



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta stavební  
Katedra železničních staveb**

**EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ PARAMETRŮ KONTAKTU  
KAMENIVA KOLEJOVÉHO LOŽE A PRAŽCE**

**EXPERIMENTAL DETERMINATION OF CONTACT PARAMETERS  
BETWEEN RAILWAY BALLAST AND A SLEEPER**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Jaroslav Jeřábek

Studijní program: Stavitelství  
Studijní obor: Realizace pozemních a inženýrských staveb  
Vedoucí práce: Ing. Vít Lojda

**Praha, 2019**


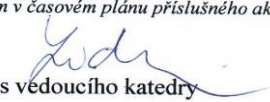


## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE


Příjmení: <u>Jeřábek</u>	Jméno: <u>Jaroslav</u>	Osobní číslo: <u>321666</u>
Zadávací katedra: <u>Katedra železničních staveb</u>		
Studijní program: <u>Stavitelství</u>		
Studijní obor: <u>Realizace pozemních a inženýrských staveb</u>		

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: <u>Experimentální stanovení parametrů kontaktu kameniva kolejového lože a pražce</u>	
Název bakalářské práce anglicky: <u>Experimental determination of contact parameters between railway ballast and a sleeper</u>	
Pokyny pro vypracování: Zpracujte rešerši zdrojů na téma "Experimentální metody stanovení parametrů kontaktu kameniva kolejového lože a ložné plochy pražce". V laboratorní části bakalářské práce použijte metodu stanovení parametrů kontaktu pomocí tlakového papíru, kterou nejprve verifikujte provedením zkoušky s ocelovými tělesy o známých rozměrech. Laboratorní zkoušku proveďte se sérií zkušebních těles vyrobených z různých příčných pražců, které jsou dostupné na Fakultě stavební, ČVUT v Praze. Jako model kameniva kolejového lože při provádění laboratorní zkoušky zvolte šterkovou desku GBP (angl. Geometric Ballast Plate). Při volbě zatížení ložné plochy pražce vycházejte z hmotnosti na nápravu dle traťových tříd. Proveďte vyhodnocení naměřených dat, diskusí výsledků a zpracujte závěr.	
Seznam doporučené literatury: 1) Předpis SŽDC S3 Železniční svršek, SŽDC, Praha, 2008. 2) Předpis SR 103/3 (S) Služební rukověť. Výkresy materiálu pro železniční svršek. Kolej, SŽDC, Praha, 2010. 3) T. Abadi, L. Le Pen, A. Zervos, and W. Powrie, Measuring the Area and Number of Ballast Particle Contacts at Sleeper/Ballast and Ballast/Subgrade Interfaces, Int. J. Railw. Technol., vol. 4, no. 2, 2015. 4) B. Balážová, Posouzení velikosti kontaktní plochy mezi podpražcovou podložkou a kamenivem kolejového lože, ČVUT v Praze, 2010.	
Jméno vedoucího bakalářské práce: <u>Ing. Vít Lojda</u>	
Datum zadání bakalářské práce: <u>18. 2. 2019</u>	Termín odevzdání bakalářské práce: <u>26. 5. 2019</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
 Podpis vedoucího práce	 Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

<u>18. 2. 2019</u> Datum převzetí zadání	 Podpis studenta(ky)
---	---

---

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci na téma *Experimentální stanovení parametrů kontaktu kameniva kolejového lože a pražce* vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsou citovány.

V Praze dne .....

.....

Jaroslav Jeřábek

---

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS SGS18/050/OHK1/1T/11.

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Vítu Lojdovi za vedení experimentu, za odborné rady, konstruktivní připomínky, za poskytnutí odborných zdrojů a v neposlední řadě za ochotu konzultovat veškeré náležitosti prováděných pokusů, vyhodnocování výsledků a zpracování práce.

Děkuji dalším lidem z Katedry železničních staveb, zejména Doc. Ing. Haně Krejčířkové, CSc. a Doc. Ing. Martinu Lidmilovi, PhD., kteří mi poskytovali cenné rady a zázemí.

Děkuji také společnosti Impregnace Soběslav s.r.o. za poskytnutí impregnovaných prážců k prováděným experimentům.

---

## Anotace

Tato bakalářská práce se zaměřuje na přenos zatížení od drážních vozidel do kameniva kolejového lože metodou tlakového papíru, která umožňuje kvantifikaci kontaktních parametrů na rozhraní mezi ložnou plochou pražce a kamenivem. Tratě s klasickou konstrukcí železničního svršku se skládají ze železničních pražců, které splňují zejména funkce spojené s podporováním kolejnicových pásů a zajištění stabilního rozchodu koleje, umožňují instalaci systému upevnění a nakonec roznášejí nápravové zatížení na kamenivo kolejového lože vyrobené z přírodního drceného kamene. Parametry kontaktu mezi ložnou plochou pražce a drceným kamenivem ovlivňují odpor koleje a opotřebení kameniva a tím i životnost kameniva. Hlavními parametry jsou pronikání zrn na povrchu pražce a kontaktní plocha a tlak mezi pražcem a zrny. Rozložení zatížení přenášeného na kolejové lože závisí na tuhosti pražce vyplývající z konstrukce pražce a aplikovaném materiálu. Aplikace předpjatého betonu, impregnovaného dřeva nebo polymerů představuje současný stav techniky mezi materiály aplikovanými při výrobě železničních pražců. Pražce z jmenovaných materiálů mají rozdílnou tuhost a tvrdost povrchu. V tomto výzkumu byla použita metoda tlakového papíru založeného na bázi ultratenké polyesterové folie s mikrokapslemi, které při aplikaci specifického tlaku indikují zatížení prostřednictvím červené barvy. Tato metoda byla využita mezi ložnou plochou pražce a kolejovým ložem pro určení kontaktních parametrů. Laboratorní zkouška byla zaměřena na nejzatíženější část pražce, kterou je oblast pod kolejnicovým pásem. Zkouška byla prováděna na vzorcích připravených z pražců nebo trámů. Statická síla reflektující zatížení drážním vozidlem zatěžovala zkušební tělesa z pražců a byla vypočtena pomocí typických lineárních vzorců pro železniční svršek. Pro laboratorní modelování kolejového lože byla použita normovaná profilovaná šterková deska z oceli. Vybraná zkušební tělesa připravená z pražců z různých materiálů vykazala z hlediska kontaktních parametrů různé výsledky. Provedené zkoušky poskytly dostatek zkušeností a dat pro možnou laboratorní zkoušku s celým pražcem v laboratorním boxu vyplněném kamenivem.

### **Klíčová slova:**

Pražec, šterkové lože, kontaktní plocha, tlakový papír, kontaktní parametry.

---

## **Annotation**

This thesis focuses on the transmission of loads imposed by passing trains to railway aggregates utilizing a pressure paper method, which enables the quantification of contact parameters on the interface between the railway sleeper bottom and railway ballast. Modern railway ballasted tracks consist of railway sleepers which fulfill especially the functions related to holding rail strings in the gage and inclination, enable fastening system installation, and finally spread wheel loads on the ballast made typically of natural crushed stone. The contact parameters between the sleeper soffit and crushed stone influence the lateral track stability and the ballast wear and thus the aggregates service life. The main parameters are the indentation of grains on the sleeper surface and the contact area and the pressure between the sleeper and the grains. The load distribution transmitted to the ballast bed relies on the sleeper bending stiffness depending on the sleeper structure and applied material. Utilizing pre-stressed concrete, impregnated wood or polymers representing the state of the art among the materials used in the production of railway sleepers, the sleeper stiffness varies as well as the sleeper surface hardness. In this research, ultrathin polyester-based pressure paper with microcapsules developing a red colour agent when applying specific pressure was used between the sleeper soffit and the ballast bed to determine the contact parameters. The laboratory test focused on the most loaded part of the sleeper, the sleeper rail seat. The test was conducted on samples prepared as sleeper sections. The static force reflecting the traffic resembling the load acting on the sleeper samples was calculated using typical linear formulas. A standardized geometric ballast plate made of steel was used for modelling the track bed aggregates at the rail seat. A wide selection of samples prepared from sleepers of a different material and structural basis showed different performances from the perspective of contact parameters on the sleepers' soffit. The performed test provided enough experience and data for developing a follow-up, full-scale laboratory test with the whole sleeper body in a laboratory ballast box filled with aggregates.

## **Keywords:**

Sleeper, ballast bed, pressure paper, contact.

# Obsah

<b>Úvod .....</b>	<b>1</b>
<b>Rešeršní část .....</b>	<b>2</b>
<b>1 Konstrukce železniční trati .....</b>	<b>2</b>
<b>2 Příčné pražce .....</b>	<b>3</b>
2.1 Dřevěné pražce .....	3
2.2 Betonové pražce .....	5
2.3 Ocelové pražce .....	5
2.4 Polymerní pražce .....	6
<b>3 Kolejové lože.....</b>	<b>6</b>
<b>4 Laboratorní metody měření kontaktní plochy mezi prvky železničního svršku .</b>	<b>7</b>
4.1 Rešerše laboratorních metod .....	7
4.2 Metoda tlakového papíru .....	9
4.2.1 Popis .....	9
4.2.2 Princip .....	9
4.2.3 Použití .....	10
4.2.4 Specifikace a provozní prostředí (dle výrobce) .....	10
<b>5 Možnosti náhrady kameniva profilovanou deskou .....</b>	<b>10</b>
<b>Laboratorní část.....</b>	<b>15</b>
<b>6 Laboratorní praxe s metodou tlakového papíru .....</b>	<b>15</b>
6.1 Laboratorní verifikace tlakového papíru .....	16
6.1.1 Ocelová zkušební tělesa .....	17
6.1.2 Pryžové desky a další materiály .....	18
6.1.3 Plexisklo .....	19
6.2 Zpracování dat .....	20
6.2.1 Grafické výstupy .....	20
6.2.2 Numerické výstupy .....	21
6.2.3 Volba časového působení zatížení v software .....	21
<b>7 Volba zatížení pro laboratorní zkoušku.....</b>	<b>22</b>
<b>8 Zkušební tělesa.....</b>	<b>23</b>
8.1 Bukový impregnovaný pražec .....	24
8.2 Dubový impregnovaný pražec .....	25
8.3 Borové dřevo .....	26
8.4 Pražec z tropického dřeva .....	27
8.5 Betonový vzorek.....	27
8.6 Polymerní pražec .....	28
<b>9 Laboratorní a přístrojové vybavení .....</b>	<b>29</b>
<b>10 Postup provádění laboratorní zkoušky .....</b>	<b>30</b>
<b>11 Výsledky.....</b>	<b>30</b>

<b>Závěr</b> .....	<b>34</b>
12 Vyhodnocení výsledků – porovnání materiálů .....	34
13 Vliv kontaktní plochy .....	34
14 Směr dalšího výzkumu .....	35
<b>Příloha č. 1</b> .....	<b>39</b>



## Abecední seznam použitých symbolů a akronymů

AVR	antivibrační rohož
F	síla [N]
$\gamma$	dynamický součinitel
GBP	šterková deska
GPK	geometrické parametry koleje
l	délka [m]
m	hmotnost [kg]
OTP	obecné technické podmínky
p	tlak [Pa]
PE	polyetylen
PU	polyuretan
SŽDC	Správa železniční dopravní cesty
V	rychlost [ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ ]

## ÚVOD

Tato bakalářská práce je zaměřena na experimentální stanovení parametrů kameniva kolejového lože a pražce. Věnuje se problematice klasické konstrukci koleje se železničním svrškem, ve kterém se dva kolejnicové pásy ukládají na příčné pražce, které jsou uloženy v kamenivu kolejového lože. Železniční pražce plní zejména funkce spojené s držením kolejnicových pásů a přenášením sil včetně roznášení zatížení kol na kolejové lože.

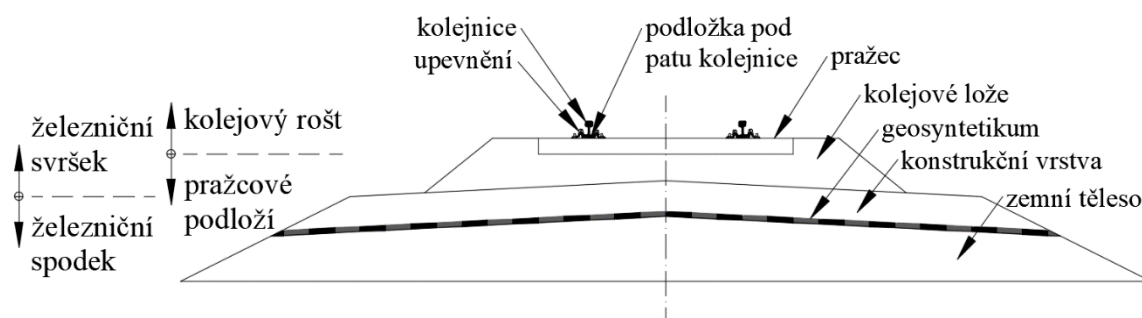
Parametry kontaktu mezi pražce a kamenivem kolejového lože ovlivňují stabilitu tratě a opotřebení šterku, a tím i celkovou životnost, respektive nutnost obnovy. Hlavními parametry jsou zatlačení zrn do pražců, kontaktní plocha a tlakové napětí mezi pražcem a zrny kameniva. Rozložení zatížení přenášené na šterkové lože závisí na tuhosti pražce v závislosti na jeho konstrukci a materiálu.

Namísto kameniva byla při experimentálních měření v laboratoři použita šterková deska GBP (angl. Geometric Ballast Plate), tj. profilovaná nerezová deska simulující šterk kolejového lože. Byla použita metoda tlakového papíru a zkoumány parametry jednotlivých vzorků příčných pražců z různých materiálů, konkrétně dřevo – buk, dub, borovice a tropické dřevo azobe, dále předpjatý beton, a to jak samostatně, tak s podpražcovou podložkou, a nakonec pražec polymerní.

## REŠERŠNÍ ČÁST

### 1 Konstrukce železniční trati

Tato bakalářská práce je zaměřena na experimentální stanovení parametrů kameniva kolejového lože a pražce. Věnuje se klasické konstrukci koleje železniční trati tvořené železničním svrškem a železničním spodkem (Obr. 1). Z pohledu přenášení zatížení od pojíždějících železničních vozidel se železniční trať dělí na kolejový rošt a pražcové podloží složené z několika vrstev. To vychází z konkrétního přenosu zatížení.[1]



Obr. 1: Konstrukce železniční trati (zdroj: Ing. Vít Lojda).

Železniční svršek, který tvoří jízdní dráhu pro železniční vozidla, je jednou ze základních částí železniční dopravní cesty. Jeho hlavní funkcí je bezpečné vedení a nesení vozidel a přenášení zatížení od pojíždějících železničních vozidel na železniční spodek.

Železniční svršek se skládá z následujících základních konstrukčních částí:

- kolej: dva kolejnicové pásy (svařené u bezстыkové koleje nebo spojené spojkami u koleje stykované) upevněné na podpory,
- výhybky a kolejové křižovatky (výhybkové konstrukce). [2]

Základními součástmi železničního svršku jsou:

- Kolejnice, jejichž úkolem je zabezpečení vedení železničních vozidel a přenášení veškerých sil vznikajících provozem na podpory. Kolejnice jsou nejvíce namáhanou součástí koleje, neboť jsou v bezprostředním styku s koly vozidel. Kola jim na malých styčných plochách předávají velké statické tlaky a dynamické rázy, jejichž charakter, směr a velikost se neustále mění. Postupným vývojem tvarů byla vytvořena kolejnice širokopatní skládající se z hlavy, stojiny a paty. Rozměr průřezu vychází z provozních podmínek, kterými jsou hmotnost

na nápravu, rychlost, konstrukční uspořádání atd. Nyní používanými typy jsou 49E1, dříve označovaný S4 9 (Tento typ byl uvažován ve výpočtech této bakalářské práce.) nebo UIC 60, nově značený 60E1 nebo 60E2.

- Kolejnicové podpory, které v součinnosti s upevněním zajišťují přenos zatížení do pražcového podloží a zabezpečují rozchod koleje a tuhost kolejového roštu. Nejrozšířenějším typem kolejnicových podpor jsou příčné pražce a výhybkové pražce. Na některých mostech se používají mostnice, pozednice, ve zvláštních případech se používá podélných pražců, prahů nebo ojedinělých podpor.[1], [2]

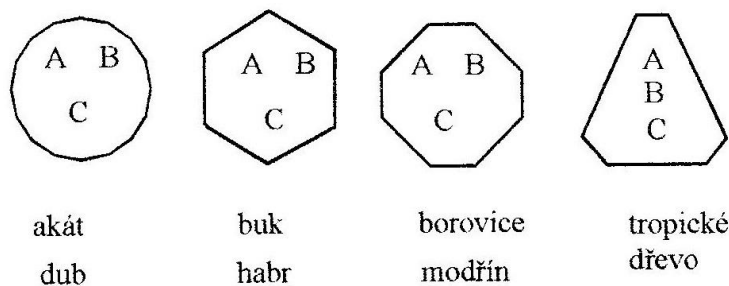
V klasické konstrukci koleje tvoří kolejnice spolu s příčnými pražci kolejový rošt.

## 2 Příčné pražce

Příčné pražce se ukládají kolmo na osu koleje, ve směrových obloucích radiálně. Jejich vzdálenost vychází z počtu pražců na 1 km koleje, který se nazývá rozdělení pražců (označení  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$  a  $u$ ). Příčné pražce dle materiálu jsou uvedeny v následujících kapitolách. [1]

### 2.1 Dřevěné pražce

Příčné dřevěné pražce jsou nejstarším typem pražců, používaly se prakticky od počátku provozování železničních tratí. Jejich výhodou je dostatečná pružnost, snadné připevnění kolejnice k pražci a malá hmotnost a tím snadná manipulace, vzhledem k povaze materiálu také dobrá opracovatelnost a relativně dlouhá doba životnosti. V současné době se také zjišťuje a také touto bakalářskou prací potvrzuje, je neopominutelnou předností větší kontaktní plocha s kamenivem kolejového lože, tudíž menší tlakové napětí s jednotlivými zrny kameniva a tím jeho menší opotřebení. Naopak nevýhodou je nedostatek kvalitního dřeva pro jejich výrobu. Pro tratě ČR se dřevěné pražce vyráběly z buku, dubu, borovice, modřínu a případně akátu a habru. Zejména výhybkové pražce se z důvodu dobré opracovatelnosti a dalších popisovaných kladných vlastností materiálu vyrábějí z borového, případně bukového dřeva. Dle použitého dřeva na výrobu jsou pražce označovány příslušnými hřeby s různými tvary hlav (Obr. 2). Nyní se dřevěné pražce používají zejména v kolejích, kde není vhodné zvyšovat hmotnost kolejových polí nebo tam kde není možné docílit předepsanou tloušťku kolejového lože pro betonové pražce (tunely) apod.



Obr. 2: Způsob značení dřevěných pražců[1].

Podle tvaru se dřevěné příčné pražce dělí na ostrohranné (byly zkoušeny), centrické a excentrické. Dříve se z kmenů menších průměrů vyráběly i pražce povalové.

Ostrohranné dřevěné příčné pražce se vyrábí z profilů tloušťky  $h$  150 mm, případně 160 mm a šířky 240 mm, 250 mm, případně 260 mm. Obvyklé délky příčných pražců jsou 2,50 m a 2,60 m.

Ihned při výrobě na pile se dřevěné příčné pražce musí zajistit na obou čelech proti vzniku a rozšiřování trhlin. To se provádí například protištěpnými destičkami (Obr. 3), nebo ocelovou páskou.



Obr. 3: Protištěpná destička bukového pražce.

Pro zajištění dlouhodobé životnosti se musí všechny dřevěné příčné pražce impregnovat impregnačním olejem, který splňuje hygienické podmínky a podmínky ochrany životního prostředí. Postup impregnace závisí na druhu použitého dřeva. U bukových pražců je spotřeba oleje  $160 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , tj. cca 16 kg na kus a proimpregnování musí být nejméně 65 % příčného průřezu pražce.[1]

Vzhledem k nedostatku místního kvalitního dřeva je možnost použití tropického dřeva, které navíc díky svým přirozeným vlastnostem impregnaci nevyžaduje.

## 2.2 Betonové pražce

Jako náhrada dřevěných příčných pražců vznikaly pražce z vyztuženého betonu a později z předpjatého betonu. U betonu je snaha využít jeho vysoké pevnosti v tlaku a vyrovnání jeho nedostatečné pevnosti v tahu, která způsobuje při zatížení trhliny. Proto jsou používány pražce s předpjatou výztuží, v současnosti většinou předpjatou předem. Postupným vývojem (u nás od roku 1950) bylo vyráběno mnoho druhů betonových pražců různých tvarů, pro různá upevnění, s různým úklonem úložných ploch apod. V současnosti se v ČR vyrábí pražce B 91P (dříve B91S/5), B03 a omezeně SB8P [1].

Kromě značné hmotnosti předpjatých betonových pražců, která má kromě vyššího zatížení konstrukce železniční trati výrazný negativní dopad na přepravu při stavbě, je další nevýhodou nutnost větší tloušťky kolejového lože. Vzhledem k unifikaci vyráběných předpjatých betonových příčných pražců jsou ve výhybkách používány pražce dřevěné, například borové nebo bukové.

Další výrazně zápornou vlastností předpjatých betonových příčných pražců je jejich malá kontaktní plocha s kamenivem kolejového lože a tím výrazně vyšší tlakové napětí, které má na styčná zrna kameniva značně degradující vliv. V současnosti je toto řešeno používáním podpražcových podložek (USP), které kontaktní plochu výrazně zvyšují a tím opotřebení a následnou nutnou údržbu a obnovu kolejového lože optimalizují [3].

## 2.3 Ocelové pražce

Dalším materiálem pro výrobu příčných pražců je ocel. V souvislosti s elektrifikací tratí a jejich cenou již nejsou v kolejích v ČR používány. Klasické „žlabové“ (jinak „korýtkové“) ocelové pražce se vyráběly válcováním ve tvaru obráceného žlabu výšky 90 mm, šířky 270 mm a délky 2,5 m. Oba konce žlabu byly vytvarovány tak, aby po uložení do kolejového lože a vyplnění vnitřního prostoru žlabu pražce kamenivem byla zajištěna příčná stabilita pražce v kolejovém loži [1]. Na nových zkušebních úsecích se v současnosti můžeme setkat s ocelovými pražci tvaru „Y“.

## 2.4 Polymerní pražce

Nejnovějším materiálem pro výrobu příčných pražců jsou polymery. Polymerní příčné pražce se vyvíjejí v mnoha velmi odlišných tvarech od klasických hranolů stejných rozměrů jako dřevěné příčné pražce po různé žebrové a jinak profilované tvary, které mají značné výhody hlavně v zajištění příčné stability, ale také v úspoře materiálu.

Rovněž složení polymerních příčných pražců je různorodé od polymerů jako je polyetylen (PE), přes plastový recyklát po polyuretan (PU) a další. Vzhledem k nedostatečné pevnosti polymerů v tahu musí být pražce vyztuženy ocelovou výztuží (PE), rozptýlenými sklenými vlákny, nebo dlouhými podélnými skelnými vlákny (PU) a jinou.

## 3 Kolejové lože

Kolejové lože tvoří základ konstrukce koleje. Úkolem kolejového lože je roznášení zatížení z kolejového roštu do pražcového podloží a zajištění odporu proti příčnému a podélnému posunu pražců. A dále tlumí dynamické účinky železničních vozidel, zabezpečuje odvod srážkové vody z koleje a umožňuje směrovou a výškovou úpravu polohy koleje.[1]

Kolejové lože je tvořeno kamenivem frakce 32/63. Materiál musí být pevný, aby nedocházelo k jeho drcení při přenášení namáhání od jedoucích vozidel a při podbíjení. Rovněž musí být odolný proti účinkům mrazu, aby neměnil své vlastnosti při střídavém promrzání a rozmrzání. Kamenivo musí odpovídat Obecně technickým podmínkám (OTP) „Kamenivo pro kolejové lože“ z roku 2006. Z hlediska původu se kamenivo pro kolejové lože dělí na:

- nové přírodní (drcené) – např. žula, čedič, andezit, znělec, diorit,
- recyklované (kamenivo vytěžené z kolejového lože a upravené recyklačním zařízením),
- umělé z vysokopecní strusky [1].

Materiál kolejového lože se při zřizování zhutňuje. K urychlení konsolidace šterku se využívá dynamického stabilizátoru. Železničním provozem a podbíjením se vytvářejí pod pražci pevné lavičky ze vzájemně zaklíněných zrn. Odrčováním jednotlivých hran zrn šterku s vysokým napětím (téma této bakalářské práce) a drcením šterku dochází k trvalým deformacím šterkové lavičky, které se projevují

změnou výškové polohy koleje. Změnou zrnitosti štěrkového lože za provozu, znečišťováním spadem jemných částic, případně znečištěním neúnosnou zeminou zemní pláně, která se protlačí do mezer ve štěrkovém loži, dochází ke snižování propustnosti kolejového lože. Podle stavu kolejového lože a provozního zatížení se kolejové lože strojně čistí a doplňuje za období 3 až 6 let [1].

## **4 Laboratorní metody měření kontaktní plochy mezi prvky železničního svršku**

Z důvodu eliminace drcení zrn kameniva kolejového lože a nutné následné údržbě a obnově probíhá mnoho aplikovaných výzkumů spočívajících v měření kontaktní plochy tohoto kameniva s přiléhajícími prvky železničního svršku. Těmito prvky jsou shora příčné pražce, případně přes podpražcovou podložku (USP) a zdola vrchní vrstva železničního spodku, obvykle takzvaná konstrukční vrstva, případně doplněná antivibrační rohoží (AVR).

### **4.1 Rešerše laboratorních metod**

Měření skutečného namáhání, respektive kontaktní plochy mezi příčným pražcem a kamenivem kolejového lože je velmi obtížné, zejména v provozovaných drahách, což je popsáno B. Indraratnou v [4]. Počet zrn kolejového lože, které se přímo dotýkají pražce, je obvykle relativně malý.

V odborné práci [5] Shenton odhadoval, že pražec, který byl na umístěn na trati, může být podporován pouze 100-200 kontaktními body v závislosti na velikosti ložné plochy a velikosti štěrku.

Zakeri a Abbasi v článku [6] představili řadu teoretických distribucí pražcového zátěžového kontaktního tlaku a uvedli, že doporučení Americké asociace železničního inženýrství pro odhad průměrného kontaktního tlaku mezi betonovým pražcem a štěrkovou vrstvou je založeno na zdvojnásobení maximálního zatížení ložné plochy pražce pod kolejnici. Používali snímače zatížení s vysokou přesností, které byly instalovány ve spodní části poloviny pražce (mezi štěrkovou vrstvou a pražcem). Výstupní signály ze siloměrů byly přeneseny do počítače pomocí záznamníku dat a příslušného software.

Vyhodnocení styčné plochy mezi ložnou plochou pražce a zrný štěrkového lože může být provedeno použitím různých technik. Jednodušší řešení lze použít, pokud jsou pražce opatřeny podpražcovými podložkami. Metodika pro měření kontaktní plochy mezi podpražcovou podložkou a zrný štěrkového lože



používaná V. Monako v práci [7] byla založena na vložení listu černého kopírovacího papíru a bílého papíru mezi podpražcovou podložku a kamenivo. Po zatížení byl otisk na bílém papíru převeden skenerem na elektronický formát, plocha byla vypočtena a velikost kontaktní plochy vyjádřena jako poměr ploch obrysů k celkové ploše bílého listu.

Na tento postup navázali B. Balážová pod vedením L. Horníčka v [3], kteří aplikovali nátěr na kamenivo, které se dostalo do styku s podpražcovou podložkou. Po zatížení se kontaktní plocha otiskla na tenkou průmyslovou fólii upevněnou na spodní ploše podpražcové podložky a elektronicky zpracovala pomocí digitálního fotoaparátu a software pro výpočet dvoubarevných obrazů.



Obr. 4: Příklad metody stanovení kontaktní plochy mezi podpražcovou podložkou a kamenivem kolejového lože metodou nátěru kameniva barvou [3].

V nedávné době byly testovány nové technologie měření kontaktního tlaku. Abadi, Le Pen a Zervos popisují v článku [8], jak vložili speciální tlakový papír na rozhraní kameniva kolejového lože a pražce. Takový tlakový papír reaguje na zatížení tlakem zbravením do červena, přičemž intenzita barvy je úměrná velikosti tlaku.

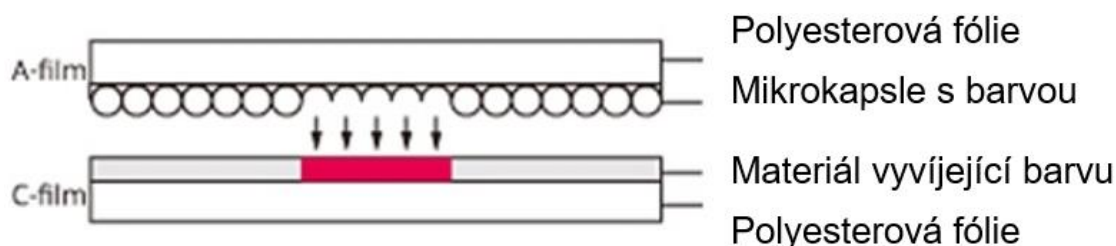
Romero M.G., Dersch M., Edwards J.R., Barkan C., Wilson B. a Mediavilla J., popsali v příspěvku [9] a McHenry, Xu P., Greenwell T.J., Souleyrette R.R. a Rose J.G. v [10], jak použili senzory *Tekscan* pro měření tlaku (maticové dotykové povrchové senzory), které umožňují měření rozložení tlaku mezi dvěma styčnými plochami. Tyto senzory se skládají ze dvou tenkých, pružných polyesterových fólií, které mají elektricky vodivé elektrody uložené v různých vzorech.

## 4.2 Metoda tlakového papíru

### 4.2.1 Popis

Existují dva typy tlakového papíru. Jednovrstvý druh se skládá z polyesterové nosné vložky potažené materiálem pro vývoj barev, na kterém je přímo nanesen mikrokapslový materiál obsahující barvu.

Dvouvrstvý typ se skládá ze dvou polyesterových listů. Jeden je potažen vrstvou s mikrokapslemi obsahujícími barvu a druhý vrstvou materiálu, na kterou se červená barva přenáší a chemicky aktivuje. Musí se použít oba listy, které se k sobě přiloží matnými, tj. aktivními stranami, zatímco lesklé neaktivní strany se přiloží na podložku, respektive zkoumaný materiál. Tento druh tlakového papíru byl použit pro tento výzkum. Je nutné list obsahující barvu vždy přikládat ke zkoumanému vzorku, neboť ten může být znečištěn prachem, nečistotami na zkoumaném tělese, případně dalšími látkami ze vzorku (např. kreosotový olej) a vyhodnocující software by z naskenovaných dat neodlišil barvu vyvinutou tlakem od případného znečištění.



Obr. 5: Schéma principu tlakového papíru.

### 4.2.2 Princip

Při tlaku mikrokapsle praskají a materiál obsahující barvu chemicky reaguje s materiálem vyvíjejícím barvu. Na listu se objevují červené skvrny. Toto je možné naskenovat a pomocí příslušného softwaru s daty dále pracovat, tzn. zejména zjistit na jaké ploše bylo jaké napětí, případně data vyjádřit graficky.

Tlakový papír *Prescale* ojedinělý produkt pro metodu, při které lze měřit tlak, respektive napětí. Mikrokapsle se rozbijí a při aplikaci tlaku reagují s činidlem vyvíjejícím barvu. Příslušný software vyhodnocuje, na jaké ploše bylo jaké napětí a vynásobením je určena celková tlaková síla.

### 2.3.3 Použití

Nejčastější aplikace tlakového papíru je například v automobilovém průmyslu pro nastavení rozložení tlaku a vyvážení pro různé automobilové díly (těsnění hlavy válce motoru, brzdy, spojka, pneumatiky, převodovka atd.), v elektrotechnickém průmyslu (tištěné spoje, polovodičové spoje), v obuvnictví a v různých dalších průmyslových odvětvích, kde je nutné správné nastavení a rozložení tlaku (válce, lisy aj.).

### 2.3.4 Specifikace a provozní prostředí (dle výrobce)

Přesnost:  $\pm 10 \%$  nebo méně (měřeno při 23 °C, 65% vlhkosti),

Doporučená provozní teplota: 20-35 °C,

Doporučená provozní vlhkost: 35-80% relativní vzdušná vlhkost,

## 5 Možnosti náhrady kameniva profilovanou deskou

Místo kameniva kolejového lože lze při laboratorních měřeních využívat různé typy profilovaných desek, které shrnuje Popík v [11]. Profilované desky (Obr. 6 až 12) vystihují svým tvarem a geometrií povrch kameniva kolejového lože. Jejich lehká konstrukce a geometrický design umožňují snadné použití a opakovatelnost v laboratorních testech při změně pouze určitého parametru.



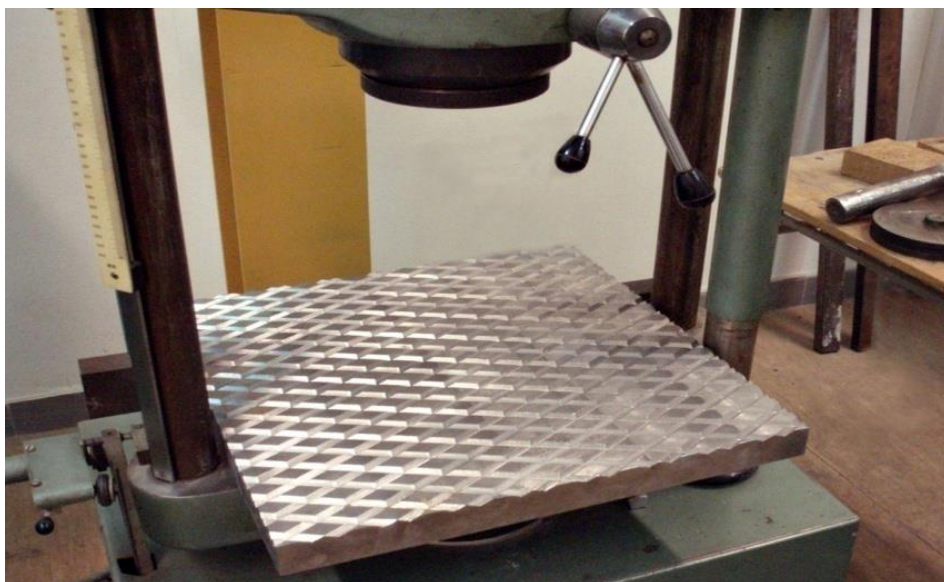
Obr. 6: Zkušební zatěžovací deska s nepravidelným reliéfem vytvořena odlitím kolejového lože (tzv. německá zatěžovací šterková deska) [11].



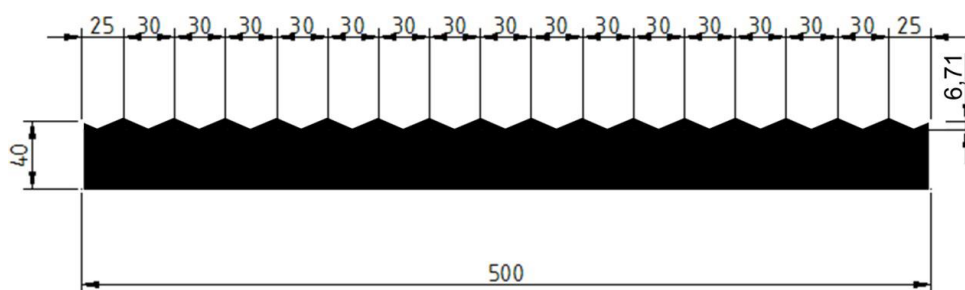
Obr. 7: Experimentální zatěžovací deska firmy Getzner Werkstoffe GmbH s možností změny povrchu vzniklá modifikací německé zatěžovací desky [11].



Obr. 8: Zatěžovací deska vyrobená v Itálii [11].



Obr. 9: Pohled na první českou desku v zatěžovacím lisu [11].



Obr. 10: Řez druhou (optimalizovanou) českou deskou s profilem čtyřbokých jehlanů [11].



Obr. 11: Detail třetí (výsledné) zatěžovací desky [11].



Obr. 12: Štěrková profilovaná deska.

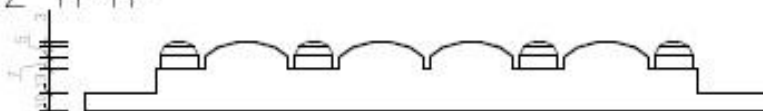
V rámci evropského sjednocení tvarovaných zatěžovacích desek byla vyvinuta deska s označením UIC-SK 899 nově nazývána jako „geometrická štěrková deska“ GBP (angl. Geometric Ballast Plate). Jedná se o tuhou desku předepsaných rozměrů (300×300 mm) a tvaru.

Při této bakalářské práci byla používána nerezová štěrková profilovaná deska představená na Obr. 12 a Obr. 13, jejíž rozměry jsou 300×300 mm. Tato deska odpovídá příslušné normě ČSN EN 16730 (736367). Tato norma doporučuje použít pro několik zkoušek geometrickou zátěžovou desku (GBP) namísto skutečného kolejového lože.

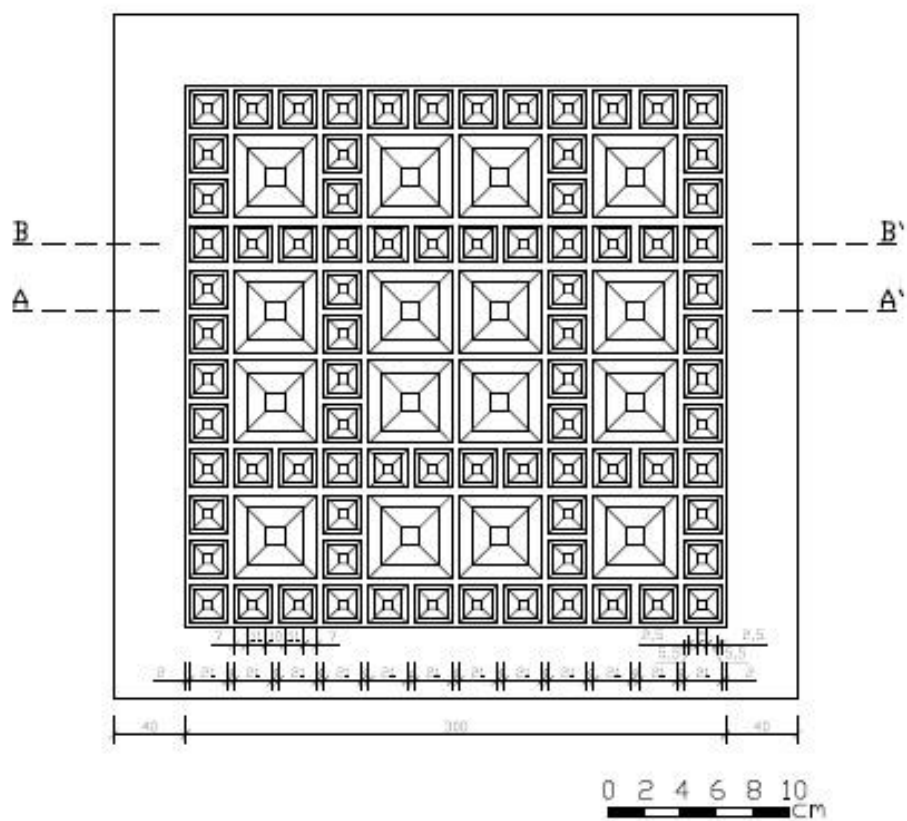
SVISLÝ ŘEZ B-B'



SVISLÝ ŘEZ A-A'



PŮDORYS



Obr. 13: Výkresy štěrkové profilované desky.

## LABORATORNÍ ČÁST

Cílem laboratorní části bylo stanovení parametrů na kontaktu ložné plochy pražce a kameniva kolejového lože nahrazeného prostřednictvím štěrkové profilované desky. Jako použitá laboratorní metoda byl zvolen tlakový papír výrobce FUJIFILM typ Prescale.

### 6 Laboratorní praxe s metodou tlakového papíru

Doporučená provozní teplota pro práci s tlakovým papírem je 20-35 °C. Kontrolně bylo naměřeno 21 až 26 °C.

Doporučená provozní relativní vzdušná vlhkost je v prostředí pro práci s tlakovým papírem 35-80%. Kontrolně byla naměřena 20-40% vlhkost.

Bylo zjištěno, že změna zadávaných údajů teploty a vlhkosti nemá na výsledek měření žádný vliv.

Velikost skenované plochy se při seznamování s metodou tlakového papíru, její verifikaci a celkově při samotném experimentálním stanovení parametrů kontaktu zkoumaných pražců ukázala jako další rozhodující činitel pro rozměr vzorků. Metoda tlakového papíru, respektive zpracovávající software (*FPD-8010E*) sice umožňují zpracovávat plochy rozměrů až 5 × A4 vedle sebe a až 3 × A4, tj. 1050 × 891 mm, je to ale velmi nepraktické a pro toto použití se štěrkovou deskou nepodstatné. Další rozměr vzorku, tj. délka části pražce, byl určen rozměrem skenované plochy na jeden formát A4, tj. 210 mm.

Nejen tím byly určeny obecné rozměry vzorků na 210 × 260 mm. Ve skutečnosti se některé vzorky rozměry drobně lišily vinou nepřesnosti řezání, odlišností z výroby, případně nemožností dělení vzorku betonového. Kromě jednoho pokusného měření na betonovém vzorku ale byla měřicí sestava (štěrková deska, tlakový papír a vzorek) poskládána tak, aby průnik ploch byl právě 210 × 260 mm, respektive zahrnoval vždy stejnou část štěrkové desky a to i v případě vzorku menšího, ale ne o více než vzdálenost k další řadě výstupků desky.

Dalším důvodem pro rozměr vzorků byly rozměry GBP. Další takovou okolností byla šířka pražce, tj. 250, resp. 260 mm a dále šíře obou fólií tlakového papíru, která je 270 mm. Vzorky pražců byly umísťovány tak, že celková plocha

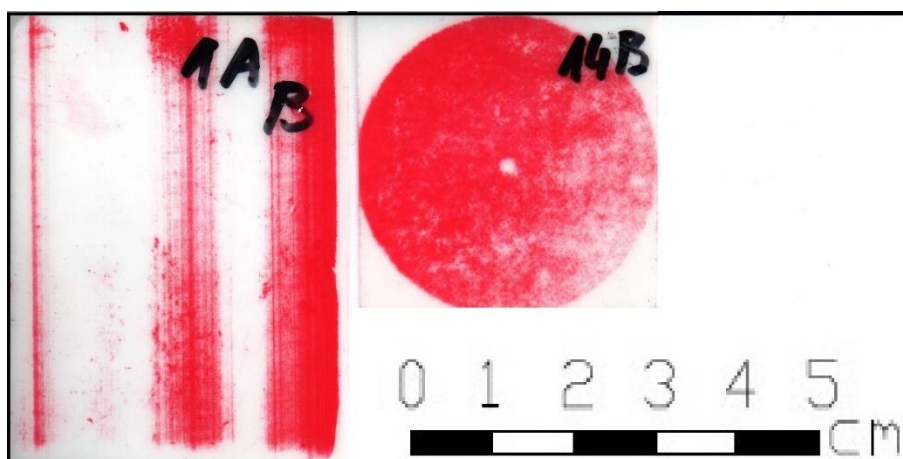




papíru, respektive tlakového papíru po profilované nerezové štěrkové desce a tím prasknutím aktivních mikrokapslí smykem.

### 6.1.1 Ocelová zkušební tělesa

Dle zadání bakalářské práce se měla provést verifikace ocelovými tělesy o známých rozměrech. Toto bylo prováděno nejprve mimo zatěžovací lis s tělesy o známé hmotnosti, kdy to posloužilo hlavně k seznámení se s touto novou metodou tlakového papíru. Výsledky nebyly zdařilé, neboť i při malých silách (pouze hmotnost těles) byly na hranách vzorků překračovány hodnoty napětí používaných zkušebních tlakových papírů typu LW (pro nízký tlak – 2,5 až 10 MPa), LLW (pro super nízký tlak – 0,5 až 2,5 MPa), LLLW (pro ultra super nízký tlak 0,2 až 0,6 MPa) a 4LW (pro extrémně nízký tlak 0,05 až 0,2 MPa), přestože celkovým použitým silám by měly odpovídat. Toto bylo kontrolováno dle porovnání vypočtené síly metodou tlakového papíru a tíhy zkušebních těles.



Obr. 15: Chybně kvantifikovatelné projevy tlaku ocelových těles známých rozměrů.

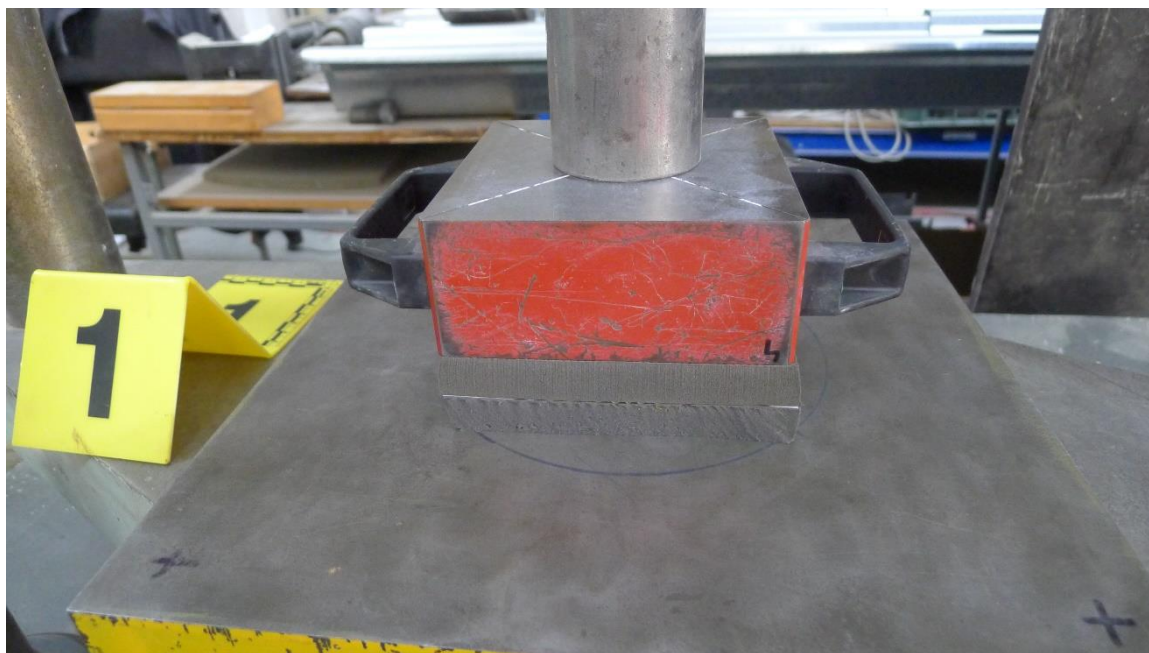
Pro další verifikaci a pro samotné měření vzorků z materiálů příčných železničních pražců byla používána sada tlakového papíru MW (medium pressure – střední tlak) pro interval tlaku 10 – 50 MPa. Což bylo vhodně zvoleno dle výpočtů pro dřevěné pražce.

Zvláštní pozornost se musí věnovat manipulaci s tlakovým papírem vysoké citlivosti, které jsme měli pouze zkušební (ukázkové vzorky tlakového papíru) při seznamování s metodou. Jakékoli dotyky, ohýbání a další kontakty s povrchem barevného listu se projevují.

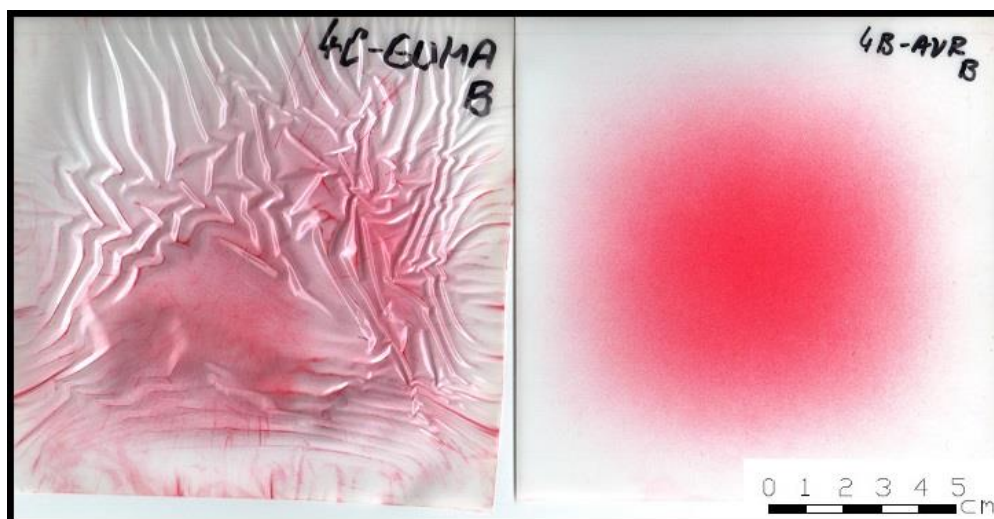
### 6.1.2 Pryžové desky a další materiály

Vzhledem k neúspěchu se samotnými ocelovými tělesy byly zkoušeny podložky z různých materiálů – ocel, dřevo, běžný kancelářský papír, karton, plexisklo aj. Jako výsledná data neovlivňující se ukázaly plexisklo a běžný kancelářský papír, pouze ale při malých silách. Síly vycházející z tíhy zkušebních těles, respektive zatížení lisem bylo ihned porovnáváno s výsledky metody tlakového papíru a dále byl upravován postup.

Při verifikaci v laboratoři byla použita ocelová tělesa o rozměrech styčné plochy  $60,6 \times 45,5$  mm,  $100,4 \times 39,8$  mm a  $120,1 \times 120,3$  mm a kruhu průměru 39,6 mm. Tato tělesa byla pomocí lisu zatěžována různými silami a okamžitě po odtížení byl obraz na tlakovém papíru skenován a vyhodnocován a dle toho upravován další postup. Toto bylo kontrolováno dle porovnání vypočtené síly metodou tlakového papíru a zatížením lisu. Bohužel se znovu ukázalo, že pro metodu jsou tělesa nedostatečně přesná, respektive hladká. Bylo tedy pokračováno v hledání dalších materiálů pro verifikaci. Bylo zkoušeno použití antivibrační rohože (AVR) (Obr. 16), podkládání pryžovou podložkou (Obr. 15 a Obr. 16), běžným kancelářským papírem i kartonem, což mělo výsledky lepší ale, stále velmi nepřesné, způsobené například natahováním použitých podložek a tím i natažením samotného dvojvrstevního tlakového papíru (Obr. 16).



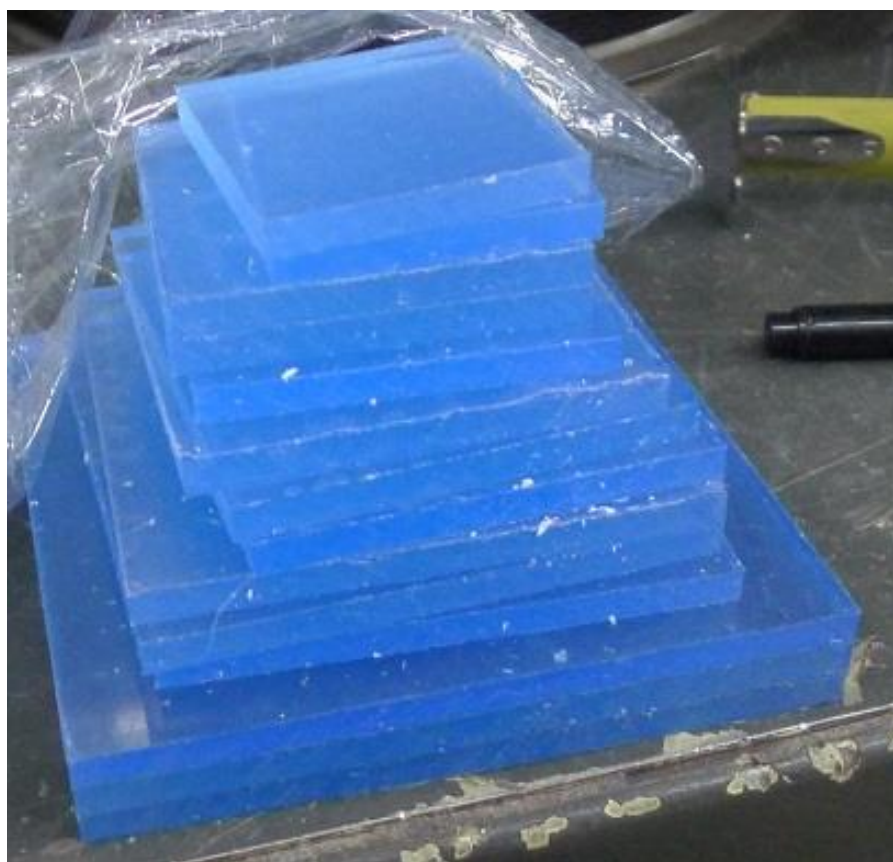
Obr. 16: Verifikace pomocí ocelového tělesa známých rozměrů a oboustranně umístěné podložky z AVR.



Obr. 17: Skeny při verifikaci ocelovými tělesy spolu s podložkami z různých materiálů.

### 6.1.3 Plexisklo

Po vyzkoušení různých materiálů, kdy zejména původně uvažovaná ocelová tělesa vykazovala rozporuplné výsledky, byly vyrobeny přesné plexisklové destičky (Obr. 18). S plexisklovými destičkami oboustranně uloženými k páru tlakového papíru se výsledky měření pohybovaly v intervalu přesnosti uváděné výrobcem tlakového papíru.



Obr. 18: Speciálně vyrobené plexisklové destičky přesných rozměrů.

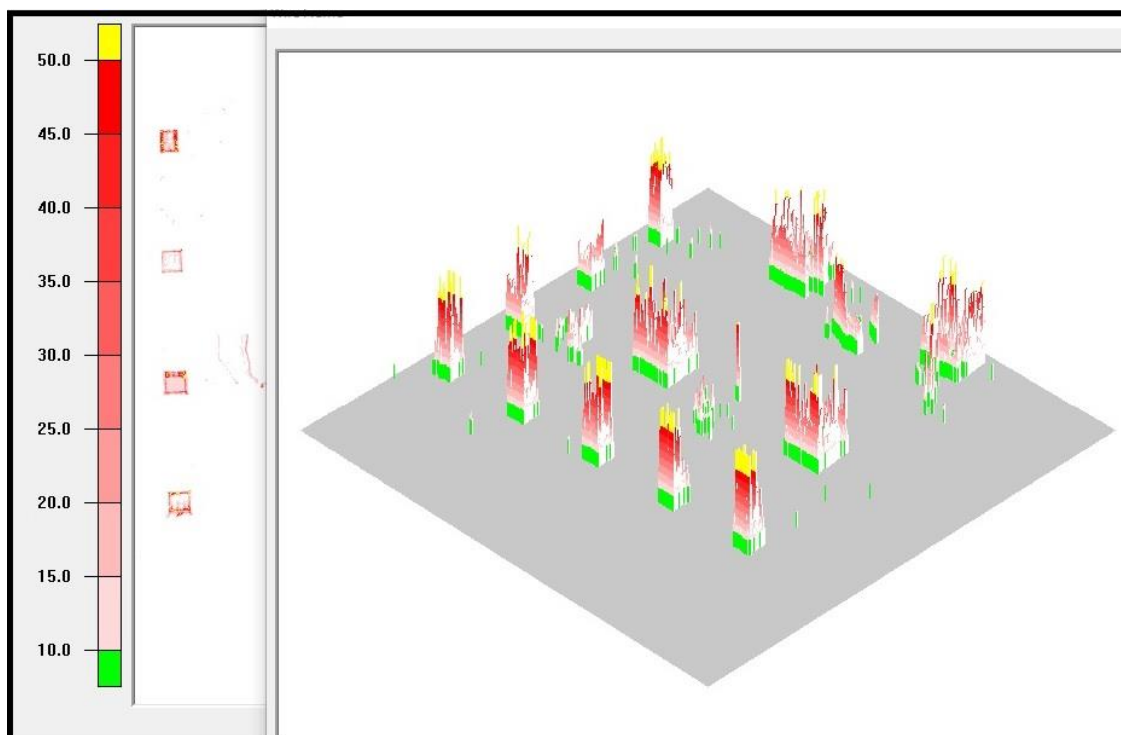
## 6.2 Zpracování dat

Metoda tlakového papíru je podmíněna používáním příslušného softwaru, konkrétně v tomto případě programu *FPD8010Win Application*. S tímto z dnešního pohledu poněkud uživatelsky složitějším programem, který bohužel nenabízí komplexní výsledky, bylo nutné napřed bližší seznámení. Aplikace nabízí dva základní výstupy popsané v následujících kapitolách.

### 6.2.1 Grafické výstupy

Jednou z možností vyhodnocení dat software je režim *3D software*, který umožňuje grafické výstupy. V tomto režimu je možné naskenovaný tlakový papír (všechna naskenovaná platná měření jsou *Přílohou č. 1* této práce) zpracovat a na libovolném místě zjistit zkoumané hodnoty napětí spolu s barevnou škálou dle měřeného napětí.

Efektním výstupem jsou výstupy prostorových modelů, kterým ale při exportování chybí alespoň měřítko dle barevného ohodnocení, a navíc výstupy ve formátu pdf mají výrazně větší velikost (15 až 20 MB), tudíž zobrazení je vlivem zpracování výpočetní technikou zdlouhavé. Na obrázku (Obr. 19) je vytvořený model s ručně doplněným měřítkem tlaku tak, aby byla vidět barevná škála vypovídající o příslušném napětí.



Obr. 19: Ukázka prostorového výstupu softwaru s ručně přiloženou barevnou škálou.

### 6.2.2 Numerické výstupy

Druhou možností k 3D softwaru je polární zobrazení (angl. *Polar Coordinates Software*) umožňující numerický výstup, který kvantifikuje vyhodnocená data je použitý pro další zpracování výstupů (Obr. 20).

## Whole Area Measurement

Sample Name	: 9DUB5	Prescale Effective Rate(%)	: 56.2
Examination Date _Time	: 2019-04-20 16:44	Pressed Area(mm2)	: 453.0
Measurement Date _Time	: 2019-04-20 16:44	Ave Pressure(MPa)	: 39.5
Prescale Type	: MW	Max Pressure(MPa)	: 63.8
Pressure Type	: Continuous	Load(N)	: 17883
Resolution(mm)	: 0.125	Measured Area(mm2)	: 48902.0
Scan Count	: 1		
Temperature(-C)	: 20		
Humidity(%)	: 20		

Pressure Range(MPa)	Pressed Area(mm2)	Ave Pressure(MPa)	Max Pressure(MPa)
p < 10.0	0.0	0.0	0.0
10.0 <= p <= 15.0	106.0	11.8	15.0
15.0 < p <= 20.0	38.0	17.3	20.0
20.0 < p <= 25.0	30.0	22.3	25.0
25.0 < p <= 30.0	26.0	27.3	30.0
30.0 < p <= 35.0	16.0	32.3	35.0
35.0 < p <= 40.0	16.0	37.5	39.8
40.0 < p <= 45.0	11.0	42.3	44.3
45.0 < p <= 50.0	12.0	47.5	50.0
50.0 < p	198.0	62.8	63.8

Obr. 20: Ukázka numerického výstupu zpracujícího softwaru.

### 6.2.3 Volba časového působení zatížení v software

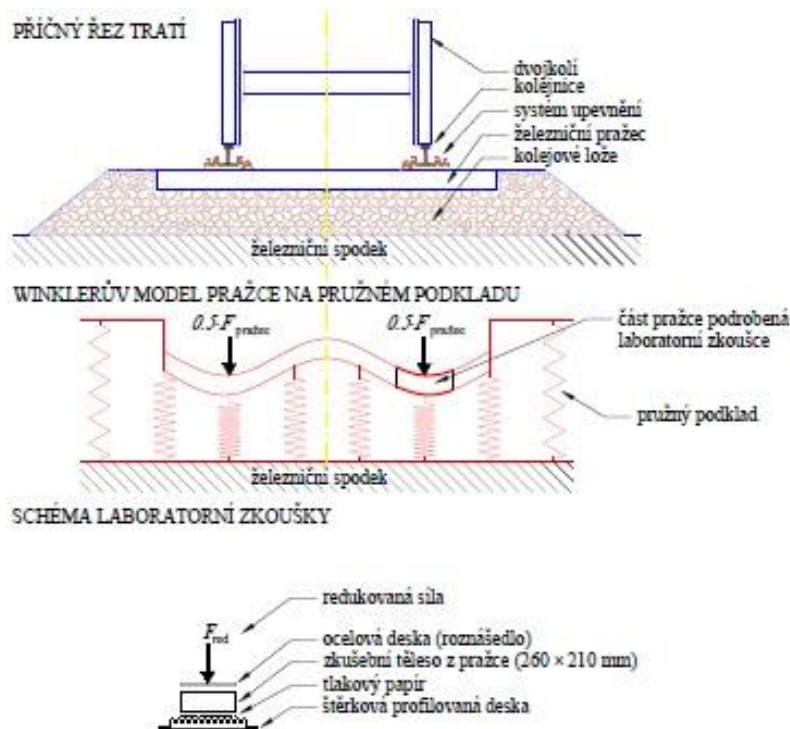
Kromě výše popsaných údajů zadávaných v software při zpracovávání, tj. teploty (angl. *Temperature* viz Obr. 20) a vlhkosti (angl. *Humidity* viz Obr. 20), které ale nemají na výsledky vliv, je nutné zadat typ zatížení.

Zatížení je možno volit krátkodobé (angl. *Momentary*), nebo dlouhodobé (angl. *Continuous* viz Obr.20). Byť u tohoto experimentálního měření se jednalo svou povahou o momentální zatěžování jednotlivých vzorků, tak vzhledem k tomu, že v některých případech byly výsledky, respektive nepřesnost vypočtené síly od síly skutečné lepší při zadání typu kontinuálního byly naskenované obrázky všech měření vyhodnocovány dvakrát, tj. s oběma typy zatížení.

V software vypočítávaná síla při momentálním zatížení je o 10 až 20 % menší než síla software udávaná při zatížení kontinuálním. Výměra kontaktní plochy je u obou typů zatížení stejná.

## 7 Volba zatížení pro laboratorní zkoušku

V této kapitole je výpočtem stanovena redukováná síla aplikovaná na zkušební těleso při provádění laboratorní zkoušky. Pražec byl ve výpočtu považován za nosník položený na elastickém podkladu podle teorie E. Winklera publikované v roce 1867 jako zjednodušený model podloží, který zahrnuje normálové napětí a zanedbává smykové napětí [12] (Obr. 21). Redukovaná zatěžovací síla vycházela ze zatížení na nápravu pro hlavní tratě (největší přípustné zatížení pro třídy D), které je 225 kN. Dále bylo uvažováno roznesení mezi pražce pro typ kolejnice S49E1, kdy pražec, který je umístěn přímo pod nápravou, je zatížen 40 %. Dalším parametrem pro určení redukové zatěžovací síly byla tuhost podloží reprezentovaná jako součinitel ložnosti, který odpovídá kvalitě dráhy podle její údržby, kde tento výpočet vycházel ze snížené kvality koleje se součinitelem ložnosti  $50 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-3}$ . V důsledku pohybu vozidla v koleji musí být vzat v úvahu dynamický součinitel zatížení  $\gamma$ . Tento efekt byl při výpočtu zohledněn pomocí dynamického součinitele  $\gamma = 1,5$ , což odpovídá zhoršené kvalitě pražcového podloží a vlivu rychlosti jízdy  $160 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1} < V < 200 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  [13]. Posledním parametrem je tuhost pražce charakterizovaná modulem pružnosti  $E$ . Při výpočtu byl uvažován modul pružnosti 12 MPa, což odpovídá impregnovanému bukovému dřevu, které je v síti SŽDC nejčastěji užívaným dřevem pro výrobu pražců. Z toho vychází používaná zatěžovací síla laboratorní zkoušky 15 kN.



Obr. 21: Schéma železničního svršku, numerický model založený na nosníku na pružném Winklerově základu a uspořádání laboratorního testu.

## 8 Zkušební tělesa

Při volbě materiálů zkušebních těles bylo dbáno hlavně na zastoupení co možná nejširšího výběru používaných hmot a také na vhodnost používané metody tlakového papíru.

Tab. 1: Tabulka materiálů zkušebních těles.

Materiál	Typ
Dřevo	Buk (impregnovaný pražec)
	Dub (impregnovaný pražec)
	Borový hranol
	Pražec z tropické dřeviny azobé
Předpjatý beton	
Předpjatý beton + podpražcová podložka (USP)	
Polymer	Polyuretan (PU)



V následujících kapitolách jsou popsána zkušební tělesa z materiálů uvedených v Tab. 1. Některá zkušební tělesa vykazovala trhliny, zakřivení a další nerovnosti, případně byla měření z vyhodnocování vyřazena pro chyby při uložení, respektive z důvodu překročení měřicího intervalu tlakového papíru.

### 8.1 Bukový impregnovaný pražec

Byly využity dva impregnované bukové pražce. Přičemž jeden ve zřetelně horším stavu (hniloba, praskliny) byl použit pouze při seznamování s metodou tlakového papíru. Jeho vlastnosti byly již při vizuální kontrole neslučitelné s případným použitím (trhliny, otláčení aj.) a také naměřené hodnoty se velmi lišily od předpokladů, což ovšem odpovídalo skutečnému stavu.

Měření byla prováděna na celkem čtyřech vzorcích připravených z vystrojeného pražce určeného pro aplikaci v trati. Pro tento experiment bylo drobné kolejivo odstraněno včetně lepených podkladnic a pražec byl důkladně očištěn. Pražec měl rozměry, tj. šířku 260 mm a výšku 160 mm. Vzorky byly řezány řetězovou motorovou pilou. Provedení řezů způsobilo zanedbatelné odchylky v délce vzorků, která byla 205 mm, 225 mm, 220 mm a 215 mm. To ale na výsledky měření nemělo vliv, neboť uložení zkušebního tělesa na použitou šterkovou deskou GBP bylo provedeno tak, že využitá plocha GBP byla u všech těles shodná (Obr. 14).



Obr. 22: Měření vzorku bukového pražce.

## 8.2 Dubový impregnovaný pražec

Rovněž byl použit impregnovaný dubový pražec. Bylo připraveno celkem pět vzorků. Neboť při jednom uložení došlo ke smyku po souvrství tlakového papíru a tím byly získávané hodnoty zcela zkreslené. Dále byl jeden vzorek značně porušen podélnou trhlinou, čemuž odpovídaly naměřené hodnoty, neboť uložení na kraji trhliny způsobilo velkou plochu s napětím přes měřicí interval tlakového papíru. Tato dvě měření (měření č. 6 a 7, tj. vzorky 6DUB2 a 7DUB3) byla vyřazena z výsledků při vyhodnocování, ale pro názornost metody tlakového papíru byla (nikoli kvantifikovatelná) fotokopie ponechána v Příloze č. 1 (Obr. 33 a Obr. 34).

Platná měření byla prováděna na ostatních třech vzorcích pro tento experiment původně neporušeného pražce, byť ustrojeného pro jiné vědecké účely. Drobné kolejivo odstraněno včetně lepených podkladnic a pražec byl důkladně očištěn. Pražec měl předpisové rozměry, tj. šířku 260 mm a výšku 150 mm. Vzorky byly řezány vlastní řetězovou motorovou pilou, což způsobilo drobné odchylky v délce vzorků, která byla 210 mm, 220 mm a 205 mm. To ale na výsledcích měření nemělo vliv, jak je uvedeno v popisu měřené plochy v souvislosti s použitou štěrkovou deskou GBP.



Obr. 23: Měřený vzorek dubového pražce.

### 8.3 Borové dřevo

Dalším zkoumaným materiálem bylo dřevo z borovice lesní. Borový pražec byl opatřen a nařezán na požadovaný profil. Nebylo snadné borové dřevo sehnat vzhledem k nedostatku kvalitního dřeva na trhu.

Se vzorkem z tohoto hranolu byl nejprve zkoušen průběh všech dalších měření, kdy byl s konečnou platností ověřen vhodný rozměr tlakového papíru, způsob ukládání na štěrkovou desku GBP, roznášecí deska mezi pístem lisu a zkoušeným pražcem apod. (Obr. 21).

Platná měření byla prováděna na třech vzorcích. Borový hranol měl předpisové rozměry, tj. šířku 260 mm a výšku 150 mm. Vzorky byly řezány řetězovou motorovou pilou, což ale na rozdíl od ostatních dřevěných vzorků (azobe, dub, buk) vzhledem k dobré opracovatelnosti nemělo negativní vliv na přesnost a všechny měly záměrnou délku 210 mm.



Obr. 24: Měřený borový vzorek.

#### 8.4 Pražec z tropického dřeva

Posledním zkoumaným druhem materiálu dřevěného pražce bylo tropické dřevo azobe. Pražec měl rozměry 250 × 155 mm. Toto na první pohled velmi tvrdé a těžko opracovatelné dřevo. Bylo tudíž velmi náročné na vzorky vůbec připravit, když běžnou motorovou řetězovou pilou, která borovici řezala velmi snadno a impregnovaný buk a dub také mohla připravovat, zde se po dvou řezech řetěz zničil. Z důvodu obtížného řezání byly vzorky délek 215 mm, 225 mm a 200 mm. To ale na výsledcích měření nemělo vliv, jak je uvedeno v popisu měřené plochy dále v souvislosti s použitou šterkovou deskou GBP.



Obr. 25: Měření vzorku z tropického dřeva azobe.

#### 8.5 Betonový vzorek

Vzhledem k převládajícímu materiálu používaných pražců, tj. betonu bylo nutné také experimentální ověření tohoto materiálu. V ČR je výrazně nejpoužívanější druhem pražce typ z předem předepjatého železobetonu. Konstrukce betonového pražce, která ovlivňuje jeho mechanické vlastnosti ale nebyla pro tento výzkum příliš podstatná. V části 7. *Volba zatížení pro laboratorní zkoušku* je zdůvodněno použité zatížení. Pro možnou porovnatelnost výsledků u všech zkoumaných vzorků byla používána vždy stejná síla. Nebyl rozhodující přesný typ betonového pražce a jeho rozměry. Zároveň by bylo náročné připravovat vzorky požadovaných půdorysných rozměrů.

To ale na výsledcích měření nemělo vliv, jak je uvedeno v popisu měřené plochy dále v souvislosti s použitou štěrkovou deskou GBP. Byl použit betonový vzorek materiálu obvyklé jakosti používaných betonových pražců. Vzhledem ke své tvrdosti, tj. odolnosti proti zatlačení štěrkové desky GBP byla měření používaným tlakovým papírem prakticky nepoužitelná. Kontaktní plocha byla natolik malá, že vzniklé napětí výrazně přesahovalo interval používaného tlakového papíru. To bylo pro kontrolu dvakrát změřeno.

Dále bylo provedeno třikrát měření betonového pražce s podpražcovou podložkou. Tato měření vzhledem ke zmáčknutí podpražcové podložky a jejímu smýkání po štěrkové desce, kdy se povrch podložky spolu s tlakovým papírem postupně natahuje na jednotlivé výstupy štěrkové desky, také nemají vypovídající hodnotu, přesto byla demonstrativně provedena.

## **8.6 Polymerní pražec**

Aby byl výčet materiálů z nichž se pražce vyrábějí kompletní (kromě ocelových) byl použit také jeden pražec polymerní, konkrétně polyuretanový (PU) s dlouhou podélnou skelnou výztuží. Vzhledem k tomuto druhu materiálu by nebylo dělení na vzorky snadné a hlavně nejsou polymerní pražce ve škole ke zničení experimenty k dispozici. Proto byl pražec na obou koncích měřen bez dělení v kuse tak, že jeden konec byl uložen v lisu analogicky s ostatními a zbývající část pražce byla uložena jinak. To se při prvním měření ne zcela podařilo, došlo k ohybu pražce a tím byla výrazně zatížena krajní část uložení na štěrkové desce GBP s tlakovým papírem (měření č. 21 vzorek 21PU1, Obr. 48). Došlo tedy k obdobné chybě jako u betonových pražců, že na kontaktní ploše byl překročen interval použitého tlakového papíru. Tato chyba byla odhalena porovnáním použité a vypočtené síly. Při druhém měření bylo toto napraveno a byly naměřeny relevantní hodnoty.



Obr. 26: Měření polymerního pražce.

## 9 Laboratorní a přístrojové vybavení

Pro vyvozování příslušného tlaku a rovněž pro verifikaci metody byl použit školní lis EU 40 vyrobený roku 1982 východoněmeckou firmou *VEB Werkstoffprüfmaschinen Leipzig*. Lis umožňuje používání pěti rozsahů zatížení. Rozsah I je do 20 kN, rozsah II do 40 kN, rozsah III do 100 kN, rozsah IV do 200 kN a rozsah V do 400 kN. Zatímco při samotném měření bylo používáno zásadně pouze prvního intervalu s maximálním zatížením 20 kN, neboť měla být používána síla 15 kN, při verifikaci bylo užito všech rozsahů.

Tlakový papír byl ihned po odtížení přímo na místě skenován a pomocí softwaru byly zjišťovány požadované parametry, které byly okamžitě dále vyhodnocovány. To zaručilo, že pokud bylo měření vadné, mohlo být okamžitě provedeno náhradní.



Obr. 27: Lis EU 40 spolu se skenerem a počítačem.

## 10 Postup provádění laboratorní zkoušky

Pro všechna prováděná měření byl sjednocen postup zatěžování (Obr. 21). Na šterkovou desku GBP byl uložen pár fólií tlakového papíru, přes který byl umístěn zkoumaný vzorek. Pražec, respektive měřená část pražce byla umístěna vždy na stejné části šterkové desky dle řad výstupků, tak aby případné odlišnosti rozměrů zkoumaného tělesa neměly na měření vliv.

Přes zkoumaný vzorek byla uložena ocelová roznášecí deska, tak aby měření nebylo ovlivněno příčnou tuhostí, respektive poddajností materiálu, ani případnou nepřesností působící síly používaného lisu.

## 11 Výsledky

Zvlášť byly v Tab. 2 zaznamenány hodnoty s časovým označením dlouhodobého zatížení (v software nástroj *continuous*) a zvlášť byly v Tab. 3 zaznamenány hodnoty s označením krátkodobého zatížení (v software nástroj *momentary*).

Teoretická kontaktní plocha mezi vzorky a profilovanou šterkovou deskou GBP (Obr. 14) je 2 000 mm<sup>2</sup>.

Tab. 2: Výsledky platných měření – kontinuální.

pořadí měření	název vzorku	rozměr vzorku			laboratorní lis	tlakový papír	
					zatěžovací síla	kontaktní plocha	průměrné napětí
		d	š	v	F	A	$\sigma$
[-]		[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[mm <sup>2</sup> ]	[MPa]
1	1BUK1	205	260	160	15	1 220	22,2
2	2BUK2	225	260	160	15	833	24,8
3	3BUK3	223	260	160	15	789	27,5
4	4BUK4	215	260	160	15	812	24,5
5	5DUB1	210	260	150	15	524	29,8
8	8DUB4	220	260	150	15	420	37,8
9	9DUB5	205	260	150	15	453	39,5
10	10BOR1	210	260	150	15	1 013	18,8
11	11BOR2	210	260	150	15	975	18,5
12	12BOR3	210	260	150	15	808	23,3
18	18AZOBE1	215	250	155	15	515	21,0
19	19AZOBE2	225	250	155	15	531	24,8
20	20AZOBE3	200	250	155	15	557	29,5
22	22PU2	210	250	150	15	795	21,0



Tab. 3: Výsledky platných měření momentální.

pořadí měření	název vzorku	rozměr vzorku			laboratorní lis	tlakový papír	
		d	š	v	zatěžovací síla	kontaktní plocha	průměrné napětí
					F	A	$\sigma$
[-]		[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[mm <sup>2</sup> ]	[MPa]
1	1BUK1m	205	260	160	15	1 181	19,3
2	2BUK2m	225	260	160	15	829	21,8
3	3BUK3m	223	260	160	15	792	24,5
4	4BUK4m	215	260	160	15	825	20,8
5	5DUB1m	210	260	150	15	519	28,8
8	8DUB4m	220	260	150	15	420	36,0
9	9DUB5m	205	260	150	15	453	37,5
10	10BOR1m	210	260	150	15	1 023	14,0
11	11BOR2m	210	260	150	15	978	14,3
12	12BOR3m	210	260	150	15	806	19,3
18	18AZOBE1m	215	250	155	15	527	16,5
19	19AZOBE2m	225	250	155	15	532	22,3
20	20AZOBE3m	200	250	155	15	558	26,8
22	22PU2m	210	250	150	15	801	17,0

Vzhledem k vyšší přesnosti nástroje *continuous*, než *momentary* bylo dále pracováno pouze s hodnotami ze sady výsledků s označením *kontinuální* zatížení. Naměřené hodnoty byly zprůměrovány a jsou uvedeny v Tab. 4.

Tab. 4: Průměrné hodnoty kontaktní plochy a napětí pro měřené materiály.

Materiál	Průměrná kontaktní plocha	Průměr průměrného napětí
	A	$\sigma$
	[mm <sup>2</sup> ]	[MPa]
BUKOVÝ IMPREGNOVANÝ PŘÍČNÝ PRAŽEC	913,5	24,8
DUBOVÝ IMPREGNOVANÝ PŘÍČNÝ PRAŽEC	465,7	35,7
BOROVÉ DŘEVO	932,0	20,2
PRAŽEC Z TROPICKÉ DŘEVINY AZOBE	534,3	25,1
POLYMERNÍ PRAŽEC	795,0	21,0

## ZÁVĚR

### 12 Vyhodnocení výsledků – porovnání materiálů

Bylo vždy zatěžováno stejnou silou o velikosti 15 kN. Podle naměřených parametrů (kontaktní plocha a průměrné napětí) je v Tab. 5 vyjádřeno relativní porovnání s dalšími zkoumanými materiály. Jako referenční materiál byl použit impregnovaný buk, který je nejvyužívanějším typem dřeva pro výrobu pražců. Odchytky zatěžovací síly v lisu, které byly maximálně 2,5 %, neměly vzhledem k přesnosti měřicí metody tlakového papíru garantované výrobcem na výsledek experimentu významný vliv.

Tab. 5: Relativní hodnoty vůči bukovému pražci.

Zkoumaný materiál	relativní plocha	relativní napětí
	A	$\sigma$
BUKOVÝ IMPREGNOVANÝ PŘÍČNÝ PRAŽEC	100 %	100 %
DUBOVÝ IMPREGNOVANÝ PŘÍČNÝ PRAŽEC	51 %	144 %
BOROVÉ DŘEVO	102 %	82 %
PRAŽEC Z TROPICKÉ DŘEVINY AZOBE	58 %	101 %
POLYMERNÍ PRAŽEC	87 %	85 %

Z tabulky je patrné, že dubový pražec má cca poloviční kontaktní plochu při napětí o cca 50 % větším.

Borový pražec má kontaktní plochy mírně větší při cca 80 % napětí.

Pražec z exotického dřeva azobe má cca 60% kontaktní plochu při srovnatelném napětí.

Polymerní pražec má menší kontaktní plochu (necelých 90 %) při menším napětí (cca 85 %).

### 13 Vliv kontaktní plochy

Velikost kontaktní plochy je nepřímo úměrná působícímu napětí, neboť přenášené zatížení musí být shodné. Bukový a borový pražec mají kontaktní plochu s kolejovým ložem (demonstrováním štěrkovou profilovanou deskou) téměř dvojnásobnou než pražce dubové a azobové. Proto je u těchto

„měkčích“ pražců působené napětí na kolejové lože výrazně menší a zrna štěrku kolejového lože by byla pravděpodobně méně namáhána vlivem většího roznosu, a tím méně drcena a poškozována. Toto dále souvisí i s geometrickou polohou koleje, respektive hospodárností při plánování udržovacích a obnovovacích prací (čištění kolejového lože, podbíjení, dosypávání nového štěrku aj.) apod.

U betonových pražců, které nemohly být do porovnání zařazeny, je kontaktní plocha s kamenivem kolejového lože ještě mnohonásobně menší a napětí tudíž větší. Toto je v současné době ve zvolených úsecích tratí řešeno používáním podpražcových podložek.

## **14 Směr dalšího výzkumu**

Na základě laboratorního testu provedeného na částech pražců je doporučeno pokračovat v obdobném výzkumu pomocí metody tlakového papíru s laboratorním modelem v měřítku 1:1 s celým pražcem umístěným v laboratorním boxu naplněným kamenivem. Při stavbě modelu a umístování tlakového papíru se doporučuje opatrné zacházení, protože tlakový papír vykazuje značnou citlivost na působení smykových sil při smykání po tlakovém papíru, což způsobuje červené zbarvení i při velmi malém zatížení, což vede k významným chybám při vyhodnocování dat.

## Reference

- [1] H. Krejčířiková and P. Tyc, *ŽELEZNIČNÍ STAVBY 20*. Praha, 2001.
- [2] B. Kubát and L. Týfa, *ŽELEZNIČNÍ TRATĚ A STANICE*. Praha, 2005.
- [3] B. Balážová, *DP: Posouzení velikosti kontaktní plochy mezi podpražcovou podložkou a kamenivem kolejového lože*. Praha: ČVUT, 2009.
- [4] B. Indratana, *Advanced Rail Geotechnology - Ballast Track*. Spojené království Velké Británie a Severního Irska, 2011.
- [5] M. J. Shenton, *Deformation of railway ballast under repeated loading conditions*, Pp 387-404. Proceedings of a symposium held at Princeton University, 1975.
- [6] J. A. Zakeri and R. Abbasi, "Field investigation of variation of loading pattern of concrete sleeper due to ballast sandy contamination in sandy desert areas," *J. Mech. Sci. Technol.*, 2012.
- [7] V. Monaco, *Untersuchungen zu Schwellenbesonhlunger im Oberbau*. Graz: TU Graz, 2003.
- [8] T. Abadi, L. Le Pen, A. Zervos, and W. Powrie, "Measuring the Area and Number of Ballast Particle Contacts at Sleeper/Ballast and Ballast/Subgrade Interfaces," p. 25.
- [9] M. G. Romero, M. Dersch, J. R. Edwards, C. Barkan, B. Wilson, and J. Mediavilla, "Investigation of Concrete Sleeper Rail Seat Pressure Distributions for Varying Fastening Systems and Loading Conditions," in *Proceedings of the International Heavy Haul Association Conference*, 2011.
- [10] M. T. McHenry, P. Xu, T. J. Greenwell, R. R. Souleyrette, and J. G. Rose, "Developing a Calibration Method for Tactile Pressure Sensors Applied to Non-Uniform, Rough Contact Surfaces: A Case Study at the Ballast-Tie Interface of Railroad Track," 2014.
- [11] R. Popík, *DP: Analýza změny vlastností antivibračních rohoží vyvolaná tvarem kontaktní plochy*. Praha: ČVUT, 2011.
- [12] C. Esveld, *Modern Railway Track*. Delft, Nizozemsko, 2001.
- [13] SŽDC, "SŽDC S3, změna č. 3." OTH, Praha, p. 242, 2019.

## Seznam tabulek

Tab. 1: Tabulka materiálů zkušebních těles. ....	23
Tab. 2: Výsledky platných měření – kontinuální. ....	31
Tab. 3: Výsledky platných měření momentální. ....	32
Tab. 4: Průměrné hodnoty kontaktní plochy a napětí pro měřené materiály. ....	33
Tab. 5: Relativní hodnoty vůči bukovému pražci. ....	34

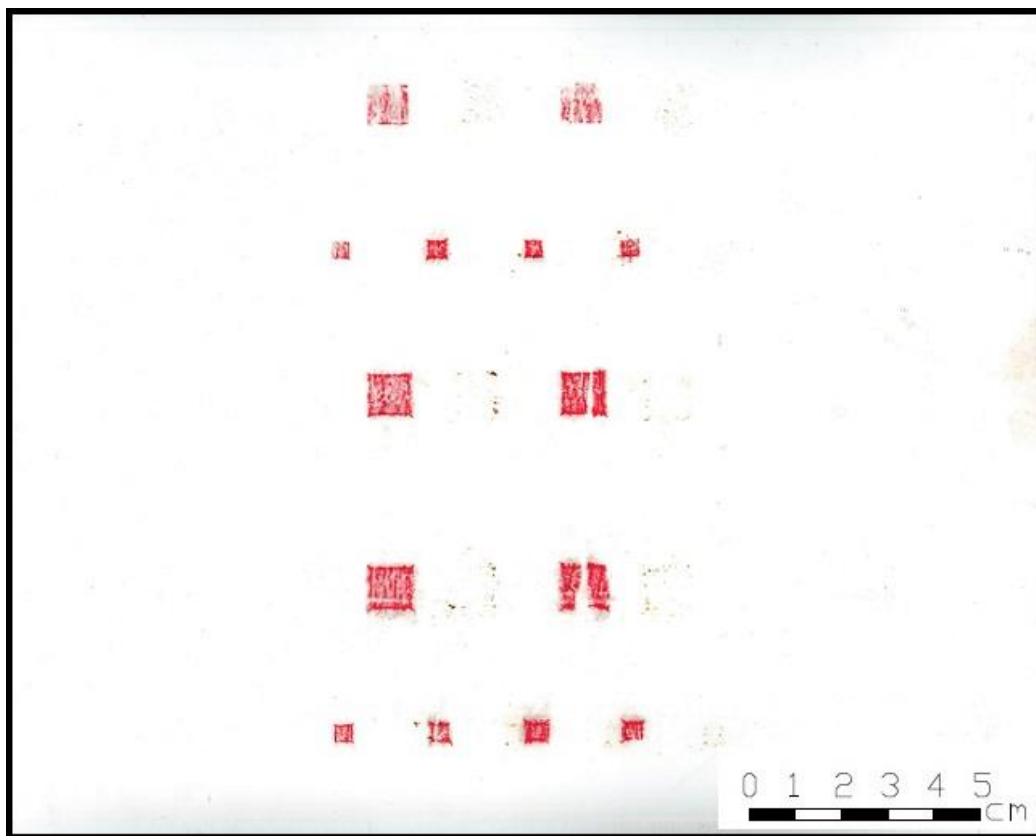
## Seznam obrázků

Obr. 1: Konstrukce železniční trati (zdroj: Ing. Vít Lojda). ....	2
Obr. 2: Způsob značení dřevěných pražců[1]. ....	4
Obr. 3: Protištěpná destička bukového pražce. ....	4
Obr. 4: Příklad metody stanovení kontaktní plochy mezi podpražcovou podložkou a kamenivem kolejového lože metodou nátěru kameniva barvou [3]. ....	8
Obr. 5: Schéma principu tlakového papíru. ....	9

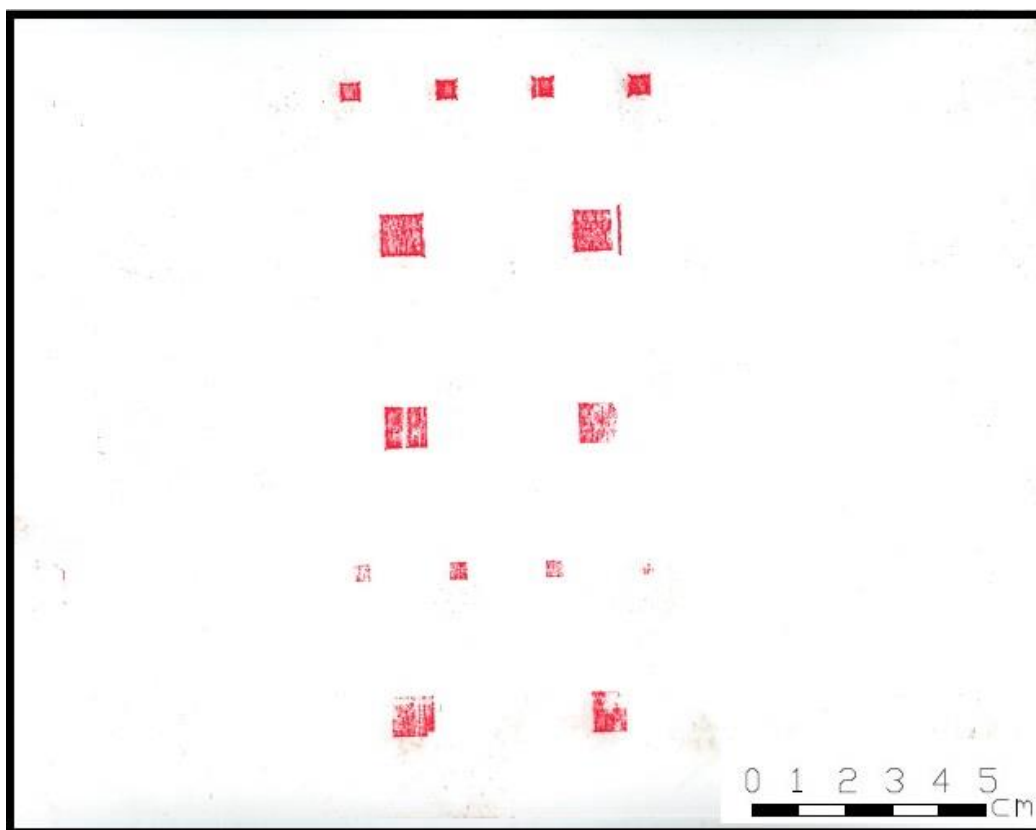
Obr. 6: Zkušební zatěžovací deska s nepravidelným reliéfem vytvořena odlitím kolejového lože (tzv. německá zatěžovací šterková deska) [11].	10
Obr. 7: Experimentální zatěžovací deska firmy Getzner Werkstoffe GmbH s možností změny povrchu vzniklá modifikací německé zatěžovací desky [11].	11
Obr. 8: Zatěžovací deska vyrobená v Itálii [11].	11
Obr. 9: Pohled na první českou desku v zatěžovacím lisu [11].	12
Obr. 10: Řez druhou (optimalizovanou) českou deskou s profilem čtyřbokých jehlanů [11].	12
Obr. 11: Detail třetí (výsledné) zatěžovací desky [11].	12
Obr. 12: Šterková profilovaná deska.	13
Obr. 13: Výkresy šterkové profilované desky.	14
Obr. 14: GBP s vyznačeným umístěním vzorků pražce a možnými kontakty.	16
Obr. 15: Chybně kvantifikovatelné projevy tlaku ocelových těles známých rozměrů.	17
Obr. 16: Verifikace pomocí ocelového tělesa známých rozměrů a oboustranně umístěné podložky z AVR.	18
Obr. 17: Skeny při verifikaci ocelovými tělesy spolu s podložkami z různých materiálů.	19
Obr. 18: Speciálně vyrobené plexisklové destičky přesných rozměrů.	19
Obr. 19: Ukázka prostorového výstupu softwaru s ručně přiloženou barevnou škálou.	20
Obr. 20: Ukázka numerického výstupu zpracujícího softwaru.	21
Obr. 21: Schéma železničního svršku, numerický model založený na nosníku na pružném Winklerově základu a uspořádání laboratorního testu.	23
Obr. 22: Měření vzorku bukového pražce.	24
Obr. 23: Měřený vzorek dubového pražce.	25
Obr. 24: Měřený borový vzorek.	26
Obr. 25: Měření vzorku z tropického dřeva azobe.	27
Obr. 26: Měření polymerního pražce.	29
Obr. 27: Lis EU 40 spolu se skenerem a počítačem.	30
Obr. 28: Otisk z měření 1 - vzorek 1 z bukového pražce.	39
Obr. 29: Otisk z měření 2 - vzorek 2 z bukového pražce.	39
Obr. 30: Otisk z měření 3 - vzorek 3 z bukového pražce.	40
Obr. 31: Otisk z měření 4 - vzorek 4 z bukového pražce.	40
Obr. 32: Otisk z měření 5 – vzorek 1 z dubového pražce.	41
Obr. 33: Otisk z měření 6 - vzorek 2 z dubového pražce (nebylo započítáno z důvodu nepřesností vzniklých smykem při uložení).	41
Obr. 34: Otisk z měření 7 - vzorek 3 z dubového pražce (nebylo započítáno z důvodu velké trhliny dřeva na jejíchž okrajích byla kontaktní plocha s překročeným měřicím intervalem).	42
Obr. 35: Otisk z měření 8 - vzorek 4 z dubového pražce.	42
Obr. 36: Otisk z měření 10 - vzorek 1 z borového dřeva.	43
Obr. 37: Otisk z měření 11 - vzorek 2 z borového dřeva.	43
Obr. 38: Otisk z měření 12 - vzorek 3 z borového dřeva.	44

Obr. 39: Otisk z měření 13 - vzorek 1 z předpjatého betonu, který nemohl být vyhodnocován pro překročení měřicího intervalu. ....	44
Obr. 40: Otisk z měření 14 - vzorek 2 z předpjatého betonu, který nemohl být vyhodnocován pro překročení měřicího intervalu. ....	45
Obr. 41: Otisk z měření 15 - vzorek 1 z předpjatého betonu s podpražcovou podložkou, který nemohl být vyhodnocován z důvodu natahování tlakového papíru a následnému neodpovídajícímu vyhodnocení. ....	45
Obr. 42: Otisk z měření 16 - vzorek 2 z předpjatého betonu s podpražcovou podložkou, který nemohl být vyhodnocován z důvodu natahování tlakového papíru a následnému neodpovídajícímu vyhodnocení. ....	46
Obr. 43: Otisk z měření 17 - vzorek 3 z předpjatého betonu s podpražcovou podložkou, který nemohl být vyhodnocován z důvodu natahování tlakového papíru a následnému neodpovídajícímu vyhodnocení. ....	46
Obr. 44: Otisk z měření 18 - vzorek 1 z pražce tropického dřeva z azobe. ....	47
Obr. 45: Otisk z měření 19 - vzorek 2 z pražce tropického dřeva z azobe. ....	47
Obr. 46: Otisk z měření 20 - vzorek 3 z pražce tropického dřeva z azobe. ....	48
Obr. 47: Otisk z měření 21 - vzorek 1 z polymerního pražce (PU), který nemohl být vyhodnocen z důvodu chybnému uložení (ohyb přes hranu), což způsobilo překročení měřicího intervalu <i>tlakového papíru</i> . ....	48
Obr. 48: Otisk z měření 22 - vzorek 2 z polymerního pražce (PU). ....	49

## PŘÍLOHA Č. 1



Obr. 28: Otisk z měření 1 - vzorek 1 z bukového pražce.

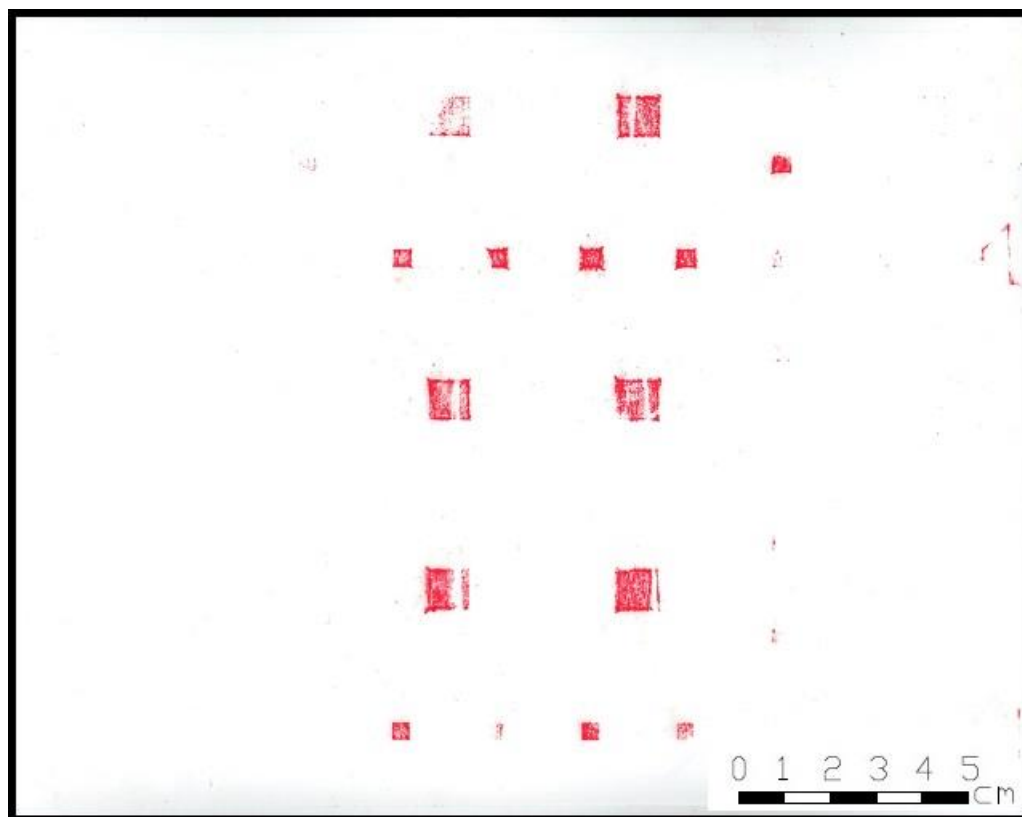


Obr. 29: Otisk z měření 2 - vzorek 2 z bukového pražce.

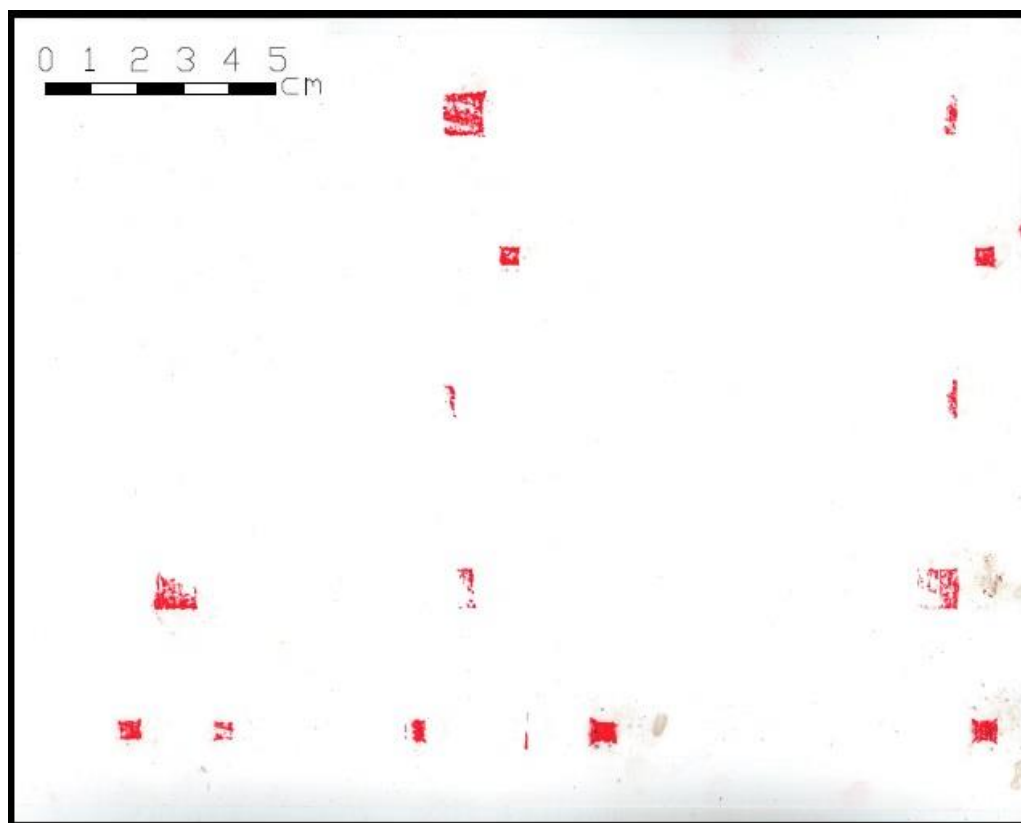




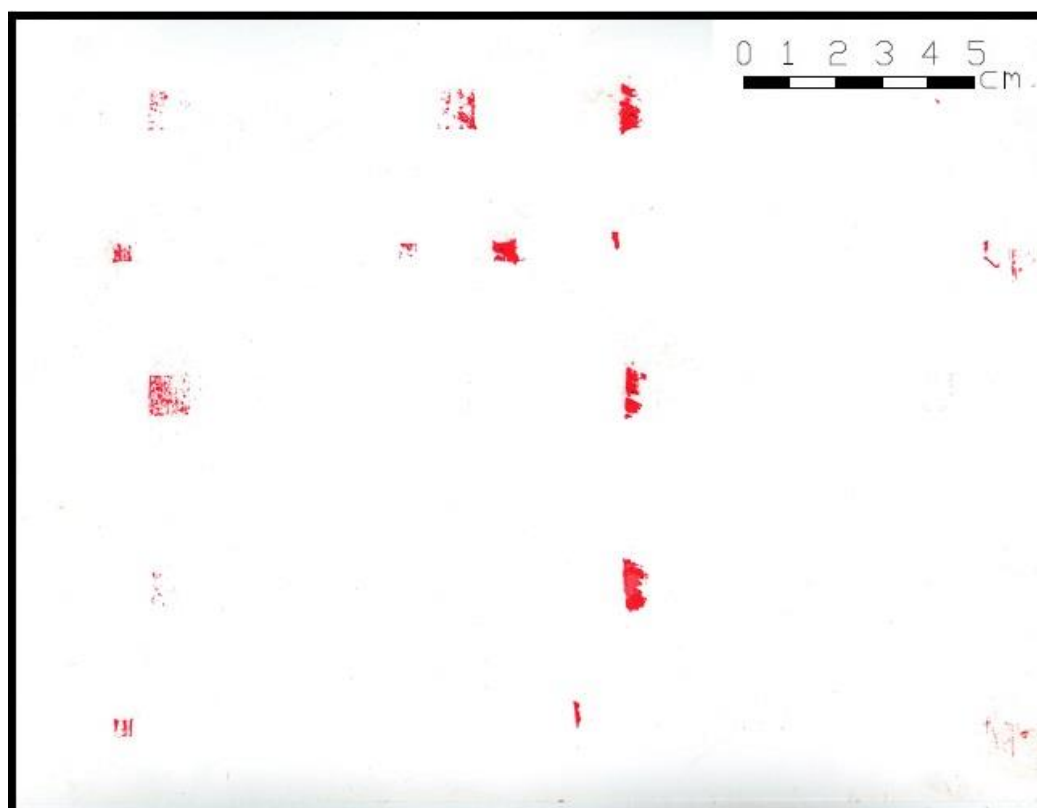
Obr. 30: Otisk z měření 3 - vzorek 3 z bukového pražce.



Obr. 31: Otisk z měření 4 - vzorek 4 z bukového pražce.



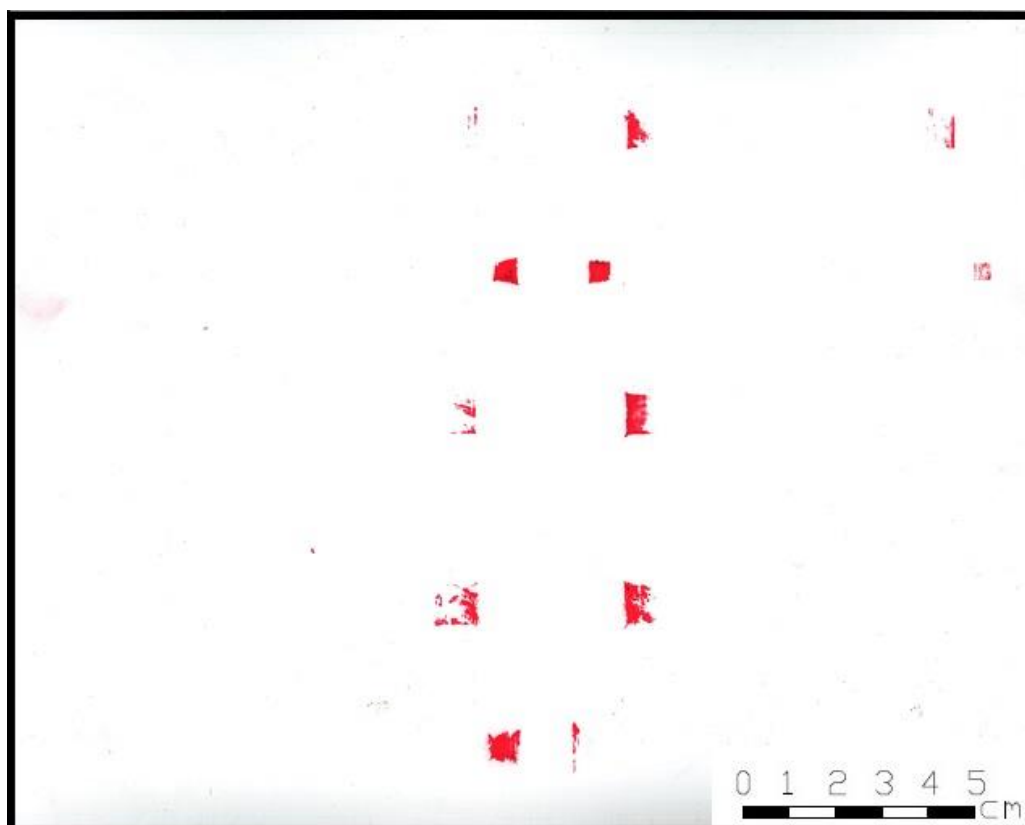
Obr. 32: Otisk z měření 5 – vzorek 1 z dubového pražce.



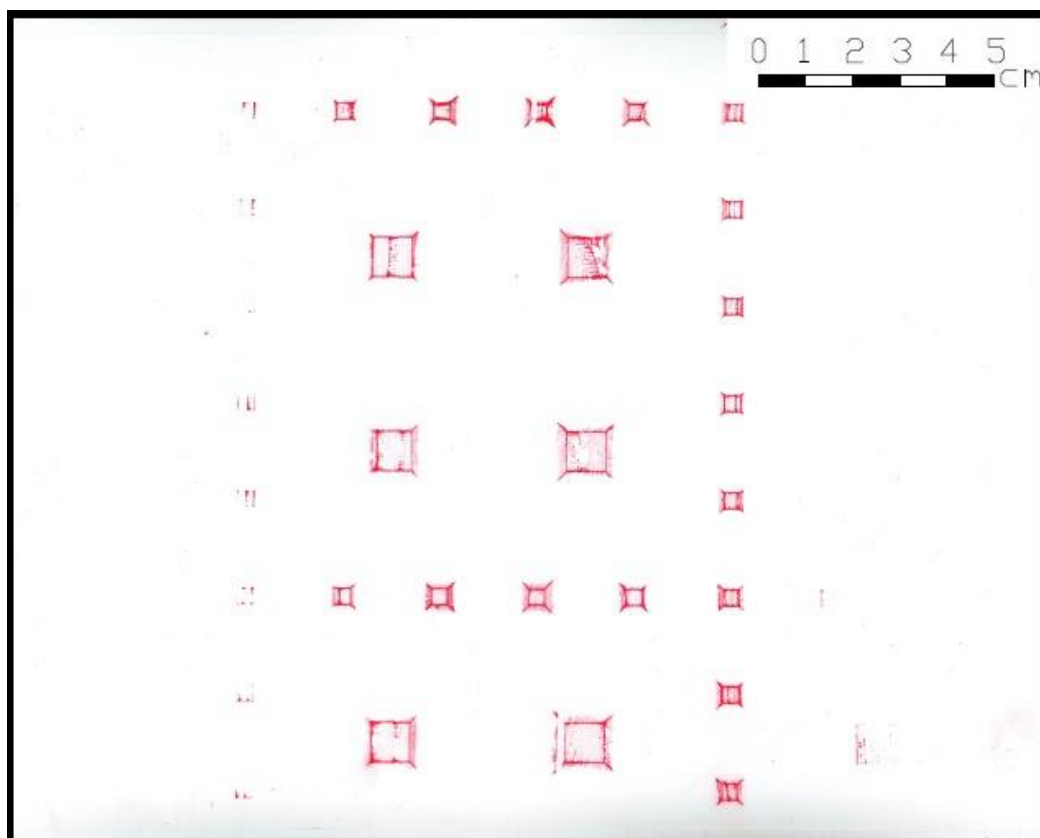
Obr. 33: Otisk z měření 6 - vzorek 2 z dubového pražce (nebylo započítáno z důvodu nepřesností vzniklých smykem při uložení).



Obr. 34: Otisk z měření 7 - vzorek 3 z dubového pražce (nebylo započítáno z důvodu velké trhliny dřeva na jejichž okrajích byla kontaktní plocha s překročeným měřicím intervalem).



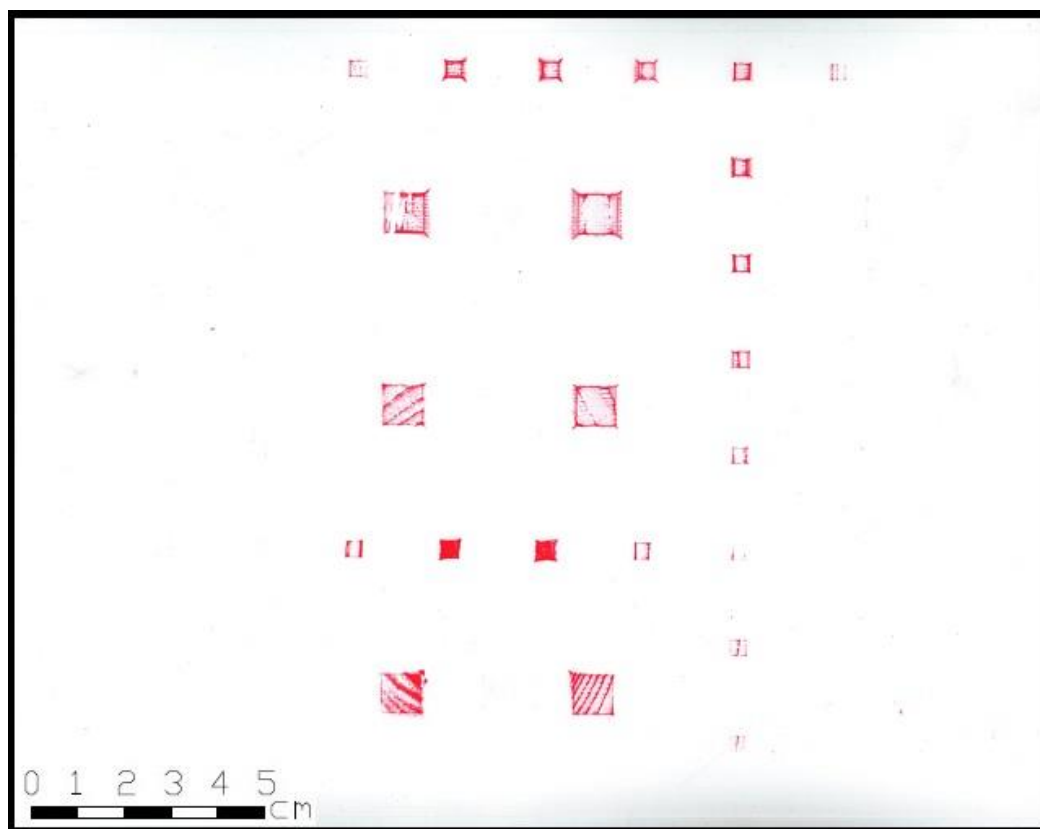
Obr. 35: Otisk z měření 8 - vzorek 4 z dubového pražce.



Obr. 36: Otisk z měření 10 - vzorek 1 z borového dřeva.



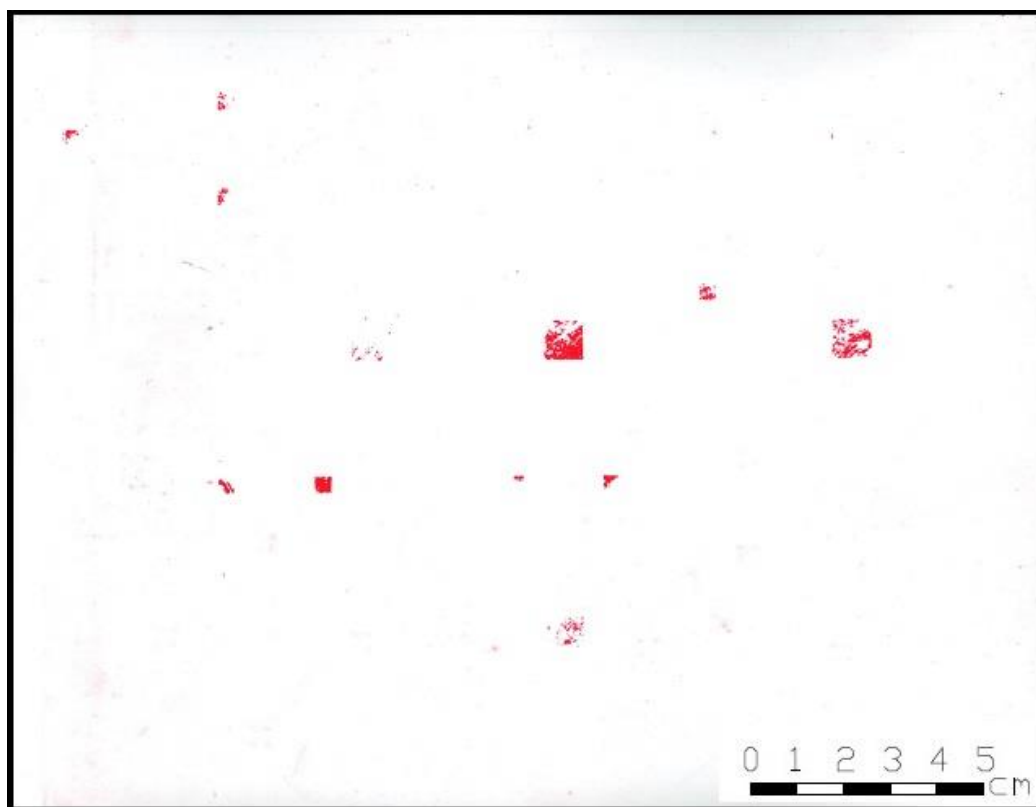
Obr. 37: Otisk z měření 11 - vzorek 2 z borového dřeva.



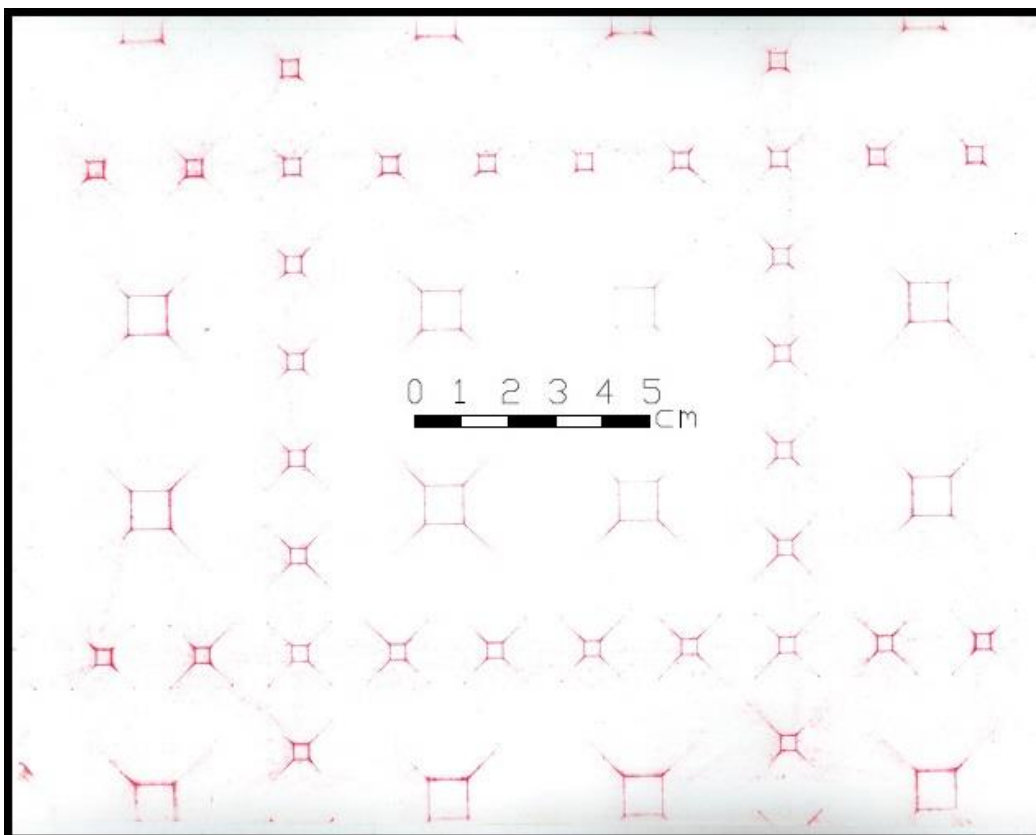
Obr. 38: Otisk z měření 12 - vzorek 3 z borového dřeva.



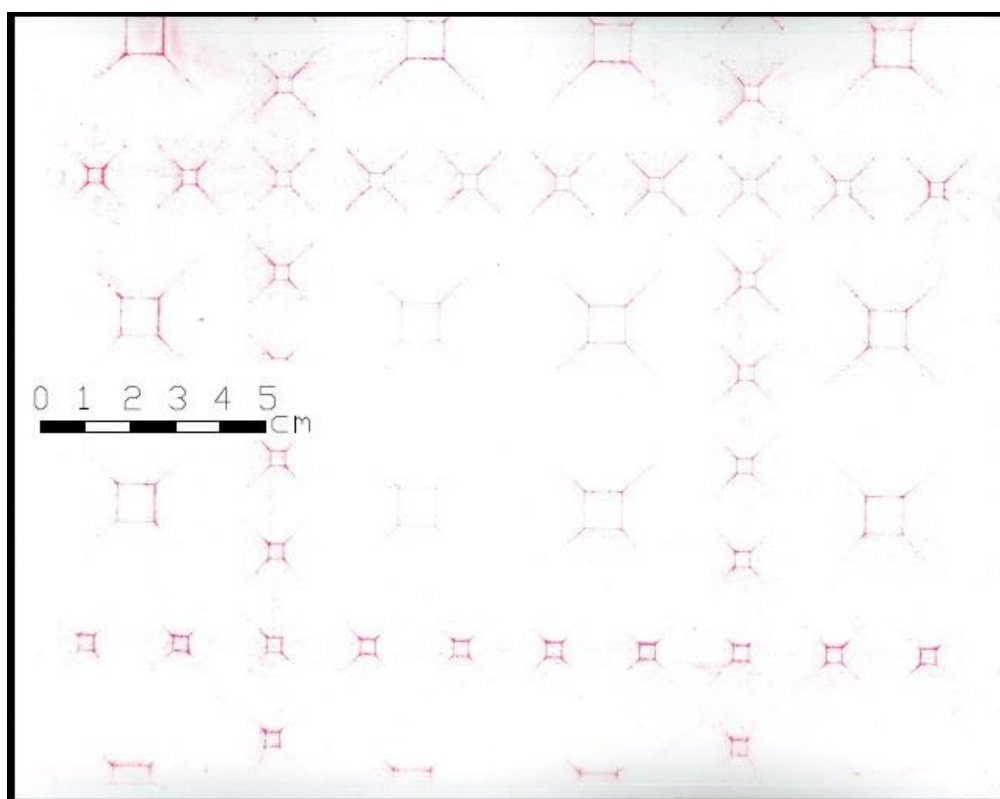
Obr. 39: Otisk z měření 13 - vzorek 1 z předpjatého betonu, který nemohl být vyhodnocován pro překročení měřicího intervalu.



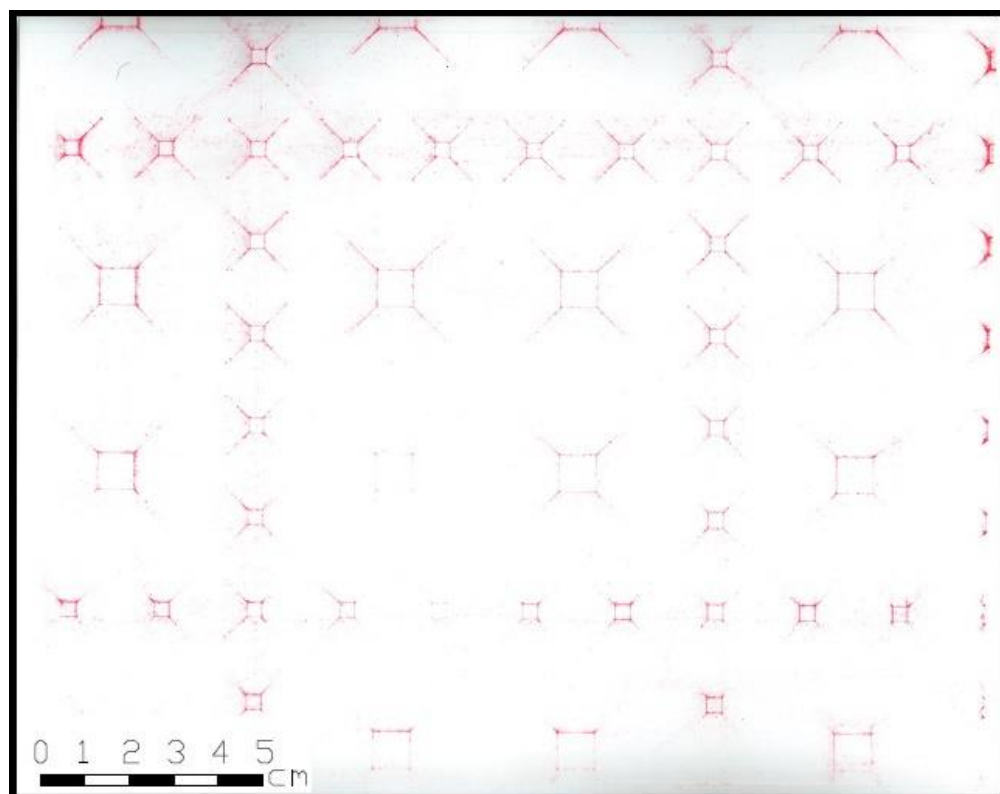
Obr. 40: Otisk z měření 14 - vzorek 2 z předpjatého betonu, který nemohl být vyhodnocován pro překročení měřícího intervalu.



Obr. 41: Otisk z měření 15 - vzorek 1 z předpjatého betonu s podpražcovou podložkou, který nemohl být vyhodnocován z důvodu natahování tlakového papíru a následnému neodpovídajícímu vyhodnocení.



Obr. 42: Otisk z měření 16 - vzorek 2 z předpjatého betonu s podpražcovou podložkou, který nemohl být vyhodnocován z důvodu natahování tlakového papíru a následnému neodpovídajícímu vyhodnocení.



Obr. 43: Otisk z měření 17 - vzorek 3 z předpjatého betonu s podpražcovou podložkou, který nemohl být vyhodnocován z důvodu natahování tlakového papíru a následnému neodpovídajícímu vyhodnocení.



Obr. 44: Otisk z měření 18 - vzorek 1 z pražce tropického dřeva z azobe.

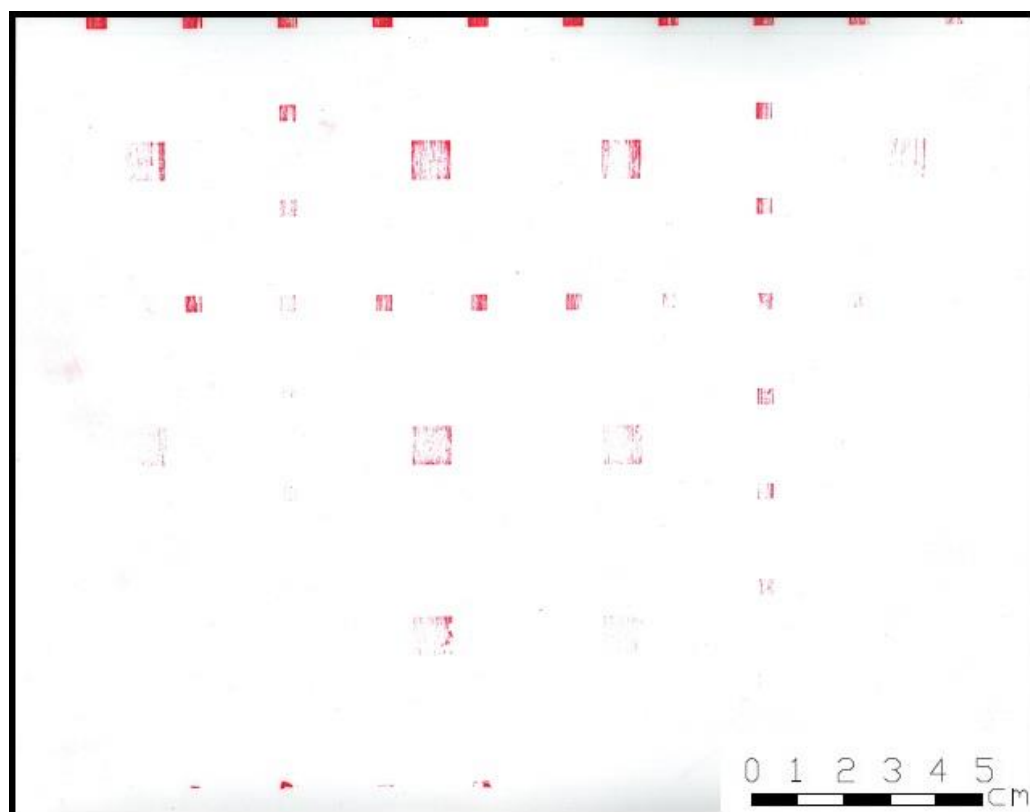


Obr. 455: Otisk z měření 19 - vzorek 2 z pražce tropického dřeva z azobe.





Obr. 466: Otisk z měření 20 - vzorek 3 z pražce tropického dřeva z azobe.



Obr. 477: Otisk z měření 21 - vzorek 1 z polymerního pražce (PU), který nemohl být vyhodnocen z důvodu chybnému uložení (ohyb přes hranu), což způsobilo překročení měřicího intervalu *tlakového papíru*.



Obr. 488: Otisk z měření 22 - vzorek 2 z polymerního pražce (PU).