National Conference with International Participation
ENGINEERING MECHANICS 2006
Svratka, Czech Republic, May 15 – 18, 2006
paper no. 140

NON-DESTRUCTIVE INSPECTION OF A HISTORICAL WOODEN STRUCTURE DAMAGED BY FIRE

J. Frankl[1], M. Kloiber[1,2], J. Bryscejn[1]

Summary: *In 2004, timber structures of the 15th century Castle Pernstejn were investigated by non-destructive methods that included acoustic waves, dendrochronology and resistance drilling. In the spring of 2005, a fire destroyed a corn-loft of the castle and only horizontal floor beams had remaining load-bearing capacity. The same sets of in-situ experiments of the identical members to those tested in 2004 were performed after the fire and the results have been compared to the previous ones.*

1. Úvod

V roce 2004 proběhl průzkum jakostního stavu nosných trámů konstrukce dřevěné podlahy bývalé sýpky hradu Pernštejna, pocházející z poloviny 15. století, (obr. 1). Práce byla zaměřena na zjištění mechanických vlastností nosných prvků před přestavbou prostorů na depozitář a expoziční sál. K průzkumu byly vzhledem k významu a historické hodnotě konstrukce zvoleny především nedestruktivní metody, které umožňují získat informace o materiálových vlastnostech bez nepřiměřeného zásahu do původní konstrukce.

K zjištění vlastností dřevěných prvků byly použity dvě metody měření odporu dřeva proti vnikání nástroje a jedna metoda akustická. Pro měření odporu byl použit mikrovrtací přístroj Resistograph 2450p, který měří energii potřebnou k průniku tenkého vrtáku materiálem a sklerometrický přístroj Pilodyn 6J Forest, jež měří hloubku vniku trnu, vystřeleného proti povrchu dřeva stlačenou pružinou. Použitá akustická metoda je zcela nedestruktivní. Měří dobu průchodu ultrazvukových vln materiálem; vlny jsou generovány přístrojem Arborsonic Decay Detector (ADD). Na zkoumaných prvcích byla dále měřena vlhkost přístrojem Hygrotest 6500 se zarážecí sondou. Průzkum byl doplněn o odběr vzorků pro dendrochronologické datování konstrukčních prvků.

15. března roku 2005 došlo v objektu sýpky k rozsáhlému požáru, který zcela zničil konstrukci krovu a poškodil konstrukce podlah v patře. Trámy posuzované v roce 2004 byly požárem poškozeny jen povrchově (obr. 2). Následkem hašení však podstatně vzrostla jejich vlhkost. Po zpřístupnění konstrukce byla na podlahových trámech provedena stejná série měření ve shodných místech jako v roce 2004.

Údaje získané měřením a následnými výpočty po použití uvedených metod v obou sériích měření (r. 2004 a r. 2005) byly následně porovnány z hlediska změn materiálových vlastností před a po požáru. Jednotlivé metody byly porovnány také mezi sebou.

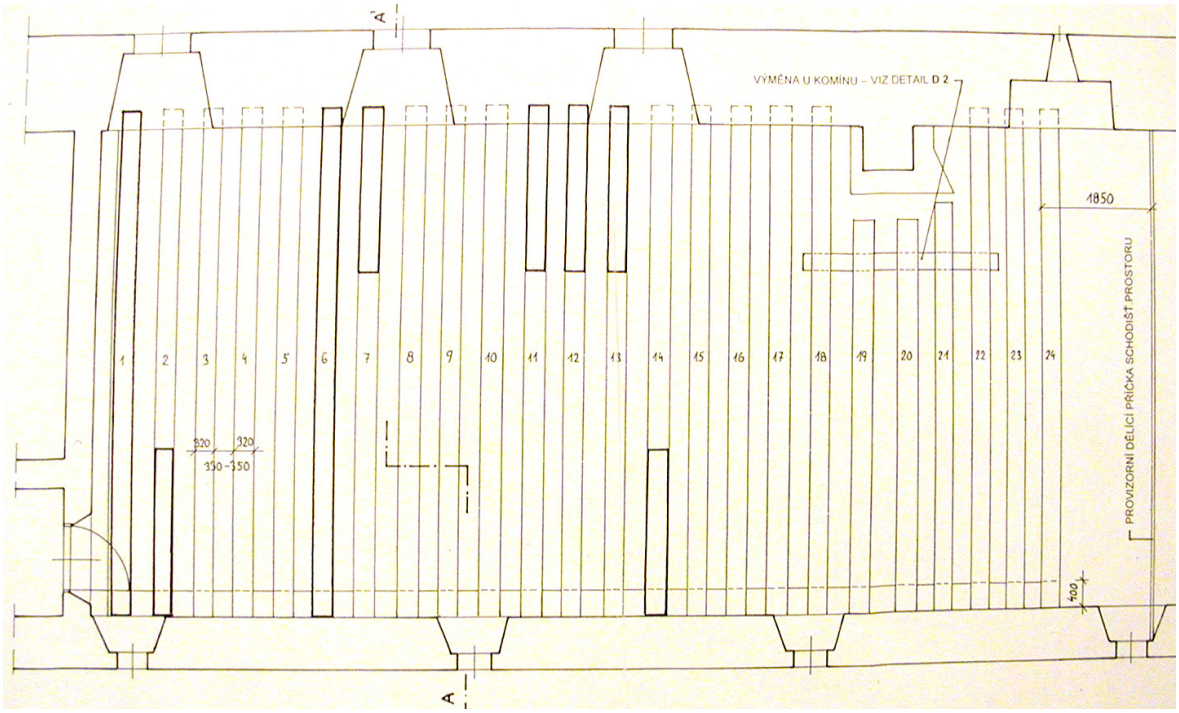
[1] Ing. Jiří Frankl, Ing. Michal Kloiber, Ing. Jan Bryscejn: Akademie věd České republiky, Ústav teoretické a aplikované mechaniky; Prosecká 76; 190 00 Praha 9; tel.: +420 286 882 121, e-mail: frankl@itam.cas.cz
[2] Ing. Michal Kloiber: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta, Ústav nauky o dřevě; Zemědělská 1; 613 00 Brno; tel.: +420 545 134 050, e-mail: kloiber@kloiber.cz

Obrázek 1 – nosné trámy před požárem.

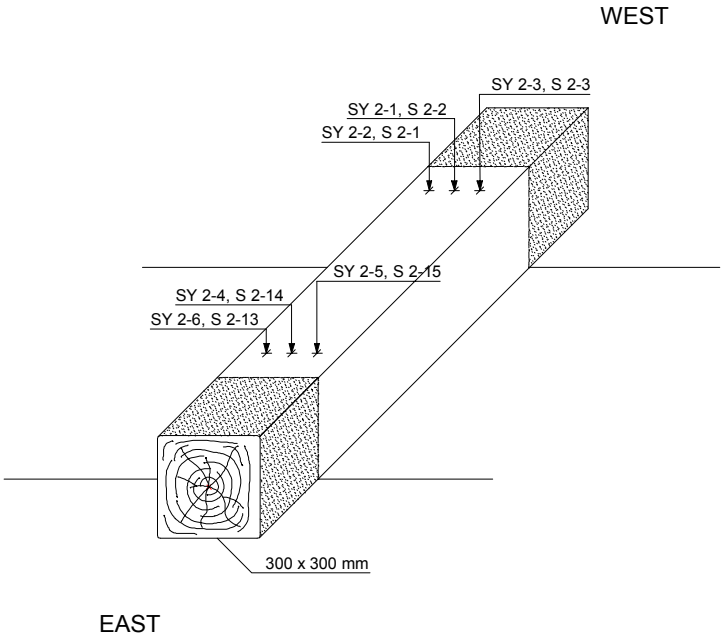
Obrázek 2 – nosné trámy po požáru.

Obě série měření proběhly na třech nosných trámech. Umístění posuzovaných trámů v konstrukci podlahy je patrné z obr. 3. Pro každé zhlaví trámu byly měřeny hodnoty přístrojem Resistograph ve třech místech (celkem 18 měření). Přístroji Pilodyn a ADD bylo měření provedeno u každého zhlaví ve dvou místech (celkem 12 měření). Rozmístění a měřených míst na trámech je vyznačeno na obr. 4.

Na posuzovaných trámech byla měřena průměrná vlhkost dřeva. Před požárem byla vlhkost dřeva 24%, po požáru došlo vlivem nasáknutí trámů vodou při hašení k jejímu zvýšení na 88%.



Obrázek 3 – schématické zakreslení nosných trámů podlahy, naše měření bylo provedeno na trámech označených čísly 2, 3 a 4.



Obrázek 4 – schématické zakreslení rozmístění a označení měřených míst na jednotlivých trámech (trám č. 2 viz. obr. 3).

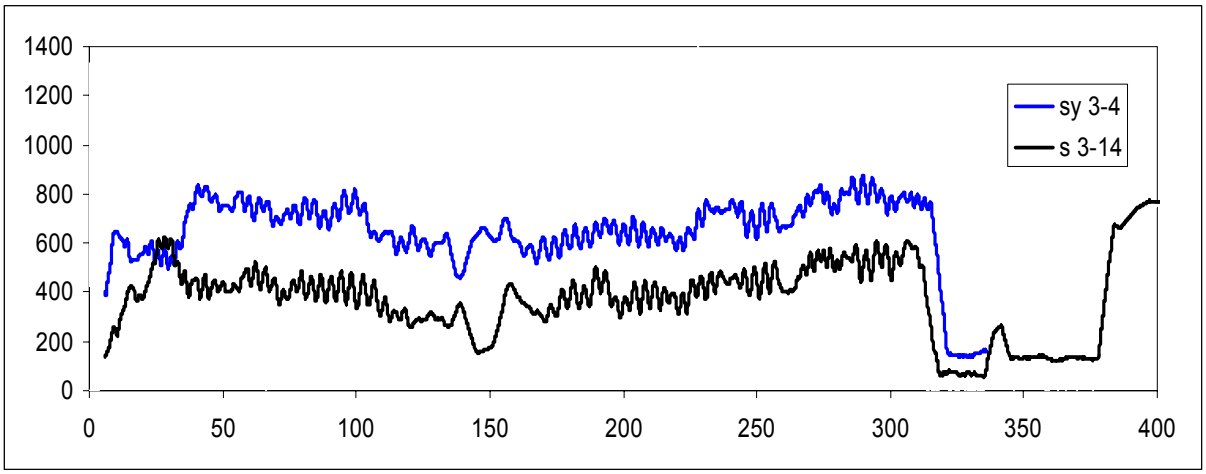
2. Metody průzkumu

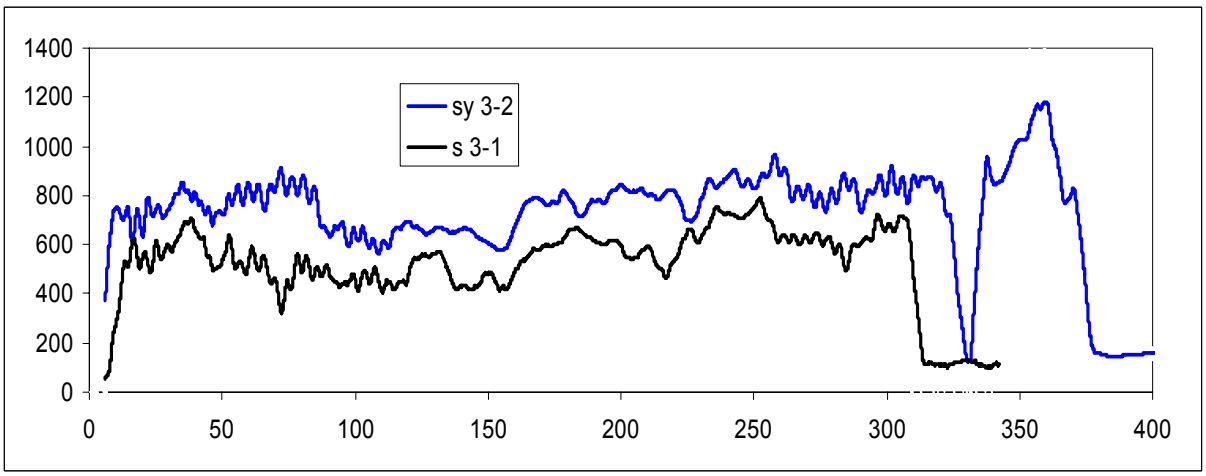
Odporové metody - Resistograph

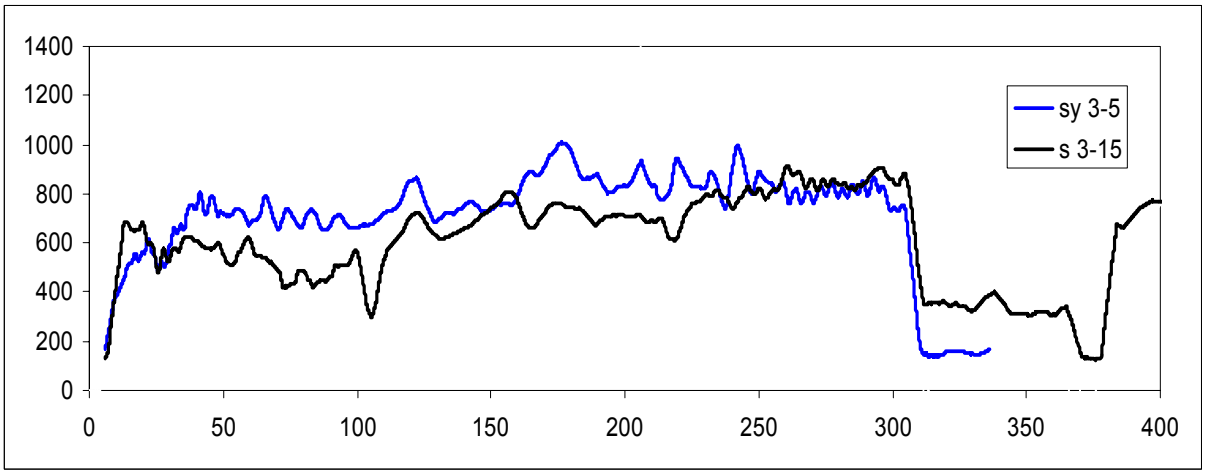
Cílem odporového vrtání pomocí přístroje Resistograph bylo lokalizovat a určit potenciální vnitřní defekty, prázdná nebo poškozená místa v materiálu. Zařízení je vybaveno vrtákem o průměru 3,5 mm s možností vrtat do hloubky 400 mm. Při průniku vrtáku do měřeného materiálu snímá přístroj množství energie potřebné pro udržení konstantní vrtné rychlosti (obr. 5). Výstupem je křivka, popisující změny energie v průběhu vrtání, které odpovídají oblastem s různými hustotami dřeva. Změny vyjadřují zlomy křivky v horních a dolních vrcholech. Netypický průběh částí křivky označuje místa s výskytem defektů.

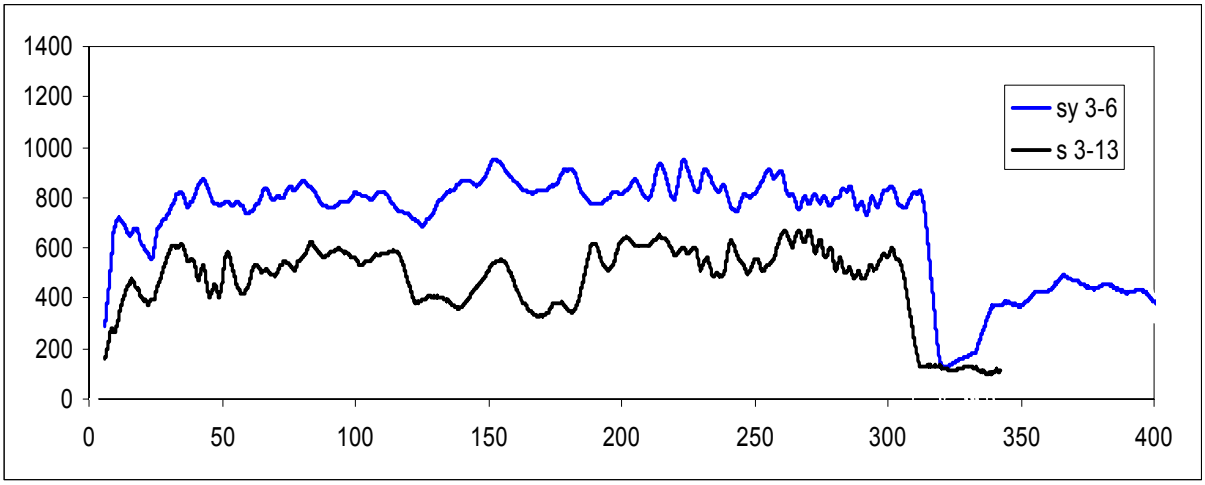
Obrázek 5 – přístroj Resistograph 2450p.

Příklady křivek změřených pomocí přístroje Resistograph ve vybraných měřících místech před požárem (sy - modrá křivka) a po požáru (s – černá křivka) konstrukce, jsou uvedeny na následujícím obrázku (obr. 6):









Obrázek 6 – křivky spotřeby energie při průchodu vrtáku materiálem – Resistograph 2450p, před požárem – sy (modrá barva), po požáru – s (černá barva).

Výsledky měření Resistographem:

Průběh a tvar křivek získaných z měření před a po požáru je, kromě malých odchylek, ve většině měřených míst stejný. Odlišnosti v průběhu zaznamenaných křivek byly způsobeny drobným poškozením struktury dřeva nově vzniklým při požáru. Některé z odlišností mohly být způsobeny drobným posunem místa měření po požáru.

U křivek získaných z měření na trámech po požáru byl patrný nárůst rozdílu mezi horními a dolními vrcholy průběhu křivky. Změny průběhu křivky by mohly souviset s rozdílným zvýšením vlhkosti v jarním a letním dřevě letokruhů po nasáknutí vodou při hašení požáru. Vlivem zvětšení vzdálenosti mezi horními a dolními vrcholy se zvýšila průměrná délka křivek změřených po požáru až o 40% oproti průměrné délce křivek před požárem (obr. 7).

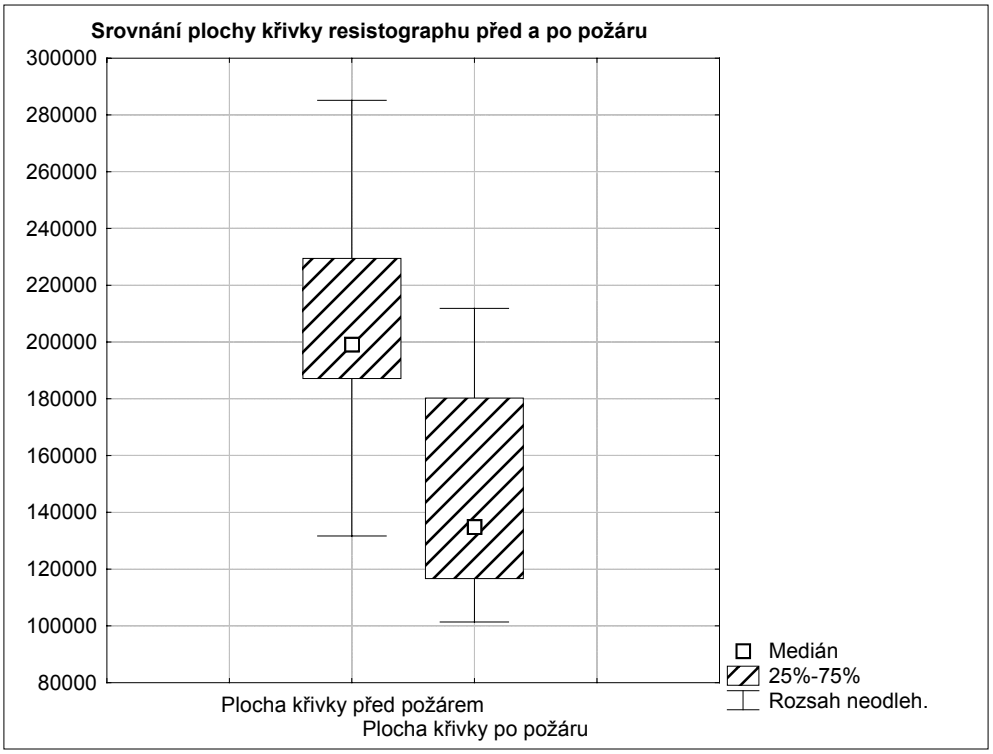
Z naměřených křivek je ve všech měřících místech patrný pokles celkové energie potřebné k průniku tenkého vrtáku do dřeva po požáru. Pokles znamená snížení odporu dřeva kladeného materiálem vnikajícímu vrtáku. Snížení hodnot bylo výrazně ovlivněno vlhkostí dřeva, která po požáru stoupla na průměrnou hodnotu 88%. Celková energie vynaložená na průnik vrtáku do materiálu po požáru klesla o 29% proti energii vynaložené na vrtání před požárem (obr. 8).

Feio et al. (2005) uvádí, jako jeden ze sledovaných parametrů, podíl plochy pod naměřenou křivkou a délky měřeného úseku h (v našem případě tloušťka trámu), označovaný jako míra odporu RM (1). Vzhledem k tomu, že RM parametr odporu závisí i na průměru vrtátu, zavádíme jako odporovou charakteristiku bezrozměrné číslo RP, které je definováno rovnicí (2), kde d je průměr vrtáku.

$$RM = \frac{\int_0^h Area}{h} \quad (1) \qquad RP = \frac{\int_0^h Area}{h.d} \quad (2)$$

Míra odporu se u měření na trámech poškozených požárem snížila o 42% oproti stavu před požárem konstrukce. Hodnota míry odporu je závislá na celé řadě faktorů, např. vhkosti, hustotě, stáří dřeva, orientaci vývrtu k letokruhům apod., podstatně ovlivňujících její velikost.

Obrázek 7 – srovnání délek křivek změřených přístrojem Resistograph v jednotlivých měřících bodech před a po požáru konstrukce.



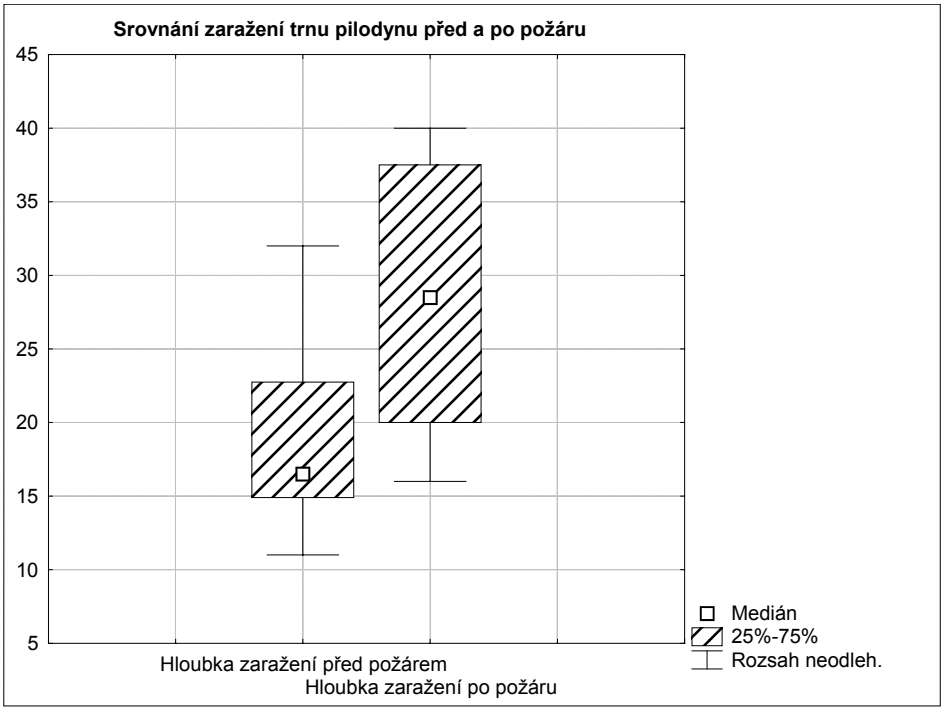
Obrázek 8 – srovnání ploch pod křivkami změřenými přístrojem Resistograph v jednotlivých měřících bodech před a po požáru konstrukce.

Odporové metody - Pilodyn

Přístroj Pilodyn 6J Forest je jednoduché mechanické zařízení umožňující měřit hloubku průniku trnu, vystřeleného do dřeva při konstantní zarážecí síle 6 J. (obr. 9). Maximální hloubka průniku trnu je konstrukcí přístroje omezena na 40 mm. Naměřené hodnoty lze využít pro hodnocení kvality povrchových vrstev dřeva.

Při měření po požáru konstrukce se trn ve všech místech měření zarazil do větší hloubky než před požárem. Průměrná hloubka zaražení trnu do trámů po požáru se zvýšila o 33% oproti hloubce zaražení trnu před požárem (obr. 10). Zvýšení hloubky průniku trnu souvisí pravděpodobně se zvýšením vlhkosti dřeva a vznikem menších defektů (trhlinek) v povrchových vrstvách dřeva.

Obrázek 9 - přístroj Pilodyn 6J Forest.



Obrázek 10 – srovnání hloubky zaražení trnu před a po požáru konstrukce.

Akustická metoda - Arborsonic Decay Detector (ADD)

Přístroj ADD, je založen na měření rychlosti šíření elastické deformace v dřevěné konstrukci, která se měří mezi vysílačem a přijímačem (obr. 11). Měření může být aplikováno in situ za předpokladu, že jsou prvky přístupné k přiložení snímacích sond z obou stran. Měření rychlosti závisí na směru přenosu signálu, kterým jsou ultrazvukové vlny o frekvenci 77 kHz. Z doby průchodu vlny a vzdálenosti sond lze výpočtem stanovit rychlost průchodu vlny prvkem. U zabudovaného dřeva se proto rychlost měří především v příčných směrech, tj.v tangenciálním a radiálním.

Obrázek 11 – přístroj Arborsonic Decay Detector (ADD).

Rychlost šíření akustických vln závisí na druhu dřeva, přičemž šíření akustického pole ve dřevě má anizotropní charakter. Průměrná rychlost šíření ultrazvuku ve dřevě pro námi zkoumané jedlové dřevo napříč vláken při vlhkosti 12% je 1033 m/s^{-1}(Požgaj a kol., 1997). Dobu přenosu vlny v dřevěných prvcích velmi ovlivňuje přítomnost dutin, imperfekcí, cizorodých prvků nebo dřeva v rozkladu. Je-li prvek degradovaný biotickými činiteli, dochází k významnému prodloužení doby přenosu vln. V hmotném prostředí se zvukové vlny šíří rychlostí, která závisí na vlastnostech tohoto prostředí a na podmínkách okolí, především na tlaku, teplotě a vlhkosti prostředí.

Z naměřených hodnot rychlostí šíření ultrazvukové vlny je patrné, že před požárem byly na více než polovině měření zjištěny hodnoty pohybující se nad 1000 m/s^{-1}, tzn. že nadpoloviční počet zhlaví nebyl před požárem poškozen degradací dřeva. Rychlosti vypočítané z času průchodu ultrazvuku nosnými trámy po požáru se od měření provedených před požárem lišily i po přepočtu na původní vlhkost (průměrně 24%). Některá nová měření po přepočtu vykazovala vyšší rychlosti než před požárem. U některých trámů vysoká vlhkost materiálu a poměrně masivní profily ovlivňovaly měření přístrojem ADD natolik, že výsledné hodnoty nebyly použitelné, neboť údaj doby průchodu se dostával mimo rozsah přístroje.

Výhodou ultrazvukového přístroje ADD oproti odporové metodě přístrojem Resistograph je absolutní nedestruktivnost působení na materiál a větší rozsah použití, nevýhodou je nemožnost hloubkové lokalizace a určení rozsahu a druhu poškození.

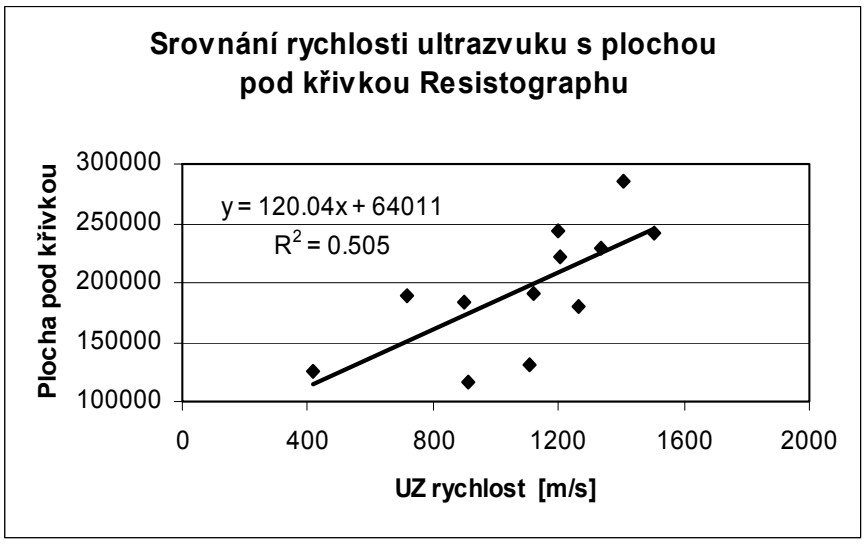
Srovnání metod aplikovaných při průzkumu

Metody použité na zjišťování materiálových vlastností historické konstrukce využívají rozdílné fyzikální principy. Srovnání dosažených výsledků bylo velmi obtížné. Z důvodu povrchového zjišťování vlastností dřeva přístrojem Pilodyn není možné naměřené výsledky porovnávat s hodnotami naměřenými Resistografem a ultrazvukem, které postihují celý profil měřeného prvku.

Rychlost průchodu ultrazvukové vlny u akustické metody, stejně jako množství energie potřebné k průniku vrtáku u odporové metody, závisí především na hustotě, vlhkosti a množství defektů v materiálu. Za předpokladu, že je hustota zdravého dřeva stejná, klesá u akustické metody rychlost šíření vln a u odporové metody množství spotřebované energie se vzrůstající vlhkostí a stoupajícím množstvím defektů v materiálu.

Lze proto předpokládat, že rychlost šíření ultrazvukových vln ve dřevě bude klesat v souvislosti s klesající spotřebou energie potřebné k průniku vrtáku do dřeva.

Hodnoty naměřené při průzkumu na podlahových trámech tuto závislost potvrdily (obr. 12).



Obrázek 12 – závislost rychlosti šíření ultrazvukových vln na energii potřebné pro průnik vrtáku dřevem.

3. Závěr

Dosažené výsledky jsou ovlivněny především odlišným obsahem vlhkosti dřeva před a těsně po požáru, kdy bylo dřevo neúměrně zvlhčeno vodou při hašení. Značný vliv má i rozložení vlhkosti v profilu masivních dřevěných prvků.

Vlhkostní změny mají relativně nejmenší vliv na výsledky měření přístrojem Resistograph. Vzrůst vlhkosti konstrukce po požáru se zde projevil poklesem celkové

spotřeby energie potřebné k průniku vrtáku do materiálu, tvar a charakteristické rysy naměřených křivek před a po požáru však zůstaly zachovány.

Při měření přístrojem Pilodyn se vlhkostní změna po požáru projevila většími hloubkami zaražení trnu v měřených místech. Dosažení větších hloubek souvisí se snížením pevnosti povrchových partií dřeva vlivem zvýšené vlhkosti a poškození požárem.

Akustická metoda přinesla dobré výsledky při měření před požárem. Při měření provedených po požáru byl v některých měřících místech vliv limitujících faktorů (vlhkost, destrukce povrchových vrstev dřeva) natolik výrazný, že neumožnil objektivní měření.

Z porovnání akustické a odporové metody je zřejmá závislost výsledků na stejných faktorech, zejména na vlhkosti dřeva. Rychlost šíření ultrazvukových vln i celková energie potřebná k průniku vrtáku materiálem klesá se stoupající vlhkostí materiálu a vzrůstajícím počtem defektů v měřeném místě dřevěného prvku.

Z dosažených výsledků vyplývá potřeba provedení doplňkových laboratorních i terénních studií, zaměřených na podrobnější sledování vlivu teplotních a vlhkostních účinků na měřené fyzikální veličiny.

4. Poděkování

Příspěvek byl zpracován díky finanční podpoře výzkumných záměrů MSM 6215648902 a AVOZ 20710524, dále byl podpořen grantovým projektem IG 460431/2102/443.

5. Literatura

Kasal, B. & Anthony, R. (2004) Advances in in situ evaluation of timber structures. Progress in Structural Engeneering and Materials. John Villey & Sons Ltd. London. UK. Vol. 6 No 2 April-June 2004, 94-103.

Drdácký, M., Jirovský, I., Slížková, Z. (2005) On structural health and technological survey of historical timber structures, in Procedings "Conservation of Historical Wooden Structures" (G. Tampone, ed.), Vol. 1, pp 278-284, Collegio degli Ingegneri della Toscana, Florence.

Kasal, B. (2003) Semi-destructive method for in-situ evulation of compressive strength of wood structural members. Forest Product Journal. 53 (11/12): pp 55-87.

Bláha, J. Kyncl, T. (2004) Pernštejn – granary store houses, research report, Brno.

Feio, A.O., Machado, J.S., Laurenço, P.B. (2005) Parallel to the Grain Behavior and NDT Correlations for Chestnut Wood (*Castanea Sativa Mill*). In Proc: Conservation of Historic Wooden Structures. Florence, Italy: pp 294-303.

Požgaj, A., Chovanec, D., Kurjatko, S., Babiak, M. (1997) Štruktúra a vlastnosti dreva. Príroda, Bratislava, 485 s.