velmi jedinečný proces. Co způsobilo, že rostlinné tělo neshnilo či se nerozložilo a nerecyklovalo, ale naopak zůstalo zachováno v původním tvaru včetně vnitřních a vnějších struktur po statisíce, miliony let? Permineralizovaná dřeva většinou více připomínají kus kamene (křemen, kalcit, fosfát, pyrit apod.) než kus nějaké pradávnejší rostliny, obzvláště pokud došlo k silné rekrytalizaci. Měli bychom věnovat více pozornosti právě minerálním fázím zodpovědným za zachování pradávnejších rostlin. Co se týče přímo zkřemenělin, je to fáze oxidu křemičitého (SiO₂), která umožnila zachování rostlinných pletiv, zejména díky své tvrdosti a odolnosti vůči zvětrávání. Křemen a většina polymorfů SiO₂ jsou

v běžných paleoenvironmentálních podmínkách termodynamicky stabilní. Přestože rekrytalizace vzorku může být vysoká a jemné anatomické detaily nemusí být pozorovatelné, existující mineralogické fáze nesou informaci, která může být interpretována v širším kontextu. Každá minerální fáze je výsledek teplotně-tlakově-prostorově-časových podmínek. Každá má také specifické chemické a izotopové složení, jež odráží zdrojová fluida specifických koncentrací (může obsahovat inkluze apod.). I díky tomuto může být zajímavým předmětem studia.

Překvapivě málo vědeckých publikací se zabývá studiem mineralogických fází v permineralizacích moderními instrumentálními technikami (např., [Sigleo 1979](#); [Scurfield 1979](#); [Scurfield & Segnit 1984](#); [Dietrich et al. 2000a,b, 2001](#); [Götze et al. 2001](#); [Scott & Collinson 2003](#); [Witke et al. 2004](#); [Polgári et al. 2005](#); [Hatipoğlu & Türk 2009](#); [Sweeney et al. 2009](#); [Läbe et al. 2012](#)) v porovnání s tisíci publikacemi zaměřenými na (systematickou) paleobotaniku. Několik málo studií se zabývá analýzou zbylého uhlíku v jinak převážně anorganickém prokřemeněném materiálu (např. [Sigleo 1978](#); [Dietrich et al. 2000b, 2001, 2013](#); [Nestler et al. 2003](#); [Sweeney et al. 2009](#)). V bývalém Československu [Skoček \(1969, 1970, 1974\)](#) představil svou průkopnickou práci environmentálního/mineralogického charakteru. Na druhou stranu existují moderní studie, až příliš jednostranně zaměřené na úzce tematickou instrumentální analýzu fosilního dřeva, které při interpretaci výsledků téměř nezohledňují také biologické (anatomické) stránky studovaného fosilního materiálu (např. [Kuczumow et al. 2000](#), [Nowak et al. 2005](#), [Yoon & Kim 2008](#)).

2. CÍLE PRÁCE

Hlavním cílem této doktorské práce je překonávat bariéry mezi disciplínami, a to zejména směrem k minerálnímu aspektu rostlinných fosilií, tzn. způsobu zachování. V této práci byly studovány 3D pravé fosílie (tzn. nikoliv výlitky apod.) permineralizované převážně SiO_2 , jež je doprovázen často jinými minerálními fázemi, jako např. oxidy železa, karbonáty, sulfidy, fluoridy, fosfáty a dokonce i vanadáty. Vzorky byly části stonků (stélé), části druhotného dřeva stromovitých rostlin jako byly první gymnospermy – kordaity a konifery. Tyto se řadí mezi nejčastěji dochovaná fosilní dřeva “prvohorních gigantů”, dále to byly části stélé stromovitých přesliček, kapradin, medulóz aj. Vzorky byly převážně pennsylvanského až spodně permského stáří, ale do studijní sady bylo zahrnuto i několik raně druhohorních vzorků.

Hlavní cíle práce byly definovány následovně:

- (i) přispět k porozumění petrografických, mineralogických, geochemických, a katodoluminiscenčních signatur ve studovaných rostlinných fosiliích (ideálně taxonomicky určených morfotaxonech) za použití několika nezávislých zobrazovacích a analytických technik, jako např. CL, SEM, EMP, XRD, LA-ICP-MS, a Ramanovy spektroskopie;
- (ii) objasnit vzájemný vztah mezi původní rostlinnou anatomií a petrograficky-mineralogickými charakteristikami anorganické hmoty, tj. porozumět módu permineralizace;
- (iii) otestovat horkou katodoluminiscenci a její limity při studiu prokřemenělých dřev;

- (iv) uskutečnit taková pozorování (viz body i-iii) na vzorcích z několika českých a světových lokalit a interpretovat výsledky ve vztahu k dostupným paleobotanickým, geologickým, sedimentologickým, a paleoenvironmentálním datům, s cílem vytvořit 'testovací sadu' pro další srovnání do budoucna;
- (v) zmapovat metastabilní fáze SiO₂ ve zkřemeněném dřevu, jako je např. opál či moganit, a zkusit zjistit, zda jejich přítomnost souvisí se stářím vzorku či s průběhem silicifikace;
- (vi) prozkoumat velmi nezvyklé geochemické vlastnosti vzorku E6362, které byly patrné od prvních měření v rámci magisterské práce (Matysová 2006) a rozšifrovat velmi výrazný vzor katodoluminiscenčního obrazu a pravděpodobnou migraci prvků ve hmotě SiO₂, zodpovědnou za "vybělení" části dřeva.

Tyto postupy a získané výsledky by měly poskytnout další vodítka (proxy) k charakteristice paleoprostředí, ve kterém byly původní rostliny pravděpodobně fosilizovány.

3. MATERIÁL A METODY

Vhodný způsob vzorkování a příprava vzorku (Jones & Rowe 1999, Dernbach et al. 2002, Taylor et al. 2009) je stejně tak důležitým krokem jako následné analýzy. Obvykle potřebujeme rozhodnout hned na začátku – co chceme vzorkovat a proč a kam bychom rádi směřovali další výzkumnou činnost (inspiraci k pokládání výzkumných otázek nalezneme v práci Bennington et al. 2009). Samozřejmě je rozdíl, zda máme k dispozici vzorek z muzea, ze kterého máme dovoleno si vzít co nejmenší kousek k analýze (pokud vůbec nějaký), anebo zda máme možnost si nasbírat materiál v terénu sami a nejsme ničím omezovali. Je potřeba vždy vše dopředu zvážit a dále vybrat adekvátní techniky k analýze. Při analyzování vzorku je žádoucí zkombinovat více různých metod, a následně porovnat či nejlépe odsouhlasit výsledky, než použít pouze jednu metodu.

NÁZEV INSTRUMENTÁLNÍ METODY	PŘÍPRAVA VZORKU	TYP	PUBLIKACE
<i>Optická mikroskopie (PPL, XPL)</i>	výbrusy	nd, i	1 - 5
<i>Mikroskopie v odraženém světle</i>	nábrusy, vyleštěné plochy	nd, i	2, 4
<i>Horká katodoluminiscenční mikroskopie (CL)</i>	výbrusy, pokovené	nd, i	1 - 5
<i>Katodoluminiscenční spektroskopie</i>	výbrusy, pokovené	p, nd, ql	2, 4, 5
<i>Skenovací elektronová mikroskopie (BSE, SE)</i>	výbrusy, pokovené	nd, i	1 - 5
<i>Energiově disperzní spektroskopie (EDS)</i>	výbrusy, pokovené	p, nd, sqn	1 - 4
<i>Elektronová mikroanalýza (WDS)</i>	výbrusy, pokovené	p, nd, qn	1, 4, 5
<i>Vysoce rozlišovací CL detektor</i>	výbrusy, pokovené	i	4, 5
<i>Rentgenová difrakční analýza (XRD)</i>	prášek, planár. fragmenty	b, d/nd, qn	1, 2, 4, 5
<i>Ramanova spektroskopie</i>	výbrusy, nepokovené	p, nd/μd, ql	1, 4, 5
<i>Laserová ablace ICP-MS</i>	silnější výbrusy (100 μm)	p, μd	5

Tabulka 1. Zobrazovací a analytické techniky použité při studiu fosilních dřev v této práci. Vysvětlivky: nd – nedestruktivní, μd – mikrodestruktivní, d – destruktivní, i – zobrazovací, ql – kvalitativní analýza, qn – kvantitativní analýza, sqn – semikvantitativní analýza, b – celková a p – bodová analýza.

Shrnutí metod použitých v rámci této práce je v tab. 1. Většina vzorků pochází z muzeí a ze soukromých sbírek. Příprava vzorků k následnému analytickému studiu byla těmito vlastnickými právy omezena, každý dílčí krok úprav vzorku byl fotodokumentován. Většinou byly zhotoveny výbrusy v příčném, někdy i v podélném radiálním a tangenciální řezu. Vždy se začíná optickou mikroskopií, a následně dalšími zobrazovacími technikami, zejména horkou katodoluminiscencí (CL) a SEM. Později byla zajímavá místa podrobena bodové analýze, případně mapování. OM byla použita pro taxonomické (PPL) i petrografické (PPL/XPL) účely. Silnější výbrusy byly připraveny pro laserovou ablaci ICP-MS [5]. Celkové analýzy byly prováděny na výbrusech/nábrusech apod. Pro rentgenovou difrakci (XRD) byly použity odřezky vzorků zbylé po přípravě výbrusů a nábrusů. Práškové vzorky byly analyzovány výjimečně. Několik nábrusů a vyleštěných ploch bylo použito pro studium v odraženém světle. Podrobnosti k metodám jsou v každé publikaci [1-5].

4. VÝSLEDKY A DISKUZE

Tato práce začala studiem izolovaných kusů permineralizovaných “dřev” pozdně pennsylvanského stáří, což jsou relativně běžné rostlinné fosílie nacházené ve variském orogenetickém pásmu Evropy. Existence těchto nálezů odráží sedimentologické a ekologické změny, které se pravděpodobně odehrály na rozhraní karbonu a permu a jsou zaznamenány v sedimentech kontinentálních pánví českého masívu (Skoček 1970, 1974; Opluštil & Cleal 2007; Opluštil et al. 2013). Opluštil et al. (2013) ve své práci pojednává o plošné expanzi tzv. červených vrstev, které jsou uhlí prosté (tzv. *red beds*), směrem k susšímu permu. Zkřemenělá dřeva uložená v červených vrstvách říčních sedimentů líňského souvrství ve středoečeských a západočeských pánvích (Bureš 2011; Holeček 2011; Mencil et al. 2013a,b; Mencil 2014, Sakala 2015, Lojka et al. 2016) jsou taktéž považována za indikátory takovéto změny. Jedná se vlastně o paleoproxy sezónně suché klimatické fáze.

Studované fosílie reprezentují zbytky (fragmenty) stonků pradávných stromovitých rostlin, většinou prokřemenělé (často doprovázené oxidy železa), které se běžně nacházely na polích, kolem říček a potůčků či byly skryty v lesích v říčních uloženinách (alochtonní depozice). Stále ještě je možné při pochůzkách v terénu nalézt výchozy říčních siliciklastik z pozdního paleozoika (nejčastěji arkózy), ve kterých nalezneme přímo uložené fosilní kmeny. Mé první vzorky pocházely z východních Čech. Jako jednu z nejznámějších lokalit lze uvést „Kryštofovy kameny“ ve vnitrosudetské pánvi (Matysová 2004, 2006; Mencil 2007). I přesto, že fosílie odsud často více připomínají křemen než dřevo, přitahovaly pozornost vědců i veřejnosti od pradávna (např. práce H.R. Goepperta z 19. stol.). Většina z nich do dnes postrádá paleobotanické (taxonomické, xylotomické) určení. Důvod byl a je jednoduchý; tyto fosílie jsou velmi špatně, jinými slovy nedostatečně zachovány, aby mohly být taxonomicky určeny, anebo nebyly odborně studovány vůbec. Bohužel dny “bohatých sklizní” takovýchto prokřemenělých dřev velkých rozměrů, např. z oblasti Jestřebích hor, jsou nenávratně pryč (Mencil 2007, 2014). Původně bohatá naleziště byla doslova zdevastována překupníky či sběrateli a hodnotné nálezy odvezeny do ciziny, kde byly draze prodány. Navždy jsme tak ztratili mnoho cenného materiálu k vědeckému studiu, nejen dřev samotných, ale i celé lokality v širší souvislosti (v sedimentologickém a paleoenvironmentálním kontextu). Naštěstí alespoň nějaký zlomek těchto fosilií lze stále nalézt v krajině či

v místních památkách, a potom jsou zde vzorky uložené v muzeích, např. v Nové Pace či v Národním muzeu v Praze, a samozřejmě v soukromých sbírkách.

Dovolu mi vrátit se na začátek; bylo zde velké množství izolovaných kusů zkřemenělých dřev, které nechtěl nikdo studovat, protože se věřilo, že mají téměř nulovou paleobotanickou hodnotu vzhledem ke špatnému zachování pletiv a svou paleoekologickou izolaci. Inspirována pionýrským výzkumem německých kolegů (reference v [Matysové 2006](#), [1]), začala jsem zkušebně zpracovávat 19 muzejních exponátů; výsledky ze sedmnácti z nich byly publikovány v článku [1], [tab. 2, str. 220](#). Vzorky byly zapůjčeny z Národního muzea v Praze, všechny původně pocházejí z východních Čech, konkrétně z pozdně pennsylvanských uloženin v podkrkonošské a české části vnitrosudetské pánve ([Matysová 2006](#); [1], [obr. 1, str. 218](#); [1] [obr. 1, str. 219](#)).

Shrnutí práce publikované v prvním článku; viz příloha [Matysová et al. 2008 – \[1\]](#)

Tato práce vyzdvihuje použití instrumentálních technik při studiu fosilních dřev. Pozornost je věnována souvislostem mezi původní anatomii rostlinných pletiv a způsobem jejich zachování v jejich minerální podobě. Při popisu SiO_2 hmoty byla použita petrografická nomenklatura a morfologická klasifikace [Flörkeho et al. \(1991\)](#). Z rentgenové difrakce je patrné že index krystalinity α -křemene je vysoký, což potvrzuje názor [Moxona \(2002\)](#), že “čím starší vzorek, tím vyšší je jeho krystalinita”. Studijní sada zahrnovala různé morfotaxy (tzn. odlišné systematické skupiny rostlin), jmenovitě stromovité přesličky, kapradiny, kapraďosemenné a primitivní jehličnany ([1] [tab. 2, str. 220](#)). Způsob zachování různých rostlinných pletiv (parenchym, sklerenchym, aerenchym, tracheidy) byl ve studovaných vzorcích proměnlivý ([1] [obr. 2, str. 221](#)).

Poprvé byla na českém materiálu použita technika horké katodoluminiscence (CL), která má očividně velký potenciál při studiu permineralizací vysokého stáří pocházejících z říčních či jezerních/říčních prostředí. Horká CL se ukázala jako bezkonkureční a vysoce efektivní metoda při studiu zdánlivě uniformní SiO_2 hmoty; ze získaných výsledků usuzujeme na nízkoteplotní silicifikaci ([1] [obr. 4, str. 224](#)). Pokud je CL předřazena dalším metodám (SEM/EDX, EPMA apod.), umí rychle odhalit heterogenity v SiO_2 hmotě nezobrazitelné jinými technikami. V některých případech dokonce zvýraznila anatomii původního rostlinného materiálu díky kontrastu CL emisí. Podobně zobrazila tzv. “minerální kapsy”, odhalila částečné kalcifikace apod. ([1] [obr. 5, str. 226](#)). Je to technika velmi vhodná ke studiu složité tafonomie a diagenese fosilních dřev, umí odlišit různé fáze prokřemenění, ukazuje na transport – např. umožňuje srovnání minerálních zrn zachycených v kapsách na rozdíl od zrn z okolního fosiliferního sedimentu a odhaluje jejich odlišný původ.

Hlavní výstupy této práce jsou spojeny s technikou katodoluminiscence:

1. Převažující stabilní červená CL (primární silicifikace) a krátcežijící modrá CL objevující se v poškozených částech dřev, prasklinách apod., jakožto důkaz druhotné fáze silicifikace ([1] [obr. 4, str. 224](#)).
2. Nové CL schéma platné pro naprostou většinu studovaných vzorků z východních Čech. Každému petrografickému typu SiO_2 odpovídá vlastní CL odstín; např. mikrokřemen – červená CL, megakřemen – nahnědlá červená CL, chalcedon – narůžovělá-fialová anebo modravě fialová CL apod. ([1] [tab. 3, str. 225](#)).

3. Tafonomické znaky, jako např. počáteční kalcifikace před silicifikací, „minerální kapsy“ apod. ([1] obr. 5, str. 226).

Později následoval podobný rozbor doprovázený revizí jak taxonomie, tak geologického kontextu fosilních gymnospermních dřev pocházejících z vnitrosudetské pánve (Mencl et al. 2009 – [2]) a kalamitů z podkrkonošské pánve (Sakala et al. 2009 – [3]).

Shrnutí práce publikované ve druhém článku; viz příloha [Mencl et al. 2009 – \[2\]](#)

Během této práce jsme provedli revizi nalezišť a taxonomie tzv. „araukaritů“ z oblasti Ještěbých hor z české části vnitrosudetské pánve ([2] obr. 1, str. 270). Většina silicifikovaného materiálu pocházela ze žaltmanských arkóz odolovského souvrství (stáří barruel) ([2] obr. 2, str. 271). První vědecké záznamy pocházejí z rukou R. Goeperta z druhé poloviny 19. stol. Lokalita byla vydrancována podobně jako v oblasti Kyffhäuseru v Německu (Dernbach et al. 2002). Bylo zpracováno 14 dřev z aluviálních sedimentů (pouhé úlomky druhotného dřeva bez větví a kůry), většina z nich byla nově posbírána v terénu v alochtonních pozicích ([2] tab. 1, str. 272; obr. 3, str. 273), některé byly nalezeny až ve kvartérních uloženinách. Krásné exempláře se dají nalézt zakomponované do místních pomníků a památníků. XRD potvrdila vysokou krystalinitu SiO₂ (α-křemen) ([2] tab. 1, str. 272). V terénu byly měřeny směry uložení kmenů a směry nejdelších os kmenů ([2] obr. 4, str. 274) za účelem zrekonstruovat směr paleoproudů a transport kmenů během ukládání. Převažovaly SZ a ZSZ orientace uložení araukaritů ve výchozech. Kmeny byly kratší než osy bedforem (do 10 metrů) a byly uloženy téměř kolmo ke směr paleoprodu ([2] obr. 4, str. 274). Podle velmi hrubého šterku ve fosiliferních vrstvách usuzujeme na transport během extrémních povodní.

Taxonomická revize byla obtížná kvůli velmi špatnému zachování druhotného dřeva (jediná část rostliny, která se dochovala) a přiklonili jsme se nechat nomenklaturu otevřenou, totiž připsat dřevo k rodu *Dadoxylon* sp. (změna od r. 2014 viz Rößler et al. 2014). Na tracheidách a paprscích jsme našli araukaroidní typ tečkování ([2] obr. 5 a 6, str. 275; obr. 7, str. 276; obr. 8, str. 277), který ukazuje (spolu s dutinou typu *Artisia*) na příbuznost s kordaity. Paleobotanická pozorování byla doprovázena detailní petrografickou a mineralogickou analýzou podobně jako v publikaci [1]. V porovnání se sadou vzorků studovaných v [1], zde bylo vyšší procento domén megakřemene ([2] obr. 9 a 10, str. 278; obr. 11, str. 279).

Katodoluminiscenční zobrazení (7 vzorků) bylo poprvé spojeno se spektrálním měřením, pro tyto účely byly vybrány dva vzorky; oba poskytly velmi dobře interpretovatelná data ([2] obr. 9 a 10, str. 278; obr. 13, str. 283). Ve většině vzorků převažovala červená CL (primární silicifikace) a krátcežijící modrá CL (druhotný přetisk). CL zobrazila alochtonní sedimentární zrna (draselné živce apod.) a sekundární jílové minerály uvnitř dřeva. Ve třech vzorcích dřev jsme nečekaně zaznamenali i přechodnou žlutou CL α-křemene ([2] obr. 9 a 10, str. 278; tab. 2, str. 280). Do té doby byla tato emise známa pouze z permského materiálu z Chemnitz z Německa, který prokřemeněl za vyšších teplot. Tato emise by i zde mohla být důkazem hydrotermálních procesů během hlubšího zanoření fosilie v sedimentární pánvi, přičemž zde, narozdíl od Chemnitz, pocházela tato žlutá CL z megakřemene v druhotně zahojené prasklině uvnitř vzorku dřeva.

Předpokládáme, že vzorky prvních gymnospermních rostlin nacházené alochtonně v říčních náplavech jsou fragmentované části kmenů kordaitů, které kdysi rostly kolem říčních toků, mohly být strženy po proudu během vydatných lijáků a záplav, transportovány vodou, zbaveny kůry, a uloženy do arkózových sedimentů pod hladinou vody.

Shrnutí práce publikované ve třetím článku; viz příloha Sakala et al. 2009 – [3]

V této práci jsme se zaměřili na kalamity pocházející z oblasti kolem Nové Paky (podkrkonošská pánev, ČR). Toto hojné naleziště, a zejména známá lokalita Balka je spojována s vulkanickým ploužnickým obzorem (semilské souvrství, stáří Stefan C). Kalamity představují pouze část rozmanité flóry typické pro tuto lokalitu, kde se předpokládalo hygrofilní společenstvo rostoucí v jezerním/říčním prostředí. Lokalita je také známa výskytem zkřemenělé rašeliny (Mencl et al. 2013, Opluštil et al. 2013). Paleobotanická revize vybraných vzorků kalamitů vedly k identifikaci *Arthropitys* Goeppert (detaily v [3]). Petrografické analýzy potvrdily převažující mikrokrystalický křemen (polyblastické textury), které zachovaly jemné anatomické detaily druhotného dřeva. Makrokrystalický křemen nebo sférolitický chalcedon se také vyskytují hojně a objevují se přednostně jen v některých typech pletiv ([3] obr. 1 a 2, str. 112). V centrálních dutinách, kde se nezachovala žádná rostlinná pletiva, jsou často nalézána zrna detritu, stejně tak jsou nalézána okolo stonků. Vzorky z lokality Balka vykazují specifické geochemické signatury, což bylo patrné z CL měření, a jsou odlišné od vzorků z jiných lokalit (srovnání viz [4]), přičemž nejvíce připomínají signatury materiálu pocházejícího z vulkanických podmínek. Publikované barevné CL schema [1] stejně jako vícestupňová silicifikace (červenavá CL – primární fáze, a krátcežijící modrá CL – sekundární fáze) platí i zde. Navíc, CL v některých případech zvýraznila i původní anatomii tracheid (jejich vícevrstevné stěny), což bylo dále potvrzeno i HR-CL [4]. Celkově konstatujeme, že lokalita Balka, bez ohledu na převažující klimatické podmínky ([2] Fig. 2, p. 271), představuje místně zachované hygrofilní společenstvo rostoucí pravděpodobně v mělkém jezerním či mokřadním prostředí, což je mj. právě dokázáno zbytky prvohorních přesliček a polohami silicifikované rašeliny.

Shrnutí práce publikované ve čtvrtém článku; viz příloha Matysová et al. 2010 – [4]

Stěží můžeme navrhnout nový přístup analýzy fosilií pokud nemáme změřená data z dostatečně širokého souboru vzorků, která by sloužila k vzájemnému porovnání. Ukázalo se jako nezbytné sehnat permineralizované fosilie z podobných či zcela odlišných lokalit, kde panovaly jiné podmínky a jiný průběh tafonomie. Výsledky jsou sumarizovány v publikaci [4]. Sada prokřemenělých dřev z podkrkonošské a vnitrosudetské pánve (ČR) [1-3] byla doplněna o vzorky ze západočeských pánví (CR), Tocantins (Brazílie), Chemnitz (Německo), oblast Huqf (Omán), JZ a JV mongolská riftová zóna (Mongolsko), Petrified Forest National Park (Arizona, USA), centrální masif (Francie) a centrální část transantarktického pohoří (Antarktida) ([4] tab. 1, p. 129; obr. 1, p. 130).

Hlavní pozornost byla věnována mineralogickému složení převážně prokřemenělých vzorků (podobně jako u předchozích prací [1-3]), pozorování bylo prováděno opět s použitím kombinace různých zobrazovacích a analytických technik (OM, XRD, SEM/EDS nebo WDX, Raman a horká CL). V několika vzorcích jsme detekovali metastabilní SiO₂ fáze, jako je moganit a opál-CT. Křemen byl někdy doprovázen chalcedonem (sférolitického či zebroidního typu), goetitem, fluoritem apod. Některé z těchto minerálních fází byly identifikovány také Ramanovou spektroskopií ([4] obr. 2, str. 131; obr. 3, str. 132; tab. 2, str. 136).

Spektrální složky CL, zejména ty SiO₂ fáze, a jejich přesné přiřazení bylo pro hlubší porozumění silicifikace velmi důležité ([4] obr. 4, str. 133; obr. 5, str. 135; tab. 2, p. 136). Převažovaly modravé a červenavé odstíny CL, ale spektrum získaných emisí bylo mnohem širší

a bylo detailněji popsáno v [4] (tab. 3, str. 138). CL odhalila zvláštnosti, jako např primárně fluoritizované pletivo či velmi dobře čitelnou anatomii ve vzorku psaronie, která byla neviditelná OM (s pomocí PPL/XPL) ([4] obr. 7, str. 138). Horká CL mikroskopie spojená se spektroskopií je zde naprosto klíčovou technikou, která odhaluje paleoenvironmentální proxy ([4] tab. 4 & obr. 8, str. 139).

Úspěšně jsme rozlišili následující diagnostické znaky ([4] tab. 4, str. 139):

1. **Silicifikace v říčním sedimentu** (obr. 1). V těchto fosíliích nebyly zjištěny metastabilní formy SiO_2 ale jen dobře krystalický křemen se slabou CL s převládajícím načervenalým odstínem a jen výjimečně modrou nebo modrofialovou CL sekundární křemenné (diagenetické) hmoty. Typické je špatné nebo střední zachování anatomie. Většina fosílií jsou fragmenty pyknoxylického dřeva. Fosílie jsou nalézány v allochtonní pozici, nejčastěji v arkózách nebo arkózových písčítých sedimentech, v nichž jsou živce a nestabilní alumosilikáty považovány za zdroj křemene. Dřevo bylo před uložením fragmentováno a pak vystaveno působení zavodněného sedimentu. Studované vzorky pocházely z pánví České republiky, Sultanátu Omán a státu Tocantins v Brazílii.

2. **Silicifikace ovlivněná vulkanismem** (obr. 2), **se třemi podtypy:**

- a. *s přímým vlivem vulkanismu*: vzorky nalezené *in situ* v (para-) autochtonní pozici, s vyšší druhovou diverzitou a lépe zachovanou anatomii, CL charakteristiky ukazují na hydrotermální původ minerální hmoty ([4] tab. 2, str. 136; tab. 4, str. 139). Vedle α -křemene jsou běžné i výskyty dalších minerálů a metastabilních polymorfů SiO_2 , které odrážejí vícestupňový proces silicifikace. Primární hmoty obvykle emitují žluté odstíny CL připisované hydrotermálnímu křemeni, druhotné přetisky jsou odlišitelné podle krátce žijící modré CL. Fluoritizace je častá. Typová lokalita je v Chemnitz v Německu.
- b. *říční facie asociované s vulkanoklastickými složkami*: mineralogické a CL vzory jsou podobné vulkanickému podtypu (a), anatomie je lépe zachovaná než u vzorků z fluvialního prostředí bez vulkanických složek. Toto platí pro studované vzorky z Arizony, Mongolska a Antarktidy.
- c. *jezerní facie s vlivem vulkanismu*: fosílie z jezerního prostředí představují hygofilní flóru o vyšší diverzitě. Druhotné přetisky (SiO_2 emitující krátcežijící modrou CL) jsou časté. Typová lokalita je Balka, podkrkonošská pánev (ČR), kde jsou nalézány také zkřemenělé rašeliny.

Prokřemenělá dřeva by měla být považována za hodnotné paleoenvironmentální a stratigrafické indikátory. CL charakteristiky ukazují na specifické podmínky při vzniku fosilních dřev. V českých permokarbonských kontinentálních pánvích jsou fosilní dřeva často nacházena jen v určitých vrstvách, kde jejich permineralizace pravděpodobně probíhala pod vlivem sezónně susšího klimatu (střídají se s uhlonosnými vrstvami, které jsou interpretovány jako uložení období stabilního vlhčího klimatu). Tyto interpretace zcela souhlasí s interpretacemi Opluštila & Cleala (2007). Skoček (1970, 1974) a dále Opluštil et al. (2013) uvažují prokřemenělá dřeva, často nacházená mezi šedými a červenými pennsylvanskými jednotkami v kontinentálních českých pánvích, jako markery relativně rychle nastupující aridity. Poslední publikace se zabývá pouze vzorkem E6362 a je pokračováním dlouholeté analytické práce, jejíž prvotní výsledky byly publikovány v [1] a [4].

Shrnutí práce publikované v pátém článku; viz příloha Matysová et al. 2016 – [5]

Tato práce pojednává o analýze poměrně zvláštního prokřemenělého vzorku určeného jako dřevo typu *Agathoxylon* z raného permu z podkrkonošské pánve (ČR) ([5] obr. 1, str. 2). Tento vzorek byl nalezen v r. 1910 nedaleko obce Studenec ve východních Čechách ([5] obr. S1). Rentgenová difrakce potvrdila v celém vzorku dobře krystalický křemen (α -SiO₂). V porovnání s jinými vzorky však tento vykazoval velmi zvláštní katodoluminiscenční obraz ([5] obr. 5, str. 10). Zatímco větší část vzorku byla tvořena hnědavě červenou minerální hmotou v druhotném dřevě, které emitovalo červenou CL (maximum při 643 nm), menší část dřeva byla v hmotě bělavé barvy, “vybělené dřevo” při pozorování v normálním světle, a emitovala krátce žijící modrou luminiscenci. CL maximum při 390 nm ukazuje na hydrotermální původ této křemenné fáze, která má zcela jiný obsah CL aktivátorů/defektů v krystalové mřížce. LA-ICP-MS odhalila rozdíly v chemickém složení α -SiO₂ fází ve všech částech vzorku ([5] tab. 1, str. 6-7). Křemenná fáze je nabožacena prvky vzácných zemin, Y a As. Vybělené dřevo je relativně ochuzeno o U a V, a nabožaceno Al, Li, Rb, Cu, a Sr ([5] obr. 9, str. 15). Předpokládáme, že např. příměsi sodíku (66 ppm Na) v nahnědlé minerální hmotě detekované s pomocí LA-ICP-MS mohou doprovázet tzv. NBOHC centra, tj. Si-O-Si vazby přerušené -OH nebo -ONa skupinami (aktivátory červené CL). Na druhé straně kationtově kompenzovaná Al³⁺ centra [AlO₄/M⁺]⁰, jsou považována za aktivátory krátce žijící modré CL (druhotný přetisk), což bylo potvrzeno vyššími koncentracemi Al³⁺ a Li⁺ ([5] obr. 9, str. 15, tab. 1, p. 6). Nabožacení oběma těmito prvky je typickým důsledkem hydrotermálních procesů, podobně také nabožacení Rb, Cu a Sr.

SEM dokázala odlišit prvotní a druhotné minerální fáze a najít v křemenné matici konglomerát bohatý vanadem ([5] obr. 3-4, str. 8-9). EMP/WDS analýzy ([5] tab. 3, p. 12-13) identifikovaly konglomerát jakožto pevný roztok wakefielditu-(Ce) a wakefielditu-(Y) [(Ce,Y,Nd)VO₄], doprovázený xenotimem-(Y) bohatým na arsen; navíc tyto minerály uzavíraly jednotlivé prokřemenělé tracheidy dřeva. Přítomnost wakefielditu byla potvrzena i rentgenovou mikrodifrakcí ([5] obr. S4) a Ramanovou analýzou ([5] obr. 6, str. 10; tab. 2, str. 11). Takto vzácné minerální nahromadění bylo v prokřemenělém dřevě nalezeno a popsáno poprvé. Chemická variabilita mezi velkými kationty Y, Ce a Nd a menšími tetraedrálně koordinovanými ionty P, As a V wakefielditu a xenotimu je pojednána v [5] (obr. 7, str. 14). Wakefieldit-(Y), wakefieldit-(Ce) a As-obsahující xenotim-(Y) s lehce proměnnou distribucí prvků vzácných zemin ([5] obr. 10, str. 16) v prokřemenělém dřevě očividně vznikly později během diagenese, protože jejich srážení v exogenním prostředí je velmi nepravděpodobné. Mechanismus vysrážení vanadu a jeho vztah k místnímu vulkanismu je diskutován v [5]. Co se týče uranu, byla jím nabožacena pouze část dřeva s nahnědlou minerální hmotou (křemen), a to do 19 ppm. Uvažujeme, že redoxně citlivé prvky U a V, byly ve fosílii na začátku procesu zachycovány organickou hmotou. Samotný průběh silicifikace byl složitý, jeho zjednodušené schéma je znázorněno v [5] (obr. 11, str. 17).

Poznámka k taxonomické nomenklatuře:

V roce 2014 Rößler et al. (2014) doporučuje namísto rodu *Dadoxylon* Endl. (užité i v našich publikacích [1] - [4]) používat rod *Agathoxylon* Hartig.

5. ZÁVĚRY

- (i) Kombinace zobrazovacích (PPL/XPL, CL, SEM/BSE/SE) a analytických technik (XRD, Raman, EMP/WDS, LA-ICP-MS) je velmi užitečný a efektivní nástroj při studiu prokřemenělých (silicifikovaných - permineralizovaných) dřev, jež poskytuje podklad pro hodnocení způsobu zachování v různých sedimentárních prostředích. Stále zde však zůstává mnoho nezodpovězených otázek ohledně procesu přechodu rozpuštěných forem SiO_2 ke konečné tuhé křemenné matici a zároveň kolem specifické role rostlinného pletiva během této přeměny;
- (ii) Podle rozmanitého anatomického uspořádání rostlinných pletiv ve stoncích nejčastějších paleozoických stromovitých rostlin byly vzorky rozříděny podle typu stonku. Ukázalo se, že rostlinná pletiva se liší odolností oproti destrukci a podle toho byla permineralizována, samozřejmě v přímé závislosti na místních podmínkách (paleoprostředí). Prostorové uspořádání různých morfologických typů SiO_2 (mikro- a makrokystalický křemen, mikrokrystalický a sférolitický chalcedon či achátovité struktury) je odvislé od původní rostlinné anatomie často až na buněčnou úroveň. Nicméně, objevují se rozdíly ve fosilizaci jak uvnitř jednoho vzorku tak mezi vzorky navzájem. Obecně lze konstatovat, že polyblastické textury mikrokrystalického křemene (mnoho krystalů v jedné buňce) zachovávají originální strukturu rostlinného pletiva nejlépe. Původní organická hmota se ale ve vzorcích téměř nezachovala, došlo tedy k jejímu úplnému nahrazení, často doprovázenému silnou rekrystalizací, a z toho důvodu bylo u některých vzorků z říčních náplav těžké rozpoznat, o jaké rostlinné pletivo se původně jednalo;
- (iii) Horká katodoluminiscence (CL) je jednoznačně nejefektivnější a nejrychlejší zobrazovací metoda. Zejména pokud je spojena s CL spektroskopií umožňuje spolehlivé přiřazení spekter žlutých, oranžovo-červených a modrých emisí, případně žlutých či krátce-žijících modrých CL emisí hydrotermálního křemene. Nejlepší je zařadit CL před ostatní analytické metody. Umí totiž zobrazit různé heterogenity, jako např. vývojově odlišné SiO_2 fáze (což není rozpoznatelné ani v PPL, ani v SEM), zbytky karbonátů, allochtonní detritická zrna apod., stejně tak "vidí" niterné rozdíly v charakteru jednotlivých vrstev tracheidální buňky. CL zde poskytla přímý důkaz existence těchto různých tracheálních vrstev u dřeva pozdně prvohorních stromovitých přesliček. Byly definovány dva základní přístupy při interpretaci CL odstínů; 1. Každý morfologický typ SiO_2 a jeho vývojové stádium mohou mít svůj specifický odstín CL; 2. Prokřemenění (silicifikace) je zpravidla vícestupňový proces;
- (iv) Analyticky byla vyhodnocena široká 'testovací sada' silicifikovaných dřev o stáří pozdní pensylvan až ranné mezozoikum pocházejících z lokalit v ČR, Tocantins (Brazílie), Chemnitz (Neměcko), oblasti Huqf (Omán), JZ/JV mongolské riftové zóny (Mongolsko), Petrified Forest National Park (Arizona, USA), autunská pánev (Francie) a centrální části transantarktického pohoří (Antarktida). Na základě detailní instrumentální analýzy, ve smyslu bodů (i-iii) byla navrženo následující rozdělení podmínek silicifikace dřev:
 1. *Silicifikace v říčních sedimentech*: ČR, Omán a Tocantins (Brazílie).

2. Silicifikace s vlivem vulkanismu:

- a. s přímým vlivem vulkanismu: Chemnitz (Německo);
- b. s vulkanoklastickými složkami ve fluviálních sedimentech: Arizona, Mongolsko, a Antarktida;
- c. s vulkanickou aktivitou v jezerním prostředí: lokalita Balka, Podkrkonošská pánev (ČR).

Došli jsme k závěru, že způsob prokřemenění dřeva může sloužit jako paleoenvironmentální a stratigrafický indikátor – stonky uložené v pozdně paleozoických fluviálních arkózách českých pánví odpovídají (sezónně) suchému klimatu, a CL charakteristiky ukazují na zvláštní podmínky vzniku fosilních dřev. V budoucnosti by mohly být srovnávány s dalšími vzorky;

- (v) Metastabilní fáze SiO_2 , hlavně moganit, byly zjištěny pomocí XRD a Ramanovy spektroskopie. Obsah moganitu ve dřevěch se pohyboval do 5% ve vzorcích z pánve Autun (Francie), Arizona (USA), a lokality v Chemnitz (Německo), avšak v rozmezí 5-20% ve dřevě z lokality Saiwan v Ománu a ve dřevě z Mongolska. V saiwanském vzorku byl jakožto primární minerál, který permineralizoval struktury dřeva, pozorován goethit, zatímco SiO_2 (moganit a křemen) vyplňovaly okolní anorganické prostory bez jakékoliv známky původní rostlinné anatomie. Moganit je považován za indikátor vlivu vulkanoklastik během silicifikace, čili jeho přítomnost je spíše dána módem prokřemenění než nízkým stářím vzorku;
- (vi) Vzorek fosilního dřeva č. E6362 pocházel z aluviálních sedimentů z tektonicky a vulkanicky aktivní oblasti podkrkonošské pánve (ČR) na rozhraní karbonu a permu. Prokřemenění a diagenese byly vícestupňové, ukazující na hydrotermální vlivy během pozdnější diagenese. Rozdílné katodoluminiscenční odstíny křemene ukazují na různorodé aktivátory CL v krystalové mřížce křemene. Minerály wakefieldit a xenotim, které byly ve vzorku zjištěny, dosud v přímé souvislosti s prokřemeněným dřevem nebyly popsány. Vznik wakefielditu ukazuje na změnu redoxních podmínek a migraci iontů V, U, As, a prvků vzácných zemin po uložení dřeva v sedimentu a v následné několikastupňové diagenezi.

Abstract

Silicified woods belonging to the three-dimensional permineralised plants are thoroughly studied by palaeobotanists. Their importance is usually underestimated in other scientific disciplines, their mineralogy/geochemistry is poorly known in close relation to other known scientific data. Stone-like appearance and nature of silicified wood is valued mainly in mineralogical markets. Only a complex analytical view can reveal more about their taphonomic past, palaeoenvironments and mechanisms of their formation and preservation.

This PhD thesis aims to uncover the potential of instrumental analyses of permineralised woods and design remarkable procedures of observing the wood samples. I have performed petrographical and geochemical analyses and comparison of samples of the Pennsylvanian (Carboniferous) to the Late Triassic age from several localities in the Czech Republic, Germany, Brazil, Sultanate of Oman, Mongolia, USA – Arizona, France, and Antarctica.

The selected samples, in most cases taxonomically determined, were observed in qualitative and quantitative way by instrumental imaging and analytical tools. Bulk (XRD) and detailed point analyses were performed. As the samples are very old, the crystallinity of SiO_2 was high (α -quartz was their main constituent according to XRD). A rather rare metastable SiO_2 polymorph, moganite, was detected at concentration up to 20%; its presence seems to have a connection with volcanic settings or evaporitic environment.

Hot cathodoluminescence (CL) visualised most effectively the heterogeneities within the samples, distinguished different phases of silicification, secondary overprints, uncommon mineral admixtures, partial calcification or phosphatisation, and allochthonous rock/mineral grains. CL spectroscopy enabled identification of distinct CL emissions and gave precision to spectra assignment. CL has become a springboard for other instrumental point analyses (SEM/EMPA, Raman spectroscopy, LA-ICP-MS), which then led to more detailed analyses under higher magnifications. Finally, such a combination of distinct analytical techniques led to an identification of wakefieldite, a rare vanadate mineral, described in fossil wood for the first time. It was detected in a sample from the Eastern Bohemia, from a field site affected by volcanism and abundantly occurring local ore deposits. Neighbouring silicified matter with the wood structure was geochemically heterogeneous and witnessed REE's and V migration during multistep diagenetic evolution.

The unconventional approach to fossil-wood analysis allows us to distinguish alluvial and volcanic modes of silicification. It might be used as a starting point for further research worldwide that could produce a comprehensive database of materials signatures of such permineralisations. Simultaneously, the database of CL shades of mineral mass might be created to better understand the process of fossil wood silicification under distinct past environments and varying duration.

1. INTRODUCTION

Palaeobotanists as well as broad public have been attracted to fossil plants for centuries since the fossils were discovered on the Earth's surface. Fossil plants belong to a group of body fossils, mainly in a form of adpressions, impressions, and compressions (mould or cast fossils), and they can represent various plant organs (Jones & Rowe 1999, Dernbach et al. 2002, Taylor et al. 2009). Silicified 'wood' is a different, much heavier and more robust 3D form of the so called 'permineralised' or 'replacement' fossil. This fossil form usually embodies stems, roots, or branches of arborescent plants (often only their fragments), which have been valued by human, with at least the same interest than other kinds of fossils. Their added value is beauty, especially when cut and polished. The international fossil wood market documents this phenomenon, and looking at it from a different perspective it is a huge business. These plant fossils are really old, even of the Late Palaeozoic age, where the first vegetation colonised basinal lowlands, alluvial plains, and highland areas (Falcon-Lang et al. 2009). These now extinct plants might have become silicified in two most common environments; as a part of the whole ecosystem buried *in situ* during catastrophic events (so called T⁰ assemblages), or as individuals transported by rivers, decorticated, fragmented, perhaps scattered far away from the source locality and deposited in fluvial sediments or much younger deposits (Philippe et al. 2000).

There is a large gap in scientific knowledge on these permineralised fossils. Despite the current research, there is no complete understanding of the whole silicification process. The interaction between a plant body and mineral phases, or influence of aquatic environment, volcanics, microbes *etc.* is not completely deciphered. If we knew more about it, silicified woods could be used as palaeoenvironmental indicators on a world scale. An absolute majority of scientific studies done on the "stone-like plant remains" have dealt mostly one-sidedly with systematic palaeobotany (taxonomy, anatomy, xylotomy; great summary in Taylor et al. 2009, and references therein). These fossils used to be solely utilised for palaeobotanic reconstructions since they preserved the diverse plant anatomy in a 3D form; the unique direct evidence of prehistoric vegetation existence and its physical form likely close to the real. Fortunately, in recent decades there have been a growing number of studies dealing more broadly with other branches of palaeontology *sensu lato*, such as palaeoecology, palaeoclimatology, sedimentology, or taphonomy (*e.g.*, Francis 1984, Rex 1986, Rex & Scott 1987, Fielding & Alexander 2001, Cúneo et al. 2003, Parrish & Falcon-Lang 2007, Taylor & Ryberg 2007, Wagner & Mayoral 2007, Colombi & Parrish 2008, Pfefferkorn et al. 2008, Falcon-Lang et al. 2009, Falcon-Lang et al. 2011, Rößler et al. 2012, Capretz & Rohn 2013, Luthardt et al. 2016), in which authors have worked with fossil wood in a broader sense and considered also spatial and palaeoenvironmental aspects of fossil sites.

Permineralisation is a very unique process. What did enable a plant body not to be rotten away or decomposed (recycled), but to retain roughly its original shape and internal/external features for ages? Permineralised woods often look more like a piece of stone (quartz, calcite, phosphate, pyrite, *etc.*) than a piece of plant. Scientists should pay more attention to the mineral phase or phases responsible for preserving the plant than they did earlier. Concerning silicified fossils, it is just the silica phase (SiO₂), which allowed preservation of very old parts of prehistoric plants, particularly owing to its hardness and resistivity to weathering. Quartz and other silica polymorphs are thermodynamically stable under ambient environmental conditions. Even though recrystallisation in a sample might be

high and fine anatomical details might not be observed clearly, the existing mineralogical phases carry information that can be interpreted in a broader context. Every mineral phase is a result of temperature-pressure-space-time conditions. Each phase has a specific chemical and isotopic composition, resulting from fluids of local specific concentrations, can contain fluid inclusions *etc.*; thus can be a valuable topic to study.

There is surprisingly a small number of scientific papers dealing with modern instrumental analysis of mineralogical phases in plant permineralisations (*e.g.*, [Sigleo 1979](#); [Scurfield 1979](#); [Scurfield & Segnit 1984](#); [Dietrich et al. 2000a,b, 2001](#); [Götze et al. 2001](#); [Scott & Collinson 2003](#); [Witke et al. 2004](#); [Polgári et al. 2005](#); [Hatipoğlu & Türk 2009](#); [Sweeney et al. 2009](#); [Läbe et al. 2012](#)) in comparison to thousands of papers published on (systematic) palaeobotany, or palynology. There are also only few studies analysing carbon content (rest) in otherwise predominantly inorganic plant silicifications (*e.g.*, [Sigleo 1978](#); [Dietrich et al. 2000b, 2001, 2013](#); [Nestler et al. 2003](#); [Sweeney et al. 2009](#)). In former Czechoslovakia, [Skoček \(1969, 1970, 1974\)](#) did a pioneer work in this environmental/mineralogical sense. On the other hand, some modern research reports on instrumental analysis of fossil wood are too technical and do not connect the results with anatomic aspects of the fossils plants, or lack a broader context of palaeobotanical and geological background of the fossils studied (*e.g.*, [Kuczumow et al. 2000](#), [Nowak et al. 2005](#), [Yoon & Kim 2008](#)).

2. AIMS OF THE STUDY

The aim of this PhD thesis was to overcome barriers among disciplines to address the mineral phases in plant fossils. I studied 3D plant fossils (not casts) permineralized predominantly by SiO₂, accompanied by other mineralogical phases (iron oxides, carbonates, sulphides, fluorides, phosphates, and vanadates). The samples were fragments of stems (steles) or parts of secondary xylem of arborescent plants, such as gymnosperms – cordaitaleans or primitive conifers. These are the most commonly preserved trunks of 'Palaeozoic giants', sphenopsids, tree ferns, seed ferns *etc.* Their age was the Pennsylvanian to the Early Permian but some Early Mesozoic samples were also included.

The main aims could be defined as follows:

- (i) to contribute to the understanding of petrographical, mineralogical, chemical, and CL signatures in the studied plant fossils (ideally well-classified morphotaxa) using several independent imaging and analytical techniques, such as CL, SEM, EMP, XRD, LA-ICP-MS, and Raman spectroscopy;
- (ii) to clarify the relationship between the original plant anatomy and petrography-mineralogical characteristics of the inorganic matter, *i.e.*, to understand the mode of permineralisation;
- (iii) to test CL technique limitations for silicified wood analysis;
- (iv) to perform such observations (i) on specimens from several Czech and other (selected) world localities and interpret the results in accordance with available palaeobotanical, geological, sedimentological, and paleoenvironmental data, in order to produce a 'test set' for future evaluation;

- (v) to examine metastable SiO₂ phases such as opal and moganite in silicified woods, to test whether their presence is related to the specimens age or to the mode of silicification;
- (vi) to investigate a very peculiar geochemical pattern of the sample E6362 noticed during master studies of [Matysová \(2006\)](#) and to decipher its colourful CL pattern and the probable migration of elements responsible for that pattern with leached wood parts.

Such procedure should provide some clues to palaeoenvironment under which the fossils were formed.

3. MATERIALS AND METHODS

Appropriate sampling and sample preparation ([Jones & Rowe 1999](#), [Dernbach et al. 2002](#), [Taylor et al. 2009](#)) is as important as the subsequent analysis. We always need to decide what we want to do with the sample and where we would like to focus our further research (inspiration on research questions can be found in [Bennington et al. 2009](#)). Of course, it makes a big difference whether we have a unique museum specimen with a limitation to take the smallest volume of material sufficient for analysis (if any), or we have a possibility to do sampling during a fieldwork on our own and there is plenty of material to be hammered and consumed. Both options need a careful consideration and choice of subsequent adequate techniques. To determine basic properties of a sample we can use one particular method but usually it is better to combine several methods, even if only to check the results.

INSTRUMENTAL METHOD	SAMPLE PREPARATION	FEATURES	PAPERS
<i>Optical microscopy (PPL, XPL)</i>	Thin sections	nd, i	1 - 5
<i>Reflected light microscopy</i>	Polished sections	nd, i	2, 4
<i>Hot cathodoluminescence microscopy</i>	Thin sections, carbon coated	nd, i	1 - 5
<i>Hot cathodoluminescence spectroscopy</i>	Thin sections, carbon coated	p, nd, ql	2, 4, 5
<i>Scanning electron microscopy (BSE, SE)</i>	Thin sections, carbon coated	nd, i	1 - 5
<i>Energy dispersive spectroscopy (EDS)</i>	Thin sections, carbon coated	p, nd, sqn	1 - 4
<i>Electron microprobe analyses (WDS)</i>	Thin sections, carbon coated	p, nd, qn	1, 4, 5
<i>High resolution CL detector</i>	Thin sections, carbon coated	i	4, 5
<i>X-ray diffraction analysis</i>	Powder, planar fragments	b, d/nd, qn	1, 2, 4, 5
<i>Raman spectroscopy</i>	Thin sections, uncoated	p, nd/ μ d, ql	1, 4, 5
<i>Laser Ablation ICP-MS</i>	Thicker thin sections (100 μ m)	p, μ d	5

Table 3. Imaging and analytical techniques applied on permineralised material in this thesis. Used abbreviations: nd – nondestructive, μ d – microdestructive, d – destructive, i – imaging, ql – qualitative analysis, qn – quantitative analysis, sqn – semiquantitative analysis, b – bulk and p – point analysis.

Summary of methods used in this thesis is in Tab. 3. Most samples studied in this thesis came from museum and private collections. Sampling was thus limited and every step of sample processing was photo-documented. Majority of the specimens have been prepared as polished thin sections made from transverse, and where possible also longitudinal radial and tangential cuts. Analyses have always started by optical microscopy and imaging techniques (CL, SEM); point analyses were subsequently performed in areas

of interest. Optical microscopy was used for both taxonomic (PPL) and petrographic (PPL/XPL) examination. Slightly thicker sections were prepared for LA-ICP-MS [5]. Bulk analyses were processed simultaneously. For XRD measurements mostly planar fragments obtained during the production of thin sections were used. Powdered samples were analysed only exceptionally. Several thick polished sections for reflected light microscopy proved to be useful. Particular instruments and techniques used, with precise determination of experimental settings, are described in detail in each publication [1-5].

4. RESULTS

My work originally commenced on isolated permineralised pieces of ‘wood’ from the Late Pennsylvanian, relatively common plant fossils in European Variscan orogenic belts. Their presence reflects sedimentological and ecological changes that took place around the Carboniferous-Permian transition as recorded in the continental basins of the Czech part of the Bohemian Massif (Skoček 1970, 1974; Opluštil & Cleal 2007; Opluštil et al. 2013). A detailed overview by Opluštil et al. (2013) describes red beds (coal-barren) expansion towards the drier Permian. Silicified woods deposited in fluvial red beds of the Líně Formation, Central and Western Bohemian basins etc. (Bureš 2011; Holeček 2011; Mencil et al. 2013a,b; Mencil 2014, Sakala 2015, Lojka et al. 2016) are listed as one of the climatically sensitive indicators. They are assumed as palaeoproxy of seasonal dry climatic phases.

The studied fossils represent remains (fragments) of stems of arborescent plants, mostly silicified, which can be commonly found on the surface of crop fields or along small local rivers or streams, or are more hidden in woods as secondary (allochthonous) alluvium deposits. However, they can still be sometimes seen entombed in fluvial siliciclastic sediments as a part of mostly Late Pennsylvanian outcrops. My very first samples came from Eastern Bohemia. One of the well-known localities there is for instance „Kryštofovy kameny“ (“Christopher’s Stones”) in the Intra-Sudetic Basin, CR (Matysová 2004, 2006; Mencil 2007). Even though these remarkable fossils often resemble rather a piece of quartz than a plant remnant, they have attracted attention of palaeobotanists since the earlier days of palaeobotany (H.R. Goeppert in the 19th century). However, lots of them still lack detailed palaeobotanical (taxonomic, xylotomic) description. The reason is simple; they are poorly or ‘not well-enough’ preserved or they have not been studied at all. Unfortunately, the days of spectacular finds of large silicified tree deposits reportedly easy to reach in the territory of the today’s Czech Republic, namely in Jestřebí hory (the Hawk Mountains; Mencil 2007, 2014), have passed. Long time ago they were looted by enthusiastic traffickers or collectors and reportedly in large scale transported abroad for sale. Therefore, huge amounts of fossils potentially available for research have been lost. It was not only the plant fossils what was absolutely lost. With those huge or even smaller silicified trunks we also wasted any possibility to study complete deposit sites in a broader sedimentological and palaeoenvironmental context. Fortunately, beside the scant rest of the samples in the countryside or fossils inbuilt within local monuments, we still have some potential study material housed in local museums, e.g. in Nová Paka, or in the National Museum in Prague, and, appreciable amount of material is scattered in private collections.

Let’s go back to the beginning; there are plenty of isolated pieces of such silicified ‘woods’, which nobody wanted to study any more as they were thought to have nearly none palaeobotanical value for their poor preservation and palaeoecologic isolation. Inspired

by pioneer geochemical research in Germany (Matysová 2006, [1], and references therein), I began to work with 19 museum specimens; the results on 17 of them were published in [1], Table 2, p. 220. They were obtained from collections of National Museum in Prague, all originally found in Eastern Bohemia. Specifically, they came from the Late Pennsylvanian sedimentary deposits of the Krkonoše-Piedmont and Intra Sudetic basins (Matysová 2006; [1] Fig. 1, p. 218; [1] Fig. 1, p. 219).

Summary of work published in the 1st paper; see appendix Matysová et al. 2008 – [1]

This first paper highlights the usefulness of instrumental approach to plant fossils. It addresses the relationship between the original anatomy or internal structure of plant tissues and their specific mode of preservation in the stone-like form. In the description of plant tissue preservation by SiO₂ mass, fundamental petrographic nomenclature and morphological classification of Flörke et al. (1991) were used. According to XRD results the crystallinity index of α -quartz in the samples is high, which confirms the time/age formula: ‘the older the sample, the higher the crystallinity’ (Moxon 2002). The studied sample set included stem pieces of different morphotaxa (distinct systematic groups, Tab. 1), namely calamites, tree ferns, seed ferns, and cordaitaleans or primitive conifers ([1] Tab. 2, p. 220). The way of preservation of different plant cells (parenchyma, sclerenchyma, aerenchyma, tracheids) varies in the studied samples ([1] Fig. 2, p. 221).

The paper focuses on detailed microscopic observation and points out the sense of petrographic and mineralogical analyses of SiO₂ matter in silicified wood ([1] Fig. 3, p. 222). It introduces – for the first time on Czech silicified wood specimens – hot cathodoluminescence (CL), and evaluates its high potential in research of permineralised fossil plant remains from alluvial or lacustrine/alluvial environments (in contrast to wood specimens from volcanics in Germany). Hot CL proves to be an excellent analytical and imaging tool for study of relatively uniform SiO₂ matter; for that reason we propose rather low temperatures during fossil wood formation ([1] Fig. 4, p. 224). If used prior to other microanalyses (SEM/EDX, EPMA, etc.), CL quickly depicts heterogeneities in SiO₂ matter not visible by other techniques. Thanks to strongly contrasting CL emissions, it can visualise tiny anatomical details not noticeable by ordinary microscopy, distinguishes a specific character of mineral/rock grains trapped in “mineral pockets”, reveals an incipient stage of calcification etc. ([1] Fig. 5, p. 226). It might be the main clue for further study of wood taphonomy and diagenesis; by visualising several stages of silicification, providing an evidence for a long transport – different grains are trapped in pockets versus grains as a part of the sediment around the fossil in a field, and so on.

Main outputs of this work were closely connected with new CL results:

1. Finding of stable red CL (the primary step of silicification) and short-lived blue CL related to distorted wood parts, fractures etc. as a proof of secondary silicification ([1] Fig. 4, p. 224).
2. Establishment of a new CL scheme valid for majority of samples studied in our sample set (Eastern Bohemia). Every petrographic type of SiO₂ mineral present in thin sections gave own peculiar CL shade; e.g. microquartz – red CL, megaquartz – brownish red CL, chalcedony – pinkish-violet or bluish violet CL etc. ([1] Tab. 3, p. 225).

3. Taphonomic evidences such as traces of initial calcification before silicification, 'mineral pockets' etc. revealed ([1] Fig. 5, p. 226).

Lately, we conducted similar geochemical analyses supplemented with more detailed revision of taxonomical and geological context on gymnosperm woods from the Intra-Sudetic Basin (Mencel et al. 2009 – [2]) and calamites from the Krkonoše Piedmont Basin (Sakala et al. 2009 – [3]).

Summary of work published in the 2nd paper; see appendix Mencel et al. 2009 – [2]

During this work we have done a closer historical insight of fossil wood findings, called 'araucarity', in the area of the 'Jestřebí hory' (the Hawk Mts) in the Czech part of the Intra-Sudetic Basin (ISB) ([2] Fig. 1, p. 270). Most of the silicified wood material comes from the Žaltman Member (mostly represented by arkoses) of the Odolov Formation, the Barruelian in age ([2] Fig. 2, p. 271). The first scientific descriptions by H. R. Goeppert come from the second half of the 19th century. The locality has been plundered since its discovery and its fate strongly resembles the fate of similar fossil wood deposit in the Kyffhäuser in Germany (Dernbach et al. 2002). In this study, we processed 14 pieces of driftwood (mere secondary xylems without branches or leaves), most of them were newly collected ([2] Table 1, p. 272; Fig. 3, p. 273) in the field, embedded in allochthonous positions, redeposited or scattered in the countryside (in the Quaternary deposits). Beside that, lots of logs are inbuilt in local monuments. According to XRD, crystallinity of SiO₂ (α-quartz) in wood samples is very high and corresponds to their high age ([2] Table 1, p. 272). In the field, palaeoflow's directions and directions of the longest axes of the stems were measured ([2] Fig. 4, p. 274) in order to reconstruct the direction of palaeostreams and the transport of the logs during deposition. We found that NW or WNW directions prevailed in fossil log orientation. Logs were shorter than axes of the bedforms (up to 10 meters) and laid almost perpendicularly to the palaeostream ([2] Fig. 4, p. 274). According to very coarse residual gravel in fluvial fossiliferous strata we suppose their transport during extreme floods.

Taxonomic revision proved to be quite difficult due to poor preservation of secondary xylem (the only preserved part of former plants) and led us to conclusion that the wood should be left in open nomenclature and ascribed as *Dadoxylon* sp. (see change in Rößler et al. 2014). We found araucarioid type of tracheids and rays ([2] Figs. 5&6, p. 275; Fig. 7, p. 276; Fig. 8, p. 277), that supports (with one *Artisia*-like pith) affinity to cordaites. Palaeobotanic observations were followed by detailed petrographical and mineralogical analyses similar as in the first paper [1]. Compared with the previous sample set in [1], a higher percentage of megaquartz domains not respecting the former wood anatomy was found ([2] Figs. 9&10, p. 278; Fig. 11, p. 279), probably due to more advanced crystal ripening.

Cathodoluminescence imaging (7 samples) was for the first time supplemented by spectral measurements (two most distinct samples were selected), and both gave interpretable results ([2] Figs. 9&10, p. 278; Fig. 13, p. 283). In most samples, a reddish CL (primary silicification) and a short-lived blue CL (secondary overprint) prevailed. CL again revealed allochthonous sedimentary grains (K-feldspars etc.) or secondary minerals (clay minerals) within the wood. Unexpectedly, emission of a transient yellow CL of α-quartz

in three wood samples was detected ([2] Figs. 9&10, p. 278; Tab. 2, p. 280). Prior to our study, such a short-lived yellow CL had only been known from the Permian plant samples from Chemnitz, silicified under higher temperature. Here we explain this emission also as an evidence of hydrothermal processes due to deep burial in sedimentary basins, buried wood was mechanically scarred and fractures consequently healed by a second generation of quartz under increased temperatures.

Based on our results, we suppose that the studied gymnosperm logs found in fluvial sandstones might have been fragments of cordaitalean trees once growing in the so called streamside niches, pulled downstream by heavy rains and floods, transported, decorticated, disintegrated, embedded in arkosic alluvium, and subjected to interaction with waterlogged sediment.

Summary of work published in the 3rd paper; see appendix Sakala et al. 2009 – [3]

In this work we focused on several silicified stems of calamites coming from the Nová Paka area, the Krkonoše-Piedmont Basin (KPB). This fossil site and strata (in particular 'Balka') is supposed to be related to the volcanic Ploužnice Horizon (the Semily Formation, the Stephanian C in age). It was also confirmed by the geochemical analyses (mentioned further). Calamites represent only one part of a more diversified assemblage typical of this site, and are considered as hygrophilous elements preserved in lacustrine/fluvial environment. This site is also known for abundant finds of silicified peat (Mencí et al. 2013, Opluštil et al. 2013). Palaeobotanic revision of the selected calamite specimens led only to identification of *Arthropitys* Goeppert (details in [3]). Petrographic analysis revealed prevailing microcrystalline quartz (polyblastic textures) preserving minute anatomical details of secondary xylem of the calamite wood cylinder. Macrocrystalline quartz or spherulitic chalcedony are both present, often tissue-specific ([3] Fig. 1&2, p. 112). Sedimentary grains were abundant in central piths, where plant tissue was not preserved, or surrounded the fossil stems. CL analysis showed that the Balka samples have their specific 'geochemical signature' and are different from other samples (it is compared further in [4]). They most resemble the geochemical pattern of plant fossils known from volcanic settings. Both the published CL colour scheme [1] and the two-step silicification course (reddish CL as a proof of primary, and short-lived blue CL as a proof of secondary SiO₂ mass) are valid here. Moreover, CL in some cases highlighted really the great details of tracheids' walls, which was subsequently improved by further measurements on HR-CL [4]. In general, it seems that at Balka locality, irrespective of a generally dry climatic conditions ([2] Fig. 2, p. 271), a local assemblage was present with a predominance of hygrophilic components, for instance in shallow lacustrine or swamp environment. It is herein evidenced by remains of the Permian horsetails or findings of silicified peat.

Summary of work published in the 4th paper; see appendix Matysová et al. 2010 – [4]

Generally speaking, we can scarcely develop any novel approach to plant fossil processing without a sufficiently broad sample collection for comparative research. We found necessary to gather adequate analytical data from permineralised fossils from both similar and

contrasting localities, geological settings and specific taphonomy. The results were summarized in [4]. The set of silicified 'wood' from Krkonoše-Piedmont Basin and Intra Sudetic Basin in CR mentioned above in the first papers [1-3] was supplemented by a high number of samples from the West Bohemian Basins (WBB, CR), Tocantins (the Parnaíba Basin, Brazil), Chemnitz (the Erzgebirge Basin, Germany), the Huqf Area (the Sultanate of Oman), SW and SE Mongolia rift zone (Mongolia), Petrified Forest National Park (Arizona, USA), the Massif Central (the Autun Basin, France) and the Central Transantarctic Mountains (Antarctica) ([4] Tab. 1, p. 129; Fig. 1, p. 130).

The main attention was paid to the mineral composition of studied, mostly silicified, samples. Again, a combination of various imaging and analytical techniques (light microscopy, XRD, SEM/EDS or WDX, Raman and hot CL) was used. Observations were done in several distinct orders: first to describe microstructural features, petrographical textures, crystallite size *etc.*, then to distinguish primary and secondary phases, postdiagenetic overprints, allochthonous admixtures, and afterwards to analyse the qualitatively determined phases in a (semi-)quantitative way (bulk and point analyses). Bulk analyses by XRD identified quartz (α -SiO₂) as the major permineralising agent with its mean coherence length (MCL) significantly varying. Reasons for that were searched under light microscopy during petrographic analysis; it confirmed a relation to particular tissue/cell anatomy in each sample individually. In some samples, also metastable SiO₂ phases, such as moganite and opal-CT were present. Quartz was sometimes accompanied by chalcedony (of a spherulitic or zebroic type), goethite, fluorite and other mineral phases. Some of these phases were also identified by the Raman spectroscopy ([4] Fig. 2, p. 131; Fig. 3, p. 132; Tab. 2, p. 136).

CL spectral components, especially those of SiO₂ phase, and their assignment showed as a crucial analytical tool leading to deeper understanding to the silicification process ([4] Fig. 4, p. 133; Fig. 5, p. 135; Tab. 2, p. 136). Bluish and reddish CL shades of primary and secondary silica masses prevailed, respectively, but the spectrum of the gained CL signals was broader as described in more details ([4] Tab. 3, p. 138). Peculiarities, such as primarily fluoritised tissue or readable anatomy in a *Psaronius* sample otherwise unreadable (by PPL/XPL) was revealed only owing to the hot CL ([4] Fig. 7, p. 138) and attributed to the extensive observations of plant anatomy preservation, pigmentation *etc.* ([4] Fig. 6, p. 137). Therefore, both hot CL and CL spectroscopy (in combination with other methods) should be considered fundamental techniques for study of silica phases and materials features of silica mass to reveal palaeoenvironmental proxies with respect to anatomical features (taxonomy) as well as sedimentary background of each fossiliferous locality ([4] Tab. 4 & Fig. 8, p. 139). We distinguished different CL signals for samples from volcanic and/or alluvial settings, or settings with a certain influence of volcanism ([4] Tab. 4, p. 139). It is not easy to interpret CL shades and CL spectra according to standard mineralogical conventions as we balance between inorganic matter (mineral) and organic matrix (plant); both interrelated. In this point our new knowledge (newly gained CL data) begs fundamental questions about CL principles in silicified wood, *i.e.*, the presence of defects in the crystal lattice (related to the plant anatomy), the presence of CL activators/quenchers in close relation to a real arrangement of SiO₂ mass in fossil wood on a micro-level, sometimes highlighting a subcellular level (*e.g.*, different CL shades in various parts of the tracheid wall in *Arthropityx* sp. ([4] Fig. 5.A, p. 135). Some of the main outputs were also closely connected with CL results (summary in [4] Tab. 4, p. 139):

We positively distinguished diagnostic signs of:

1. **Silicification in fluvial sediments** (Fig. 1): in those fossils no metastable silica phases were detected beside dominant α -quartz, well crystalline, with rather weak CL and prevailing reddish (primary) CL and only occasional blue, blue-violet or yellow CL shades of secondary (later diagenetic) silica mass. Poor or moderate preservation of anatomy prevail, most fossils were dense pycnoxylic wood. Fossils were embedded in allochthonous positions, typically in arkosic psamitic sediments, of which feldspars and unstable Al-silicates were proposed as the source of Si for silicification. The studied specimens of this group come from the Czech Republic, Sultanate of Oman, and Tocantins (Brazil).

2. **Silicification influenced by volcanics** (Fig. 2), with three subtypes:

- a. *with a direct influence of volcanism*: samples found *in situ* in (para-) autochthonous position, with higher species diversity and better preserved anatomy, CL characteristics point to hydrothermal origin of the mineral mass ([4] Tab. 2, p. 136; Tab. 4, p. 139). Beside α -quartz, further minerals and metastable SiO_2 polymorphs are common, documenting a multistage process of silicification, primary mass commonly emits a yellow CL attributed to hydrothermal quartz, secondary overprints are marked by a short-lived blue CL. Fluoritisation is frequent. Type locality is Chemnitz, Germany.
- b. *fluvial facies associated with volcanoclastic components*: mineralogical and CL patterns are similar to volcanic subtype (a), anatomy is better preserved than from fluvial settings without volcanic components. The studied specimens of that group were from Arizona, Mongolia, and Antarctica.
- c. *lacustrine facies associated with volcanic activity*: the fossils from lacustrine settings represent a hygrophilous flora of a higher diversity. Secondary overprints (silica with short-lived blue CL) are common. Type locality is Balka, the Krkonoše Piedmont Basin (CR), also bearing silicified peat.

Silicified plant stems may therefore serve as palaeoenvironmental and potentially stratigraphic indicators and CL characteristics points to specific conditions of the fossil wood formation. In the continental basins of the Czech Republic the fossil wood is often found in certain strata that bear indications of seasonal climates during fossil permineralisation (they alternate with coal-bearing strata representing interpreted as formed under more stable humid climate).

Our interpretation on palaeoenvironment based on silicified stems preserved in the late Palaeozoic fluvial deposits of the Bohemian basins are in accordance with conclusions of Opluštil & Cleal (2007). They characterised environment in individual strata in Bohemian basins where silicified stems were found; they occurred during periods of (seasonally) dry climate. Skoček (1970, 1974) and then Opluštil et al. (2013) believed that silicified stems, frequently found between grey and red units in the continental Bohemian basins of the Pennsylvanian age are markers of relatively rapidly increasing aridity.

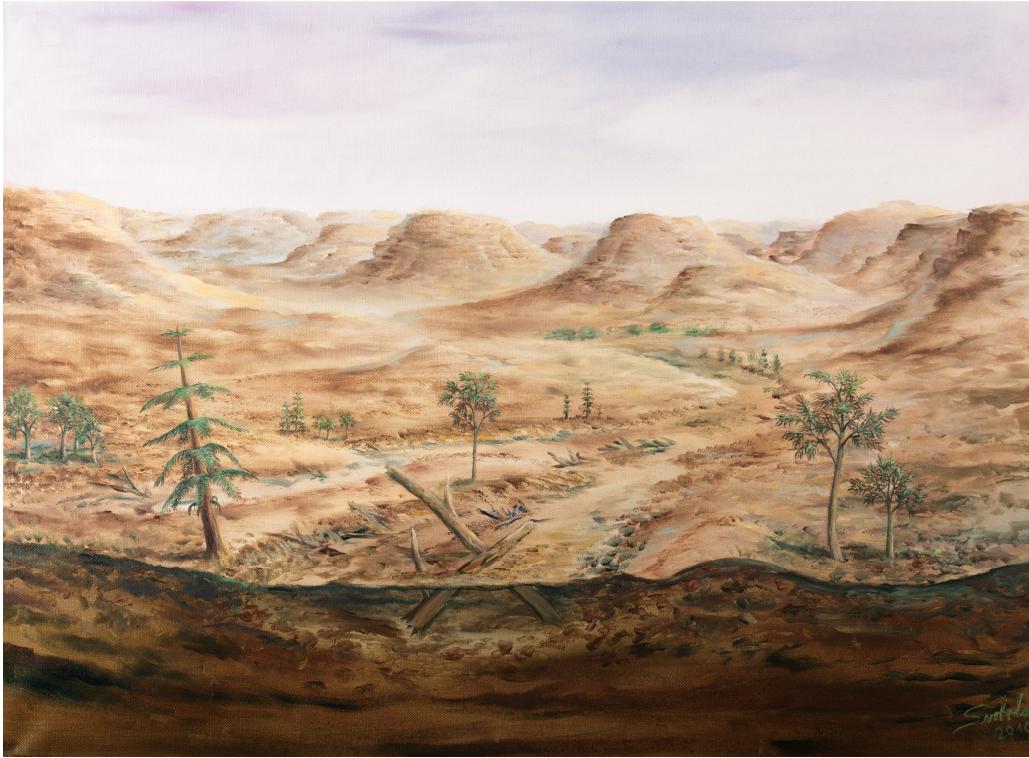


Figure 1. Artistic reconstruction of wood deposition and silicification in river sediments in allochthonous positions. Some individual gymnosperm-like trees are fluvially transported by downpours or massive floods. The trees are decorticated and disintegrated during the transport (painted by ©Jiří Svoboda).



Figure 2. Artistic reconstruction of plant burial by volcanic fall-out, under which various plants as a whole ecosystem is preserved *in situ* during catastrophic event accompanied by fires, lahars, tectonic movements, and hydrothermal phenomena (painted by ©Jiří Svoboda).

Summary of work published in the 5th paper; see appendix [Matysová et al. 2016](#) – [5]

We obtained unexpected results from study of a single specimen of a silicified *Agathoxylon*-type wood of the Lower Permian age from the Krkonoše-Piedmont Basin (CR) ([5] Fig. 1, p. 2). It was found in 1910 in the vicinity of Studenec Village in the Eastern Bohemia ([5] Fig. S1). X-ray diffraction identified well-crystalline quartz (α -SiO₂) in the specimen bulk. In contrast to other samples it had strikingly different cathodoluminescence (CL) pattern of the silica phase ([5] Fig. 5, p. 10). Whereas the large proportion of the sample consists of brownish silicified secondary xylem with intense dark reddish CL emission (maximum at 643 nm), the minor portion of the xylem is whitish, “bleached” in appearance in normal light, with short-lived (transient) bright blue CL emission under electron beam. The CL maximum at 390 nm points to a hydrothermal origin and very different content of CL activators/defects in α -SiO₂ crystal lattice. Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-ICP-MS) revealed striking differences in the chemical composition of α -SiO₂ phases of both brownish and whitish parts of the sample ([5] Tab. 1, p. 6-7). The silica phase is enriched in REE, Y and As. Whitish zones (“bleached” wood) are depleted in U and V, and enriched in Al, Li, Rb, Cu, and Sr ([5] Fig. 9, p. 15). We suppose that for instance sodium impurities (66 ppm Na) in brownish wood detected by LA-ICP-MS might be precursors for the so called NBOHC (activator for reddish CL). On the other hand, cation-compensated Al³⁺ centres [AlO₄/M⁺]⁰, considered as activators for short-lived blue CL (secondary overprint), are confirmed by substantially higher concentrations of Al³⁺ and Li⁺ ([5] Fig. 9, p. 15, Table 1, p. 6). Both are very typical hydrothermal elements, as are Rb, Cu, and Sr.

The SEM observations enabled to distinguish primary and secondary mineral phases and identified a vanadate rich conglomerate embedded in the silica mass ([5] Figs. 3-4, p. 8-9). An EMP/WDS analysis ([5] Tab. 3, p. 12-13) identified the conglomerate as a solid solution of wakefieldite-(Ce) and wakefieldite-(Y) [(Ce,Y,Nd)VO₄], accompanied by the As-rich xenotime-(Y); both minerals locally enclose individual silicified tracheids. X-ray microdiffraction also confirmed the presence of wakefieldite ([5] Fig. S4) as well as the Raman analysis ([5] Fig. 6, p. 10; Tab. 2, p. 11). Such rare mineral agglomerate has been identified for the first time in a silicified plant. Chemical variability among large Y-Ce-Nd ions and tetrahedrally coordinated P-As-V ions in wakefieldite and xenotime were presented in [5] (Fig. 7, p. 14). Wakefieldite-(Y), wakefieldite-(Ce) and As-bearing xenotime-(Y) with slightly variable distribution of REEs ([5] Fig. 10, p. 16) were obviously formed in the silicified wood lately during diagenesis as their precipitation in exogenic environment can hardly be expected. The mechanism of the vanadate formation and its relationship with local volcanism is discussed in [5]. Concerning the uranium, only brownish wood parts (quartz) are enriched in U, up to 19 ppm. We hypothesise that redox sensitive elements, in particular U and V, were initially accumulated by the organic remnants in fossil wood. The course of complex fossilization of the studied sample is schematized in [5] (Fig. 11, p. 17).

Note on taxonomic nomenclature:

Genus *Dadoxylon* Endl. mentioned in our work [1] - [4], was redefined in 2014. This should be further on referred to as *Agathoxylon* Hartig ([Rößler et al. 2014](#)).

5. CONCLUSIONS

- (i) The combination of imaging (PPL/XPL, CL, SEM/BSE/SE) and analytical techniques (XRD, Raman, EMP/WDS, LA-ICP-MS *etc.*) is a very useful and effective in the study of silicified (permineralised) plant remains, providing a good estimate on the fossilisation mode occurring in various depositional environments; still there are open questions related to the process of conversion of soluble silica species to solid silica mass and a specific role of plant tissue in this conversion.
- (ii) According to specific anatomical arrangement of the plant tissues in stems of the most common Palaeozoic (now extinct) arborescent plants, the samples (mostly parts of stems/trunks) were classified to distinct 'stem types'. Individual plant tissues showed to have specific resistance to destruction and were permineralised accordingly, dependent on local palaeoenvironment conditions. The arrangement of various crystal forms (micro- and macrocrystalline quartz, microcrystalline and spherulitic chalcedony and agate-like structures) appeared to be associated with the original plant tissue anatomy down to cell level. However, wide intra- and inter-specimen variations in the way of duplicating the original plant anatomy by silica or other mineral phases have been found. Generally, polyblastic textures of microcrystalline quartz (many crystals in one cell) preserved the original structure of plant tissues the best. Due to strong recrystallisation, almost no organic remains, some samples from alluvia were barely recognizable as wood remains.
- (iii) Hot cathodoluminescence (CL) proved to be an efficient and fast imaging method, particularly if CL microscopy is supplemented by CL spectroscopy to avoid possible uncertainties in the assignment of yellow, orange-reddish, and bluish luminescence shades to hydrothermal quartz with yellow or bright blue CL shades. CL is the best method used prior to further analyses. CL can highlight various heterogeneities, such as variable genesis of SiO₂ phases (cannot be visualized by PPL or SEM), relicts of carbonates, unexpected presence of allochthonous detrital grains *etc.*, as well as the minute differences in the character of individual layers of tracheid cell walls. CL provided direct evidence for the existence and variability of these layers in the Late Palaeozoic plants. Two basic approaches to the interpretation of CL colours were established; 1. The individual shade of CL corresponds to the morphological and genetic types of silica; 2. Silicification was proven to be a multi-phase process.
- (iv) A large 'test set' of the Late Pennsylvanian-Early Mesozoic silicified woods from the Czech Republic, Tocantins (Brazil), Chemnitz (Germany), the Huqf Area (Oman), SW/SE Mongolia rift zone (Mongolia), Petrified Forest National Park (Arizona, USA), the Autun Basin (France) and the Central Transantarctic Mountains (Antarctica) was analysed and evaluated. On the basis of detailed instrumental analysis, in the sense (i), we distinguished diagnostic signs of:
 1. *Silicification in fluvial sediments*: the Czech Republic, Oman, and Tocantins (Brazil).
 2. *Silicification under influence of volcanics*:
 - a. with a direct influence of volcanism: Chemnitz (Germany);

- b. fluvial facies associated with volcanoclastic components: Arizona, Mongolia, and Antarctica;
- c. lacustrine facies associated with volcanic activity: Balka, the Krkonoše Piedmont Basin (CR).

We came to conclusion that silicified woods can serve as palaeoenvironmental and potentially stratigraphic indicators – stems deposited in the late Palaeozoic fluvial arkosic sediments of the Bohemian basins correspond to periods of (seasonally) dry climate, and CL characteristics points to specific conditions of the fossil wood formation. Other samples can be compared with these results in future.

- (v) Metastable SiO₂ phases, such as moganite, were detected by XRD and Raman spectroscopy. Moganite content was up to 5% in the specimens from Autun (France), Arizona (USA), and Chemnitz (Germany), but as much as 5 – 20% was detected in the wood from the Saiwan locality in Oman, and from Mongolia wood. In the Saiwan specimen, goethite was observed as the primary mineral that preserved parts of original wood structures, while silica (moganite and quartz) was the filling agent present around, and lacked any plant anatomical features. Moganite appears to be an indicator of volcanoclastic influence during silicification, *i.e.* its presence seems to be related to the mode of silicification rather than to the age of the specimens;
- (vi) The piece of silicified wood E6362 came from alluvial deposits of a tectonically and volcanically active area in the Krkonoše Piedmont Basin (CR) at the Carboniferous/Permian boundary. The silicification and diagenesis was multi-step, pointing to a hydrothermal overprint during the later diagenesis. The variegated CL shades of quartz are attributable to miscellaneous CL activators in the crystal lattice. The unique presence of the wakefieldite and xenotime directly associated with silicified wood has not been reported before. After partial dissolution, wakefieldite was established as another phase and supports changing of redox conditions and intensive migration and redistribution/precipitation of V, U, As, REEs in the aquatic fossiliferous environment during successive steps of diagenesis of the fossil.

6. SELECTED REFERENCES (VÝBĚR Z POUŽITÉ LITERATURY)

- Bennington, J.B., DiMichele, W.A., et al., 2009. Critical issues of scale in paleoecology. *Palaios* 24, 1–44.
- Bureš, J., 2011. Silicified cordaite and conifers wood in the sediments of the Líně formation of the Pilsen Carboniferous Basin (Zkřemenělé kordaity a konifery v sedimentech líňského souvrství plzeňské karbonové pánve). *Erika, Plzeň* 18, 179–198. (In Czech with English abstract)
- Capretz R.L. & Rohn, R., 2013. Lower Permian stems as fluvial paleocurrent indicators of the Parnaíba Basin, northern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 45, 69–82.
- Colombi, C.E. & Parrish, J.T., 2008. Late Triassic Environmental Evolution in Southwestern Pangea: Plant Taphonomy of the Ischigualasto Formation. *Palaios* 23, 778–795.
- Cúneo, N.R., Taylor, E.L., Taylor, T.N. & Krings, M., 2003. *In situ* fossil forest from the upper Fremouw Formation (Triassic) of Antarctica: palaeoenvironmental setting and palaeoclimate analysis. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 197, 239–261.
- Dernbach, U., Tidwell, D.W., Barthel, M., Galtier, J., Jung, W., Kerp, H., Noll, R., Rößler, R., Rothwell, W. G., Selmeier, A., Stockey, A. R., Wilde, V. & Wright, W.W., 2002. Secrets of Petrified Plants, Fascination from Millions of Years. D'ORO Publishers, Germany. Heppenheim, 232 pp.
- Dietrich, D., Frosch, G., Rößler, R. & Marx, G., 2000a. Analytical X-Ray Microscopy on *Psaronius* sp. – A contribution to Permineralization Process Studies. *Mikrochimica Acta* 133, 279–283.
- Dietrich, D., Frosch, G., Wittke, K., Rößler, R. & Marx, G., 2000b. Analytische Röntgenmikroskopie und RAMAN-Spektrometrie an *Psaronius* sp. – ein Beitrag zum Versteinerungs-prozeß. *Veröffentlichungen des Museums für Naturkunde Chemnitz*, 23, 27–34.
- Dietrich, D., Wittke, K., Rößler, R. & Marx, G., 2001. Raman spectroscopy on *Psaronius* sp.: a contribution to the understanding of the permineralization process. *Applied Surface Science* 179, 230–233.
- Dietrich, D., Lampke, T. & Rößler, R. 2013. A microstructure study on silicified wood from the Permian Petrified Forest of Chemnitz. *Paläontologische Zeitschrift* 87(3), 397–407.
- Falcon-Lang, H.J., Nelson, W.J., Elrick, S., Looy, C.V, Ames, P.R. & DiMichele, W.A., 2009. Incised channel fills containing conifers indicate that seasonally dry vegetation dominated Pennsylvanian tropical lowlands. *Geology* 37 (10), 923–926.
- Falcon-Lang, H.J., Jud, N.A., Nelson, W.J., DiMichele, W.A., Chaney, D.S. & Lucas, S.G., 2011. Pennsylvanian coniferopsid forests in sabkha facies reveal the nature of seasonal tropical biome. *Geology* 39(4), 371–374.
- Fielding, C.R. & Alexander, J., 2001. Fossil trees in ancient fluvial channel deposits: evidence of seasonal and long-term climatic variability. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 170, 59–80.
- Flörke, O. W., Graetsch, H., Martin, B., Röller, K. & Wirth, R., 1991. Nomenclature of micro- and non-crystalline silica minerals, based on structure and microstructure. *Neues Jahrbuch für Mineralogie - Abhandlungen* 163 (1), 19–42.
- Francis, J.E., 1984. The seasonal environment of the Purbeck (Upper Jurassic) fossil forests. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 48, 285–307.

- Götze, J., Rössler, R. & Dietrich, D., 2001. Cathodoluminescence studies of Permian silicified wood from Chemnitz, Germany. *In* "Cathodoluminescence in geosciences: new insights from CL in combination with other techniques", Freiberg, Germany, 46–47.
- Hatipoğlu, M., Türk, N., 2009. A combined polarizing microscope, XRD, SEM, and specific gravity study of the petrified woods of volcanic origin from the Çamlıdere–Çeltikçi–Güdül fossil forest, in Ankara, Turkey. *Journal of African Earth Sciences* 53, 141–157.
- Holeček, J., 2011. Late Carboniferous silicified wood from the western part of Kladno-Rakovník Basin (Svrchnokarbonská zkřemenělá dřeva západní části kladensko-rakovnické pánve). *Master Thesis*, Faculty of Science, Charles University in Prague (*in Czech*), 135 pp.
- Jones, T.P. & Rowe, N.P., 1999. Fossil Plants and Spores: Modern techniques. The Geological Society, London, 408 pp.
- Kuczumow, A., Chevallier, P., Dillmann, P., Wajnberg, P. & Rudas, M, 2000. Investigation of petrified wood by synchrotron X-ray fluorescence and diffraction methods. *Spectrochimica Acta Part B-Atomic Spectroscopy* 55(10), 1623–1633.
- Läbe, S., Gee, C.T., Ballhaus, C. & Nagel, T., 2012. Experimental silicification of the tree fern *Dicksonia antarctica* at high temperature with silica-enriched H₂O vapor. *Palaios* 27(11), 835–841.
- Lojka, R., Rosenau, N.A., Sidorinova, T. & Strnad, L., 2016. Architecture, paleosols and cyclicity of the Middle-Late Pennsylvanian proximal fluvial system (Nýřany Member, Pilsen Basin, Czech Republic). *Bulletin of Geosciences* 91(1), 111–140.
- Luthardt, L., Rößler, R. & Schneider, J.W., 2016. Palaeoclimatic and site-specific conditions in the early Permian fossil forest of Chemnitz – Sedimentological, geochemical and palaeobotanical evidence. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 441, 627–652.
- Matysová, P., 2004. Silicified Permo-Carboniferous trunks from Intra-Sudetic and Krkonoše-Piedmont Basins. *Bachelor thesis*, Faculty of Science, Charles University in Prague (*in Czech*), 48 pp.
- Matysová, P., 2006. Permo-Carboniferous silicified trunks from Intra-Sudetic and Krkonoše-Piedmont Basins: Taxonomy and Instrumental Analysis. *Master Thesis*, Faculty of Science, Charles University in Prague (*in Czech*), 195 pp.
- Mencl, V., 2007. Late Pennsylvanian silicified woods of the Intra-Sudetic Basin: systematics and palaeoenvironment. *Master Thesis*, Faculty of Science, Charles University in Prague (*in Czech*), 106 pp.
- Mencl, V., 2014. Silicified stems of upper Paleozoic plants from the Intra Sudetic and Krkonoše Piedmont basins. *Doctoral Thesis*, Faculty of Science, Charles University in Prague (*in Czech*), 48 pp.
- Mencl, V., Bureš, J. & Sakala, J., 2013a. Summary of occurrence and taxonomy of silicified *Agathoxylon*-type of wood in late Paleozoic basins of the Czech Republic. *Folia Musei rerum naturalium Bohemiae occidentalis. Geologica et Paleobiologica* 47 (1–2), 14–26.
- Mencl, V., Holeček, J., Rößler, R. & Sakala, J., 2013b. First anatomical description of silicified calamitalean stems from the upper Carboniferous of the Bohemian Massif (Nová Paka and Rakovník areas, Czech Republic). *Review of Palaeobotany and Palynology* 197, 70–77.
- Moxon, T., 2002. Agate: a study of ageing. *European Journal of Mineralogy* 14, 1109–1118.

- Nowak, J., Florek, M., Kwiatek, W., Lekki, J., Chevalier, P., Zięba, E., Mestres, N., Dutkiewicz, E.M. & Kuczumow, A., 2005. Composite structure of wood cells in petrified wood. *Materials Science and Engineering C* 25, 119–130.
- Opluštil, S. & Cleal, J.C., 2007. A comparative analysis of some Late Carboniferous basins of Variscan Europe. *Geological Magazine* 144, 417–448.
- Opluštil, S., Šimůnek, Z., Zajíc, J. & Mencl, V., 2013. Climatic and biotic changes around the Carboniferous/Permian boundary recorded in the continental basins of the Czech Republic. *International Journal of Coal Geology* 119, 114–151.
- Parrish, J.T. & Falcon-Lang, H.J., 2007. Coniferous trees associated with interdune deposits in the Jurassic Navajo Sandstone Formation, Utah, USA. *Palaeontology* 50 (4), 829–843.
- Pfefferkorn, H.W., Gastaldo, R.A., DiMichele, W.A. & Phillips, T.L., 2008. Pennsylvanian tropical floras from the United States as a record of changing climate. *Special Paper of the Geological Society of America* 441, 305–316.
- Philippe, M., Szakmány, G., Gulyás-Kis & Józsa, S., 2000. An Upper Carboniferous-Lower Permian silicified wood in the Miocene conglomerate from the western Mecsek Mts. (southern Hungary). *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie - Monatshefte* 4, 193–204.
- Polgári, M., Philippe, M., Szabó-Drubina, M. & Tóth, M., 2005. Manganese-impregnated wood from a Toarcian manganese ore deposit, Eplény Mine, Bakony Mts., Transdanubia, Hungary. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie-Monatshefte* 2005/3, 175–192.
- Rex, G.M. & Scott, A.C., 1987. The sedimentology, palaeoecology and preservation of the Lower Carboniferous plant deposits at Pettycur, Fife, Scotland. *Geological Magazine* 124(1), 43–66.
- Rößler, R., Zierold, T., Feng, Z., Kretschmar, R., Merbitz, M., Annacker, V. & Schneider, J.W., 2012. A snapshot of an Early Permian ecosystem preserved by explosive volcanism: new results from the Chemnitz Petrified Forest, Germany. *Palaios* 27(11), 814–834.
- Rößler, R., Philippe, M., van Konijnenburg-van Cittert J.H.A., McLoughlin, S., Sakala, J., Zijlstra, G. [co-ordinating authors] et al., 2014. Which name(s) should be used for *Araucaria*-like fossil wood?—Results of a poll. *Taxon* 63 (1), 177–184.
- Sakala, J., 2015. Fossilní dřevo a jeho význam pro paleobotanický výzkum: případové studie z oblasti středních a sz. Čech. *Habilitation Thesis*. Charles University in Prague, 43 pp.
- Scott, A.C. & Collinson, M.E., 2003. Non-destructive multiple approaches to interpret the preservation of plant fossils: implications for calcium-rich permineralisations. *Journal of the Geological Society, London* 160, 857–862.
- Scurfield, G., 1979. Wood Petrification: an Aspect of Biomineralogy. *Aust. J. Bot.* 27, 377–390.
- Scurfield, G. & Segnit, E.R., 1984. Petrification of wood by silica minerals. *Sedimentary Geology* 39, 149–167.
- Sigleo, A.C., 1978. Organic geochemistry of silicified wood, Petrified Forest National Park, Arizona. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 42, 1397–1405.
- Sigleo, A.C., 1979. Geochemistry of silicified wood and associated sediments, Petrified Forest National Park, Arizona. *Chemical Geology* 26, 151–163.

- Skoček, V., 1969. Fosfatizované rostlinné zbytky ve střeđočeském karbonu. (Phosphatised plant remains in the Carboniferous of Central Bohemia). *Časopis pro mineralogii a geologii* 14 (2), 219–221. (in Czech with English abstract)
- Skoček, V., 1970. Silicifikovaná dřeva ve střeđočeském permokarbonu. *Věstník Ústřední ústav geologický* 45, 87–92. (in Czech with English abstract).
- Skoček, V., 1974. Climate and diastrophism, the principal factors controlling Late Paleozoic sedimentation in central Bohemia. *Časopis pro Mineralogii a Geologii* 19, 27–45. (in Czech with English abstract)
- Sweeney, I.J., Chin, K., Hower, J.C., Budd, D.A. & Wolfe, D.G., 2009. Fossil wood from the middle Cretaceous Moreno Hill Formation: Unique expressions of wood mineralization and implications for the processes of wood preservation. *International Journal of Coal Geology* 79, 1–17.
- Taylor, E.L. & Ryberg, P.E., 2007. Tree growth at polar latitudes based on fossil tree ring analysis. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 255, 246–264.
- Taylor, T.N., Taylor, E.L. & Krings, M., 2009. Paleobotany: The Biology and Evolution of Fossil Plants, Second Edition. Academic Press, USA, Elsevier, 1230 pp., 2134 figs.
- Wagner, R.H. & Mayoral, E.J., 2007. The Early Permian of Valdevar in Sevilla province, SW Spain: basin history and climatic/palaeogeographic implications. *Journal of Iberian Geology* 33, 93–124.
- Witke, K., Götze, J., Rößler, R., Dietrich, D. & Marx, G., 2004. Raman and cathodoluminescence spectroscopic investigations on Permian fossil wood from Chemnitz – a contribution to the study of the permineralisation process. *Spectrochimica Acta A – Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 60, 2903–2912.
- Yoon, C.J. & Kim, K.W., 2008. Anatomical descriptions of silicified wood from Madagascar and Indonesia by scanning electron microscopy. *Micron* 39, 825–831.

LIST OF APPENDICES (PŘÍLOHY DIZERTAČNÍ PRÁCE)

(Papers 1-2, and 4-5 are published in international journals with IF)

Publikace 1-2 a 4-5 jsou publikovány v mezinárodních časopisech s IF

- [1] **Matysová, P.***, Leichmann, J., Grygar, T. & Rößler, R., 2008. Cathodoluminescence of silicified trunks from the Permo-Carboniferous basins in eastern Bohemia, Czech Republic. *European Journal of Mineralogy* 20 (2), 217–231 (15). ISSN: 0935-1221. doi:10.1127/0935-1221/2008/0020-1797.
- [2] Mencl, V., **Matysová, P.*** & Sakala, J., 2009. Silicified wood from the Czech part of the Intra Sudetic Basin (Late Pennsylvanian, Bohemian Massif, Czech Republic): systematics, silicification and palaeoenvironment. *Neues Jahrbuch für Geologie und Palaontologie-Abhandlungen* 252 (3), 269–288. ISSN: 0077-7749. doi:10.1127/0077-7749/2009/0252-0269.
- [3] Sakala, J.*, Mencl, V. & **Matysová, P.**, 2009. Nové poznatky o svrchně karbonických prokřemenělých stoncích stromovitých přesliček z Novopacka. (New data on Upper Carboniferous silicified stems of calamites from the Nová Paka region). *Zprávy o geologických výzkumech v roce 2008*, 111–113. Česká geologická služba, Praha. ISSN 0514-8057. ISBN 978-80-7075-738-3. (in Czech with English abstract)
- [4] **Matysová, P.***, Rössler, R., Götze, J., Leichmann, J., Forbes, G., Taylor, E.L., Sakala, J. & Grygar T., 2010. Alluvial and volcanic pathways to silicified plant stems (Upper Carboniferous–Triassic) and their taphonomic and palaeoenvironmental meaning. *Palaeo-geography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 292, 127–143. doi:10.1016/j.palaeo.2010.03.036.
- [5] **Matysová, P.***, Götze, J., Leichmann, J., Škoda, R., Strnad, L., Drahota, P. & Matys Grygar T., 2016. Cathodoluminescence and LA-ICP-MS chemistry of silicified wood enclosing wakefieldite – REEs and V migration during complex diagenetic evolution. *European Journal of Mineralogy*. doi:10.1127/ejm/2016/0028-2556.

SUPPLEMENT

List of further papers in journals (covered by WOS)

- Sýkorová, I.*, Havelcová, M., Trejtnarová, H., **Matysová, P.**, Vašíček, M., Kříbek, B., Suchý, V. & Kotlík, B., 2009. Characterization of organic matter in dusts and fluvial sediments from exposed areas of downtown Prague, Czech Republic. *International Journal of Coal Geology* 80, 69–86. doi:10.1016/j.coal.2009.08.004.
- Suchý, V.*, Dobeš, P., Sýkorová, I., Machovič, V., Stejskal, M., Kroufek, J., Chudoba, J., Matějovský, L., Havelcová, M. & **Matysová, P.**, 2010. Oil-bearing inclusions in vein quartz and calcite and, bitumens in veins: Testament to multiple phases of hydrocarbon migration in the Barrandian basin (lower Palaeozoic), Czech Republic. *Marine and Petroleum Geology* 27, 285–297. doi:10.1016/j.marpetgeo.2009.08.017.
- Lojka, R.*, Sýkorová, I., Laurin, J., **Matysová, P.** & Matys Grygar, T., 2010. Lacustrine couplet-lamination: evidence for Late Pennsylvanian seasonality in central equatorial Pangaea (Stephanian B, Mšec Member, Central and Western Bohemian basins). *Bulletin of Geosciences* 85 (4), 709–734. Czech Geological Survey, Prague. ISSN 1214-1119. doi:10.3140/bull.geosci.1210.
- Havelcová, M.*, Sýkorová, I., Bechtel, A., Mach, K., Trejtnarová, H., Žaloudková, M., **Matysová, P.**, Blažek, J., Boudová, J. & Sakala, J., 2013. “Stump Horizon” in the Bílina Mine (Most Basin, Czech Republic) — GC–MS, optical and electron microscopy in identification of wood biological origin. *International Journal of Coal Geology* 107, 62–77. doi:10.1016/j.coal.2012.09.008.

List of further reviewed publications (Science popularisation):

- Matysová, P.***, Mencl, V. & Sakala, J., 2007. Permineralized trunks of the Krkonoše-Piedmont Basin (Czech Republic), Permineralizovaná dřeva Podkrkonošské pánve. VENTS 2007. *Sborník Muzea Českého ráje*, Turnov. *Acta Musei Turnoviensis* 2, 16–19, 35–38. ISBN 80-239-6435-6.
- Matysová, P.**, 8/2009. Psaronie, královny permokarbonu aneb Kapradiny trochu jinak. *Vesmír* 88 (139), 380–385. (In Czech)
- Matysová, P.*** & Grygar, T., 11/2009. Permian silicified wood in Oman. *Al Hajar Newsletter* 15, 14–18. Geological Society of Oman, Sultanate of Oman.
- Matysová, P.**, 6/2010. Za fosilními dřevy do ománské pouště. *Vesmír* 89 (140), 360–363. (In Czech)
- Matysová, P.*** & Rößler R., 12/2014. Co je pohřbeno v Chemnitz? Prales vyhynulých rostlin v trojrozměrné podobě. *Vesmír* 93 (144), 700–705. (In Czech)

Curriculum Vitae

Jméno: Petra
Příjmení: Matysová
Tituly: RNDr., Mgr., Bc.

Narozena: 4. května 1980
Místo narození: Hradec Králové
Národnost: česká

E-mail: pmatysova@email.cz, matysova@irms.cas.cz

Současný stav:

- *doktorské studium* – program „Geologie se zaměřenými“ (kombinovaná forma studia) (nástup 09/2006; přerušeno 05/2011-04/2015 z důvodu mateřství; 2 děti), Ústav geologie a paleontologie, Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy, Albertov 6, 128 43 Praha 2

Státní doktorská zkouška složena 15. 6. 2010.

Téma doktorské práce: „*Study of fossil wood by modern analytical methods: case studies*“ (Studium fosilních dřev pomocí moderních analytických metod: případové studie), *psáno v angličtině*, školitel RNDr. Jakub Sakala, Ph.D., konzultantka Ing. Ivana Sýkorová, DrSc.

- *částečný úvazek* – Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR, v.v.i., Oddělení Geochemie, V Holešovičkách 41, 182 09 Praha 8

Dosažené vzdělání:

- 2011 ***rigorózní zkouška – RNDr.***
Ústav geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů,
Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy, Albertov 6,
128 43 Praha 2 (dále ÚGMNZ, PŘF UK, Praha)
- 2004 - 2006 ***magisterské – Enviromentální geochemie***
ÚGMNZ, PŘF UK, Praha
- 2001 - 2004 ***bakalářské – Hospodaření s přírodními zdroji***
ÚGMNZ, PŘF UK, Praha
- 1998 - 2000 Tři semestry magisterského studia Ochrana životního prostředí
na Univerzitě Karlově v Praze
- 1998 ***maturita*** – Střední odborná škola veterinární, Pražská 68,
Hradec Králové – Kukleny

Předchozí zaměstnání:

2008 - 2010	<i>plný úvazek – PhD student (vědecký pracovník)</i> Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR, v.v.i., Oddělení Geochemie, V Holešovičkách 41, 182 09 Praha 8
2004 - 2005	Unicorn a.s., Arcorn a.s., Vigour spol. s r.o. – DPČ – asistent
2000 - 2001	Veterinární sestra (ordinace MVDr. Václava Naxery, Praha)

Účast na vědeckých grantových projektech (člen týmu):

(80%) Komplexní přístup ke studiu prokřemenělých dřev. “*Complex approach to the study of silicified wood of the Permocarboniferous of the Intra Sudetic and the Krkonoše Piedmont Basins, Czech Republic*”. GAAV ČR (KJB301110704, J. Sakala, PŘF UK) (2007-2009)

(30%) Stanovení, zdroje a potenciální následky inertního uhlíku "Black carbon" v půdách a sedimentech z měst a oblastí s těžbou uhlí v České republice. “*Quantification, sources and potential implications of black carbon in soils and sediments from the urban and coal mining areas in the Czech Republic*”. GAAV ČR (IAA300460804, I. Sýkorová, ÚSMH AV ČR, v.v.i.) (2008-2010)

Kurzy

Terénní kurz z geochemie a věd o Zemi
Geochemický mapovací kurz
Praktikum z analytické a instrumentální analytické chemie
Zobrazování jako analytický nástroj: vývoj v infračervené a Ramanově spektrometrii
– Pražské analytické centrum inovací (PACI), ÚACH, VŠCHT Praha
ICCP Course in Organic Petrology (Potsdam, Německo)

Jazykové znalosti

Angličtina – komunikativně i písemně
2008 – **FCE (First Certificate of English)**; British Council)
English blended-learning kurz – Academic Writing I, II (www.langdpt.cas.cz)

Řidičská oprávnění

Řidičský průkaz skupiny B

Odborné zkušenosti

Aktivní účast na více jak 17 mezinárodních vědeckých konferencích ve světě (přednášky, postery), studentské domácí konference;
Zahraniční spolupráce, hlavně s J. Götzem a R. Rösslerem (Německo);
Zvaná přednáška na TU Chemnitz (15. 7. 2009);
Akademický pobyt v Moskvě (6/2009);
Terénní výjezd do Ománu (2008, 3 týdny, sponzorováno Petroleum Development Oman);

Pedagogická aktivita

Geologická činnost organismů, Xylotomické metody (PŘF UK, Praha);
přednášky na DOD (ÚSMH AV ČR, v.v.i.), přednášky pro veřejnost (popularizace vědy).

