

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STAVEBNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2024

**JANA
HOVORKOVÁ**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební
Katedra železničních staveb

**Progresivní metoda zjišťování velikosti kontaktní
plochy mezi pražcem a kolejovým ložem**

**Progressive method of determining the size of the
contact area between the sleeper and the rail bed**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. Jana Hovorková

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Vedoucí diplomové práce: Ing. Leoš Horníček, Ph.D.

Praha, 2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Hovorková</u>	Jméno: <u>Jana</u>	Osobní číslo: <u>484450</u>
Zadávající katedra: <u>Katedra železničních staveb</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor/specializace: <u>Konstrukce a dopravní stavby</u>		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Progresivní metoda zjišťování velikosti kontaktní plochy mezi pražcem a kolejovým ložem</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Progressive method of determining the size of the contact area between the sleeper and the rail bed</u>	
Pokyny pro vypracování: Prostřednictvím rešerše zpracujte vývoj metod pro měření velikosti kontaktní plochy mezi ložnou plochou pražce a kamenivem kolejového lože. Provedte sérii laboratorních zkoušek k prověření metody měření kontaktní plochy mezi pražcem a kolejovým ložem s využitím tlakového senzoru Tekscan. Měření provedte se 3 různými materiálovými typy pražců (betonový, dřevěný, plastový), 2 typy kameniva kolejového lože (neznečištěné, znečištěné) a při různé působící svíslé síle na pražec (nejméně 5 zatěžovacích stavů). Zhodnoťte výhody a nevýhody této metody měření.	
Seznam doporučené literatury: 1. Balážová, B. Posouzení velikosti kontaktní plochy mezi podpražcovou podložkou a kamenivem kolejového lože. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, 2009. 2. Lojda, V.; Jeřábek, J.; Horníček, L. Utilizing a pressure paper for the determination of contact parameters between aggregate and a railway sleeper. In: 19th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2019. Sofia: STEF92 Technology Ltd., 2019. pp. 565-571. vol. 19. ISSN: 1314-2704. ISBN: 978-619-7408-77-5. 3. TEKSCAN, Inc. Pressure Mapping Sensor 5315-A. Dostupné z: https://www.tekscan.com/products-solutions/pressure-mapping-sensors/5315-a 4. McHenry, M.T. Pressure measurement at the ballast-tie interface of railroad track using matrix based tactile surface sensors. 2013, Theses and Dissertations--Civil Engineering. 15. Dostupné z: https://uknowledge.uky.edu/ce_etds/15	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>Ing. Leoš Horníček, Ph.D.</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>27. 9. 2023</u>	Termín odevzdání DP v IS KOS: <u>8. 1. 2024</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

<i>Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové 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“.</i>	
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Progresivní metoda zjišťování velikosti kontaktní plochy mezi pražcem a kolejovým ložem** zpracovala samostatně za použití uvedené literatury a pramenů.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....
Bc. Jana Hovorková

Poděkování

Děkuji Ing. Leoši Horníčkoví, Ph.D. za jeho užitečné rady a připomínky a za jeho odborné vedení při zpracování diplomové práce. Dále děkuji Katedře železničních staveb za poskytnutí prostoru pro realizaci laboratorního měření. Děkuji také Ing. Tomáši Kračmarovi a Martinu Černému za poskytnutou pomoc při přípravě a realizaci měření. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat mé rodině a blízkým, kteří mi byli oporou po celou dobu studia na vysoké škole.

Anotace

Diplomová práce se zabývá problematikou měření velikosti kontaktní plochy mezi pražcem a kolejovým ložem. Práce se zaměřuje na shrnutí dosavadních metod měření kontaktní plochy a představení nové metody využívající tlakové senzory Tekscan. V rámci práce je obsaženo také vyhodnocení dat naměřených tlakovými senzory Tekscan při sérii měření s různými typy pražců a kameniva. S ohledem na provedená měření jsou shrnuty přínosy metody měření kontaktní plochy tlakovými senzory.

Klíčová slova:

Kolejové lože, pražec, kontaktní plocha, kontaktní napětí, tlakové senzory Tekscan, geometrická štěrková deska, měření v laboratoři.

Summary

The master's thesis explores the measuring of the contact area between a sleeper and the rail bed. It is focused on summarizing existing methods of measuring the contact area and introduces a new method utilizing Tekscan pressure sensors. The thesis also includes an evaluation of data measured by Tekscan pressure pad during a series of measurements with different types of sleepers and ballast. The benefits of the pressure mapping method in the field of contact area measurement are summarized based on the measurements performed.

Key words:

Rail bed, sleeper, contact area, contact pressure, Tekscan sensor mats, pressure mapping, geometric ballast plate, laboratory measurement.

Obsah

1	Úvod	12
1.1	Cíle práce	13
2	České standardy pro pražce a kolejové lože	14
2.1	ČSN EN 13450	15
2.2	Obecné technické podmínky Kamenivo pro kolejové lože.....	15
2.3	ČSN EN 13145+A1.....	17
2.4	Soubor norem ČSN EN 13230	18
2.5	ČSN EN 16730	19
2.6	Předpis SŽ S3	19
2.7	Technické kvalitativní podmínky staveb státních drah.....	20
3	Kontaktní plocha mezi ložnou plochou pražce a kolejovým ložem	22
3.1	Velikost kontaktní plochy	23
3.1.1	Podpražcové podložky	25
3.2	Měření velikosti kontaktní plochy mezi ložnou plochou pražce a kolejovým ložem	27
3.2.1	Způsoby modelování kolejového lože	28
3.2.2	Geometrická šterková deska.....	29
3.2.3	Metoda využívající kopírovací papír	30
3.2.4	Metoda využívající otisky	31
3.2.5	Metoda využívající tlakový papír	32
3.2.6	Metoda měření tlakovými senzory	33
4	Technologie Tekscan.....	35
5	Laboratorní měření.....	40
5.1	Měření s geometrickou šterkovou deskou	41
5.2	Popis pražců.....	42

5.3	Popis kameniva	44
5.4	Postup přípravy modelu.....	45
5.5	Zatěžovací stavy.....	46
5.6	Postup měření	47
5.7	Vyhodnocení výsledků měření.....	50
5.7.1	Vyhodnocení měření s geometrickou šterkovou deskou	52
5.7.2	Porovnání měření 1 a měření 2.....	55
5.7.3	Porovnání podle typu pražce.....	57
5.7.4	Porovnání podle typu kameniva	57
5.7.5	Další možnosti vyhodnocení	58
6	Zhodnocení metody Tekscan	62
6.1	Porovnání různých metod měření kontaktní plochy	62
6.2	Vhodnost metody Tekscan pro měření kontaktní plochy mezi ložnou plochou pražce a kolejovým ložem	65
	Závěr	68
	Seznam literatury	69

1 Úvod

Diplomová práce je zaměřena na problematiku z oboru kolejových staveb, a to na kontaktní plochu a kontaktní napětí mezi ložnou plochou pražce a kolejovým ložem. Kolejová doprava je v současnosti i přes dominanci silniční dopravy nezbytná pro nákladní i osobní dopravu nejen na území České republiky [1]. Lze předpokládat, že v souvislosti s plánovaným rozvojem vysokorychlostních tratí její význam nadále poroste. Pro co nejvyšší možné využití kapacity kolejové dopravy je nutné udržovat vozový park i kolejové tratě v optimálním stavu.

V souvislosti s tím je vhodné zkoumat přenos sil mezi pražcem a kolejovým ložem, z čehož lze následně vyvodit zatížení kolejového lože. Při větším zatížení kolejového lože dochází k obroušování a rozpadu zrn kameniva. S větším opotřebením dochází ke zhoršení vlastností kolejového lože, zhoršení jízdních vlastností trati a v návaznosti na to i k nutnosti dřívější údržby. Obdobně dochází také k opotřebení pražce. Nutnost častější údržby je nežádoucí jednak z důvodu častějších výluk, ale také navyšuje finanční nároky na provoz trati.

Pro lepší pochopení zatížení působícího na kontaktu pražce a kolejového lože byla již v minulosti provedena měření různými metodami. Některá z měření kontaktní plochy mezi pražcem a kamenivem kolejového lože byla prováděna též v souvislosti s vývojem podpražcových podložek.

Díky současnému stavu rozvoje moderních technologií a jejich vyšší dostupnosti je možné k měření kontaktní plochy mezi kolejovým ložem a pražcem využít inovativní metodu měření tlakovými senzory. Tato metoda je pro měření kontaktní plochy přelomová. Poskytuje nejen informace z měření kontaktní plochy, ale i z měření kontaktního napětí. Nejvýraznější odlišností oproti starším analogovým metodám však je, že tato metoda umožňuje sledování elektronického výstupu v reálném čase. Shrnutí možností, výhod i nevýhod této metody je věnována tato diplomová práce. Hodnocení vychází z praktických poznatků zjištěných přímo při provádění měření v laboratoři i z vyhodnocování dat.

1.1 Cíle práce

Cíle této diplomové práce lze rozdělit do dvou hlavních oblastí, z nichž první oblast se týká rešerše (kap. č. 2, 3 a 4) a druhá laboratorního měření (kap. č. 5 a 6).

Obecným cílem teoretické části je seznámení s problematikou měření kontaktní plochy mezi ložnou plochou pražce a kamenivem kolejového lože.

Cíle rešerše jsou:

- definice kontaktní plochy mezi ložnou plochou pražce a kamenivem kolejového lože,
- představení norem, které se zadané problematice týkají,
- zpracování vývoje metod pro měření velikosti kontaktní plochy mezi ložnou plochou pražce a kamenivem kolejového lože,
- představení metody pro měření velikosti kontaktní plochy mezi ložnou plochou pražce a kamenivem kolejového lože využívající tlakové senzory Tekscan.

Cíle praktické části jsou:

- praktické seznámení s tlakovým senzorem Tekscan,
- provedení série laboratorních zkoušek k prověření metody měření kontaktní plochy mezi ložnou plochou pražce a kolejovým ložem s využitím tlakového senzoru Tekscan,
- zpracování a porovnání výsledků jednotlivých měření,
- vypracování praktických ukázek dalších možností zpracování naměřených dat,
- zjištění vlivu tloušťky ochranné vrstvy senzoru na výsledky měření pomocí geometrické štěrkové desky,
- zhodnocení metody měření s tlakovým senzorem Tekscan pro účely analýzy velikosti kontaktní plochy mezi ložnou plochou pražce a kolejovým ložem.

2 České standardy pro pražce a kolejové lože

Pro správný výklad termínů z oblasti zkoumání kontaktní plochy mezi kolejovým ložem a ložnou plochou pražce je vhodné zorientovat se nejprve v tom, co je a není obsahem české legislativy. Pro kolejovou dopravu je výchozím dokumentem *zákon č. 266/1994 Sb., o dráhách*. Dalšími závaznými dokumenty jsou zejména české státní normy. Oblast železničních staveb značně upravují také předpisy Správy železnic, s. o.

Jelikož je téma kontaktní plochy mezi pražcem a kolejovým ložem velmi úzké, žádné normy ani předpisy platné pro Českou republiku tuto oblast nepokrývají. Existují však české verze evropských norem, které v různé míře obsahují informace související s touto problematikou. Zpravidla se tohoto tématu normy či předpisy týkají pouze z hlediska kvalitativních požadavků na geometrii a materiál pražců, podpražcových podložek a kameniva. Při plánování, návrhu a provádění železničních staveb je důležité dodržovat tyto technické normy a předpisy. Jejich správné užití napomáhá zajistit bezpečnost, spolehlivost a funkčnost železniční infrastruktury v České republice.

Součástí této práce je také praktická část zaměřená na měření v laboratoři. Je tedy vhodné podotknout, že některé předpisy a normy týkající se železničních staveb mohou uvádět důležité informace související s parametry vstupujícími do plánování a přípravy zkušebních modelů. Jejich znalost a aplikace na prováděná měření jsou nezbytné pro to, aby modely co nejlépe odpovídaly skutečnosti.

V následujících podkapitolách jsou představeny hlavní z těchto norem a předpisů. První skupina norem a předpisů se týká požadavků na kolejové lože. Následují normy a předpisy jsou zaměřené na parametry příčných pražců a podpražcových podložek. Z popisovaných norem je vynechána norma týkající se ocelových pražců [2], jelikož z hlediska zaměření této diplomové práce neobsahuje mnoho relevantních informací.

2.1 ČSN EN 13450

V normě *ČSN EN 13450 (721506) Kamenivo pro kolejové lože* [3] jsou definovány požadavky na kolejové lože. Tyto požadavky stanovují rozmezí různých vlastností nového přírodního i recyklovaného kameniva, které musí tento materiál splňovat, aby mohl být použit do konstrukce kolejového lože železniční trati. Rozdíl mezi pojmy *přírodní kamenivo pro kolejové lože*, *umělé kamenivo pro kolejové lože* a *recyklované kamenivo pro kolejové lože* jsou v této normě stručně a jasně definovány. Je zde také seznam norem, které se zabývají postupy, kterými se stanovují vlastnosti kameniva, a jakým způsobem mají být zkušební vzorky odebrány.

V kapitole 6 této normy jsou uvedeny konkrétní požadavky na geometrické vlastnosti. Jedná se o požadavky na frakci kameniva, zrnitost, obsah drobných zrn, obsah jemných částic a v souvislosti s tvarem zrn jsou stanoveny požadované parametry indexu plochosti, tvarového indexu a délky zrn. Následující kapitola upřesňuje požadavky na fyzikální vlastnosti, a to odolnost proti drcení podle hodnoty součinitele Los Angeles, odolnost proti otěru podle hodnoty součinitele mikro-Deval a stálost odolnosti proti zmrazování a rozmrazování, objemové hmotnosti, nasákavosti a rozpadavosti.

Podle této normy se také sestavuje identifikace a popis kameniva pro kolejové lože. Identifikace musí obsahovat zejména informace o původu, petrografickém rozboru a frakci kameniva. Dále norma shrnuje základní informace o vyhodnocení vzorků kameniva pro kolejové lože na staveništi, možnostech odběru vzorku a pro některé další normy popisuje podmínky použití v nich obsažených zkušebních postupů pro vzorky kameniva pro kolejové lože. Samostatná příloha je zaměřena na řízení výroby, kde jsou mimo jiné popsány požadavky na četnost a místo kontroly a odběr vzorků pro provádění zkoušek při výrobě včetně způsobu vedení záznamů o těchto informacích.

2.2 Obecné technické podmínky Kamenivo pro kolejové lože

Pro použití kameniva do kolejového lože železničních drah Správy železnic, s. o. je nutné splnit podmínky uvedené v normě *ČSN EN 13450* [3] a současně

i doplňující požadavky dle *Obecných technických podmínek „Kamenivo pro kolejové lože“* [4]. V tomto dokumentu jsou stanoveny vlastnosti kameniva pro dodávky nového přírodního kameniva i recyklovaného kameniva do kolejového lože železničních drah ve vlastnictví státu. Mimo vlastnosti kameniva také stanovují způsob výroby a kontroly, prokazování a ověřování kvality, manipulaci, skladování a dodávání.

Kamenivo je podle těchto technických podmínek děleno do tříd. Nové přírodní kamenivo je rozdělováno do tříd B0, BI a BII a recyklované kamenivo do tříd BI a BII. Třída kameniva vypovídá o kvalitě materiálu, a tedy i tom, do jakých konstrukcí může být dané kamenivo použito. Zatímco kamenivo třídy BI a BII je určeno pro použití v konvenčních železničních drahách, kamenivo třídy B0 je vyžadováno pro použití do tratí, kde je provozována vysokorychlostní železniční doprava s rychlostí větší než 200 km/h. Dále jsou v těchto obecných technických podmínkách popsána pravidla pro prokazování kvality kameniva, způsob objednávky a dodávky, záruky a reklamace.

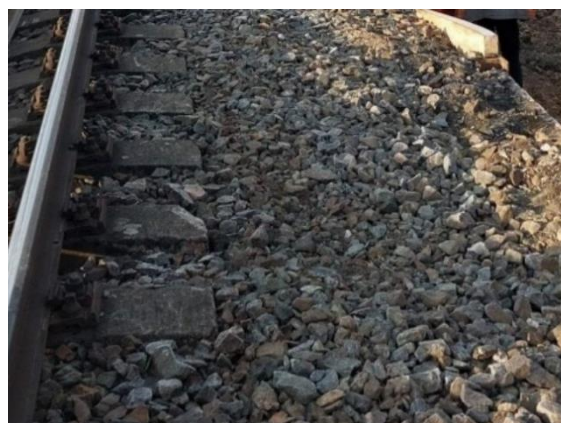
Nové přírodní kamenivo (viz Obr. 1) se dle tohoto dokumentu rozděluje do tříd B0, BI a BII na základě podílu ostrohranných zrn, obsahu povolených cizorodých částic a úbytku hmotnosti při zkoušce trvanlivosti síranem sodným. Pro účely užití recyklovaného kameniva do kolejového lože je zde definováno, že recyklované kamenivo vzniká úpravou kameniva, které již bylo do kolejového lože použito a vystaveno tak nejen dopravnímu zatížení a povětrnostním vlivům, ale také znečištění od projíždějících vlaků (viz Obr. 2). Pokud bylo kamenivo v některých úsecích trati znečištěno škodlivými látkami, musí se odtěžit zvlášť a nemůže být použito pro výrobu recyklovaného kameniva.

Z kameniva určeného pro recyklaci musí být odebrány vzorky pro zkoušky stanovení zrnitosti, zjištění přítomnosti zrn vápence a dolomitu, stanovení rozličných částic a zaoblenosti hran zrn. Kamenivo může být postoupeno k recyklaci jen pokud je správné frakce a splňuje podmínky maximálního obsahu vápence a dolomitu, cizorodých částic, vysokopecní strusky a míry znečištění. Pro použití do kolejového lože se recyklované kamenivo rozděluje do tříd na základě zaoblenosti hran zrn, obsahu cizorodých částic a obsahu

vysokopeční strusky. Vlastnosti, které se u recyklovaného kameniva neposuzují, jsou pevnost, nasákavost, mrazuvzdornost, trvanlivost, rozpad čediče, objemová hmotnost, sypná hmotnost a mezerovitost. Tyto parametry se předpokládají jako neměnné, tedy stejné jako před prvním užitím kameniva do kolejového lože.



Obr. 1: Nové přírodní kamenivo [Zdroj: Autor]



Obr. 2: Znečištěné použité kamenivo [Zdroj: Autor]

2.3 ČSN EN 13145+A1

Norma ČSN EN 13145+A1 (491410) *Železniční aplikace – Kolej – Dřevěné příčné a výhybkové pražce* [5] obsahuje definice termínů potřebných pro popsání materiálu a vad dřevěných pražců. Nezabývá se jinými dřevěnými prvky pro stavbu železničních tratí (např. mostnicemi). Pro dřevěné příčné a výhybkové pražce je v této normě specifikován způsob značení pražců (včetně označení pražcovými hřeby – viz Obr. 3) a informace, které musí být obsaženy v průvodní dokumentaci, tedy odkaz na normu, druh dřeva a rozměry. Pokud je pražec naimpregnován, musejí být doplněny i údaje o impregnačním závodu, názvu ochranného prostředku, třídě průniku, příjmu ochranného prostředku, číslo výrobní dávky a také rok impregnace.

Dále je v této normě uvedeno, na jaké konkrétní druhy dřevin se tato norma vztahuje. Vady dřevin jsou touto normou rozděleny dle typu a druhu dřeviny. Pro každý typ je popsáno, u kterých materiálů se vyskytují a zda jsou přípustné, přípustné s podmínkami či nepřípustné. Tato norma také obsahuje konkrétní požadavky na kvalitu a geometrii, původ, výrobní podmínky, tvary, rozměry a tolerance a požadavky na trvanlivost a ochranu dřevěných příčných

a výhybkových pražců pro použití v železničním svršku. Konkrétnější informace ohledně zkoušení a způsobů ochrany dřevěných pražců poskytují jiné normy.



Obr. 3: Označení dřevěného pražce pražcovým hřebem [Zdroj: Autor]

2.4 Soubor norem ČSN EN 13230

Na betonové příčné a výhybkové pražce je zaměřen soubor norem ČSN EN 13230 *Železniční aplikace – Kolej – Betonové příčné a výhybkové pražce*. Tento soubor má celkem 6 částí, z nichž nejdůležitější pro tuto práci jsou *Část 1: Obecné požadavky* [6], *Část 2: Předpjaté monoblokové pražce* [7] a *Část 6: Konstrukce* [8].

Z názvu každé části vyplývá, kterou oblast problematiky betonových pražců upravuje. Část 1 [6] se zabývá geometrickými parametry a kontrolními postupy včetně stanovení zkoušek, jejichž provedení je nutné k prokázání požadovaných vlastností (geometrických i materiálových) betonových pražců a jejich výztuže. Jsou zde také informace o zatížení a roznosu zatížení v železničním svršku, požadavcích na povrchovou úpravu, označování a požadavky na údaje poskytované zákazníkem i dodavatelem. V případě pražců určených pro použití v kolejovém loži je pro ložnou plochu vyžadována drsná úprava. Podrobnosti této úpravy musí být mezi zákazníkem a dodavatelem včas sjednány.[6]

V Části 2 [7] jsou podrobně popsány zkušební postupy týkající se monoblokových pražců. Jedná se o zkoušky statické, dynamické, únavové a zkoušky typu. Tyto zkoušky jsou popsány jak z pohledu zatížení, tak i z hlediska uspořádání zkoušek.

Část 6 [8] se zabývá návrhovými parametry betonových pražců, jejich zkoušením (včetně zkoušky na únavu) i metodami výpočtu ohybového momentu. Je zde také popsán roznos zatížení při zatěžování betonového pražce.

2.5 ČSN EN 16730

Norma ČSN EN 16730 (736367) *Železniční aplikace – Kolej – Betonové příčné a výhybkové pražce s podpražcovými podložkami* [9] navazuje na soubor norem ČSN EN 13230. Z hlediska zaměření této diplomové práce je tato norma relevantní, jelikož jako jediná zahrnuje podpražcové podložky (*under sleeper pad*), a tudíž se dotýká i problematiky kontaktní plochy.

V této normě jsou obsaženy informace o zkušebních metodách pro vyhodnocení podpražcových podložek samostatně i v souvislosti s chováním betonových příčných pražců. Předepisuje zkoušky jak pro samotné podpražcové podložky, tak i pro betonové pražce příčné nebo výhybkové fyzicky spojené s podpražcovými podložkami. Pro provádění zkoušek tato norma předpokládá užití betonových bloků namísto celých pražců. Jsou zde také popsány zkušební postupy zkoušky únavové, odtrhové a zkoušky nepříznivého vlivu prostředí. Tuto normu lze tedy považovat za výchozí pro provádění laboratorních zkoušek betonových pražců s podpražcovými podložkami. Pro účely zkoušek je zde definován tvar a materiál zkušebního tělesa nahrazujícího kolejové lože – geometrické šterkové desky (*geometric ballast plate*), která je blíže popsána dále v této práci v kap. 3.2.2.

2.6 Předpis SŽ S3

Předpis SŽ S3 [10] je dokumentem vydaným Správou železnic, s.o. a je zaměřený na železniční svršek. Předpis je rozčleněn na několik dílů, z nichž první, *Díl I: Základní ustanovení*, slouží mimo jiné jako podklad pro orientaci v dalších částech. S ohledem na téma této seminární práce je vhodné zmínit následující části tohoto předpisu: *Díl V – Kolejnicové podpory*, *Díl VII – Sestavy železničního svršku a jejich použití*, *Díl X – Kolejové lože a jeho uspořádání*, *Díl XI – Uspořádání stykované a bezstykové koleje*, *Díl XIV – Propojky, lanová*

propojení, ukolejnění a izolované styky kolejnic a Díl XVII – Železniční svršek na železničních drahách s rychlostí vyšší než 200 km/h.

Díl V spolu s Dílem VII poskytuje informace týkající se tvaru, rozměrů a zásad použití betonových, dřevěných a ocelových pražců. Další předepsané vlastnosti, a to požadavky na izolační vlastnosti pražců, jsou obsaženy v Dílu XIV. V Dílu XI je uvedeno rozdělení pražců v koleji, tedy jednoho z parametrů, který má velký vliv na zatížení pražce. Doplnující informace k použití pražců v kolejích s rychlostí vyšší než 200 km/h jsou obsaženy v Dílu XVII. V této části předpis nařizuje v kolejích s rychlostí vyšší než 200 km/h užití výhradně pražců betonových s nominální délkou 2,6 m. V závislosti na rychlosti v koleji je zde také uveden požadavek na minimální hmotnost pražce a užití podpražcových podložek, které musí být do pražců zabudovány již při výrobě.

Z hlediska kolejového lože je podstatný Díl X, kde jsou popsány profily kolejového lože a podmínky pro použití jednotlivých tříd nového přírodního kameniva (B0, B1 a BII) a recyklovaného kameniva (BI a BII) v kolejovém loži. Volba třídy kameniva závisí jednak na tom, zda se jedná o kamenivo nové či recyklované a také na rychlosti koleje. Pro koleje s rychlostí vyšší než 120 km/h je vyžadováno kamenivo B1, zatímco pro koleje s rychlostí nižší než 120 km/h postačuje kamenivo BII. Dle předpisu lze však recyklované kamenivo v koleji s rychlostí vyšší než 120 km/h použít pouze ve spodní vrstvě kolejového lože, a to maximálně do výšky 50 mm pod úroveň ložné plochy pražců. Dle Dílu XVII musí být v kolejích s rychlostí vyšší než 200 km/h použito výhradně nové přírodní kamenivo třídy B0.

2.7 Technické kvalitativní podmínky staveb státních drah

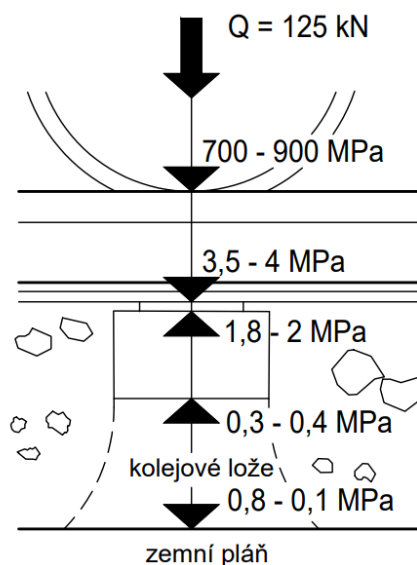
Technické kvalitativní podmínky staveb státních drah je soubor dokumentů spravovaných Správou železnic, s.o., který shrnuje a sjednocuje požadavky na zřízení, údržbu i odstraňování konstrukcí železničních tratí ve vlastnictví státu a provozovaných Správou železnic, s.o. V kontextu této práce jsou důležité kapitoly týkající se železničního svršku a kolejového lože, tedy *Kapitola 7: Kolejové lože* [11] a *Kapitola 8: Konstrukce koleje a výhybek* [12].

V kapitole 7 [11] se nacházejí informace o technologických postupech prací i podmínky pro skladování, manipulaci a přejímání prací souvisejících s kamenivem kolejového lože. Podmínky pro prokázání kvality nového kameniva jsou stanoveny zvláště pro nové kamenivo a pro recyklované kamenivo.

Kapitola 8 [12] obsahuje mimo jiné informace o požadavcích na dodávky jednotlivých typů příčných pražců, technologické postupy prací, skladování a průkazní a kontrolní zkoušky. Požadavky na příčné pražce se dále řídí *Obecnými technickými podmínkami „Betonové pražce pro železniční dráhy“* [13], *Obecnými technickými podmínkami „Dřevěné kolejnicové podpory pro železniční dráhy“* [14] a odpovídajícími technickými podmínkami dodacími. Aktuální informace ohledně konkrétních schválených výrobků pro železniční svršek (běžnou kolej) jsou zveřejňovány na webových stránkách Správy železnic, s.o. [15]. Na těchto stránkách jsou jako součást služební rukověti [16] uvedeny také příklady způsobů značení součástí železničního svršku a příklady dokumentů dokladujících kvalitu dodávek nových výrobků pro železniční svršek.

3 Kontaktní plocha mezi ložnou plochou pražce a kolejovým ložem

Pro pochopení významu zkoumání kontaktní plochy mezi ložnou plochou pražce a kolejovým ložem je nejdříve nutné podívat se na tuto problematiku v kontextu celé konstrukce železniční trati. Při pohybu drážních vozidel po kolejích dochází k přenosu zatížení od drážního vozidla přes železniční svršek do železničního spodku a postupnému roznášení sil, tedy i ke zmenšení působícího napětí – viz Obr. 4 [17]. Právě v železničním svršku se nachází styk pražce a kolejového lože. Prostřednictvím pražce se přenáší zatížení z kolejnice a upevnění do kolejového lože. Dolní strana pražce se nazývá ložná plocha a její kontakt s kamenivem kolejového lože lze experimentálně kvantifikovat a vyjádřit jako tzv. *kontaktní plochu*. [17, 18]



Obr. 4: Schéma přenosu napětí v konstrukci železničního svršku [17]

Kolejové lože je zpravidla tvořeno štěrskem frakce 31,5/63. Zrna štěrku jsou do sebe zaklíněna a tím je docílena stabilita kolejového roštu, která je významná kvůli stabilitě bezстыkové koleje. Materiál kolejového lože musí zajistit přenos statické ale i dynamické složky zatížení, která na konstrukci trati působí při průjezdu vozidla. Jednou z funkcí kolejového lože je tedy také zpružnění konstrukce železniční trati. Pražec uložený na tuto vrstvu štěrku není podpírán souvisle plošně, nýbrž se o zrna kolejového lože opírá na menších izolovaných

plochách. Součtem velikostí jednotlivých izolovaných ploch se získá celková kontaktní plocha mezi pražcem a kolejovým ložem, jejíž velikost můžeme dále zkoumat.

Velikost kontaktní plochy je důležitá z hlediska opotřebení materiálu pražce i kolejového lože. Napětí na jejich rozhraní závisí úměrně na velikosti přenášené síly a neúměrně na velikosti kontaktní plochy a vypočítá se tedy podle vzorce

$$\sigma = N/A \quad (1)$$

kde σ je napětí [Pa], N působící síla [N] a A je plocha, na které napětí působí [m²].

Z toho plyne, že s větší přenášenou silou je napětí větší a s větší kontaktní plochou zase menší. Větší napětí má za následek větší opotřebování materiálů, a tudíž i snižování kvality a životnosti konstrukce. Velikost kontaktní plochy je také důležitým faktorem ovlivňujícím velikost odporu pražců proti příčnému či podélnému posunu. Charakter kontaktní plochy a kontaktního napětí mezi pražcem a kolejovým ložem je klíčový pro zaručení stability a bezpečnosti provozu.

3.1 Velikost kontaktní plochy

Velikost kontaktní plochy se standardně vyjadřuje v procentech, a to jako poměr plochy pražce podpírané šterkem ku celkové půdorysné ploše pražce. Pokud by velikost kontaktní plochy byla 100%, znamenalo by to, že je pražec dokonale podpírán po celé ploše. To je však pouze teoretický příklad, který s použitím šterkového lože při jeho zrnitosti nenastává. Běžně se velikost kontaktní plochy řádově pohybuje v nižších desítkách procent a závisí zejména na typu materiálu pražce, případném použití podpražcové podložky a dalších parametrech [19]. Například v rámci práce V. Monaco [20] se naměřená kontaktní plocha pohybuje v rozmezí 6-34 %. V práci B. Balážové [19] byla při laboratorním měření kontaktní plocha naměřena při statickém zatížení 0,4 MPa v rozmezí 7–36 % a při rázovém zatížení lehkou dynamickou deskou v rozmezí 3-19 %.

Velikost kontaktní plochy závisí na více parametrech včetně těch, které mohou být v čase proměnné. Obecně se jedná především o geometrické a materiálové

parametry jednotlivých komponent železničního svršku. Dále také o parametry charakterizující zatížení od dopravy. Nezanedbatelnými vlivy na stav trati jsou klimatické podmínky a s časem narůstající znečištění kolejového lože.

První oblastí jsou vlastnosti pražce. Čím větší má pražec rozměry, tedy šířku a délku, tím větší bude jeho ložná plocha i kontaktní plocha mezi kamenivem kolejového lože a pražcem. Záleží také na úpravě a stavu ložné plochy pražce. K výhodnější interakci pravděpodobně dojde spíše, pokud je povrch hrubý či členitý než u povrchu hladkého. Také materiál, ze kterého je pražec vyroben, může ovlivnit velikost kontaktní plochy [21]. Je tedy důležitou informací, zda je v provozované železniční trati či při laboratorní zkoušce použit pražec dřevěný, betonový, ocelový nebo polymerový. Každý materiál má jinou tvrdost, a tudíž se při zatěžování na kontaktní ploše s kolejovým ložem deformuje jinak [22]. Otláčení pražce od zrn šterku lze demonstrovat například na dřevěném pražci na Obr. 5. Vzhledem ke geometrii jednotlivých zrn šterku lze předpokládat, že při větším zatlačení zrna do pražce či podpražcové podložky, vznikne větší kontaktní plocha [23].



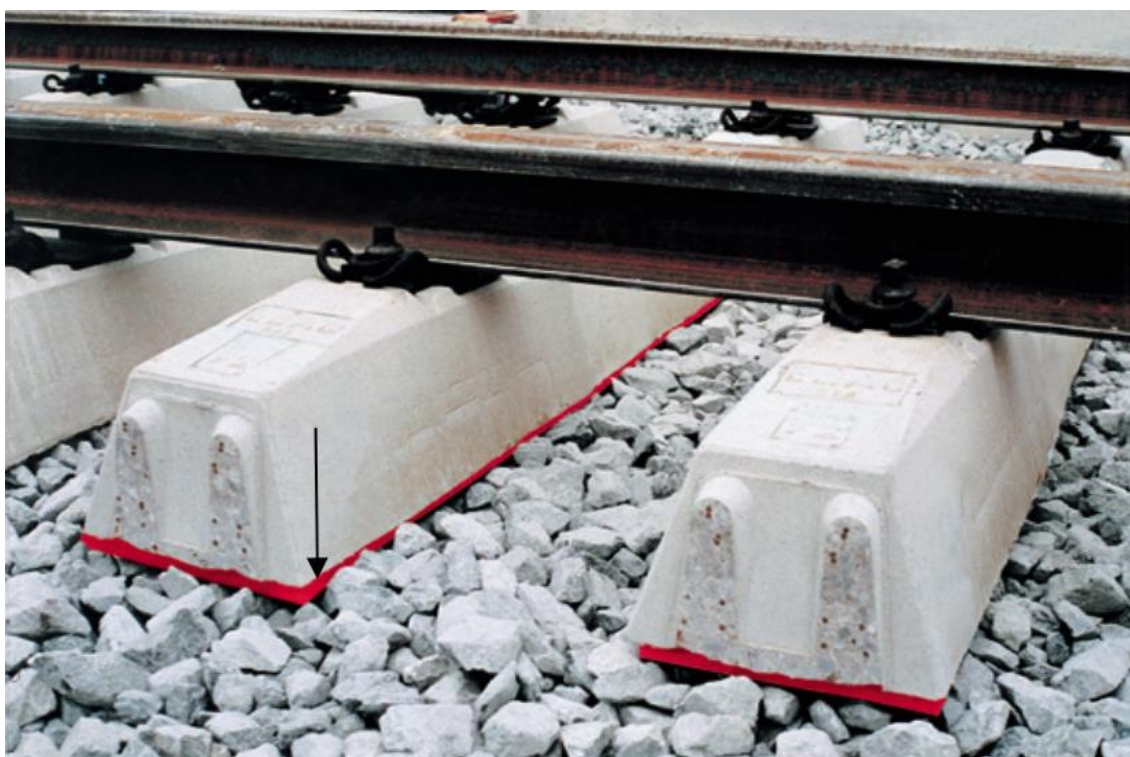
Obr. 5: Viditelné otláčení pražce od kolejového lože na jeho původní ložné ploše [Zdroj: Autor]

Druhou oblastí jsou vlastnosti šterku. Velikost kontaktní plochy závisí v první řadě na velikosti zrn materiálu kolejového lože, která by pro železniční stavby měla odpovídat frakci 31,5/63. Dále záleží nejen na opotřebení kameniva (snížení ostrohrannosti aj.), ale také na míře jeho zhutnění a celkové údržbě. S větší mírou zhutnění je pravděpodobné, že kontaktní plocha bude větší. Další proměnnou

při stanovování velikosti kontaktní plochy mohou být vlastnosti materiálů konstrukčních a podkladních vrstev a zemní pláně. Prostředkem pro zvětšení kontaktní plochy může být i vložení speciálního prvku železničního svršku – *podpražcové podložky* (USP, under sleeper pads).

3.1.1 Podpražcové podložky

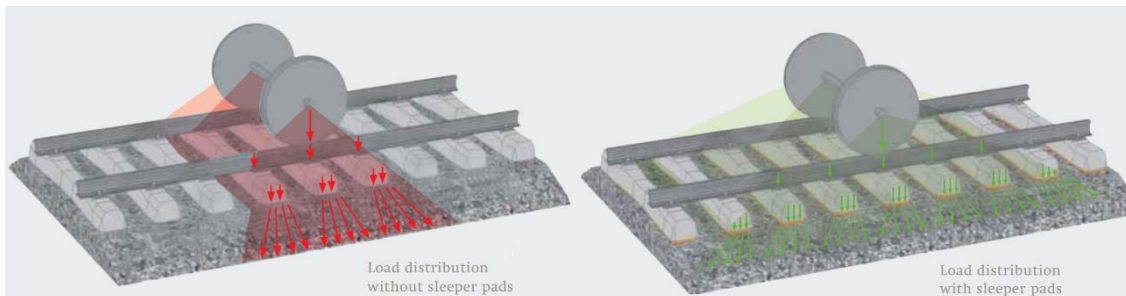
Podpražcové podložky jsou prvky s převažujícími půdorysnými rozměry, které jsou určeny k umístění na ložnou plochu pražce a nacházejí se tedy přímo mezi pražcem a kolejovým ložem (viz Obr. 6). Hlavní úlohou těchto prvků je přenos zatížení a snížení přenosu vibrací a nárazů mezi pražcem a kolejovým ložem. Při přenášení zatížení z pražce přes podpražcovou podložku do kolejového lože dochází k její pružné deformaci v místech s nejvyšším napětím. Následkem této deformace je mimo jiné zvětšení kontaktní plochy.



Obr. 6: Umístění podpražcových podložek v konstrukci [24]

Užitím podpražcových podložek se kontaktní plocha zvětší až několikanásobně v závislosti na velikosti zatížení a tuhosti podložky (viz roznos zatížení na Obr. 7). Například při měření kontaktní plochy metodou otisků je možné při vnesení napětí

0,4 MPa zaznamenat nárůst ze 7,7 % na 35,9% při přidání podpražcové podložky do zatěžovacího modelu [19].



Obr. 7: Roznášení zatížení bez (vlevo) a s podpražcovými podložkami (vpravo) [25]

Dalším efektem použití podpražcových podložek je, že při průjezdu vlaku omezují šíření hluku a otřesů do okolí. Tím dochází ke snížování nepříznivého vlivu na člověka, životní prostředí, životnost konstrukce železniční trati a konstrukcí mimo trať. Podpražcové podložky by měly být vyrobeny z odolného pružného materiálu, aby zvládly plnit svoji úlohu spolehlivě i po vysokém počtu zatěžovacích cyklů. Užitím podpražcových podložek je docílena vyšší kvalita geometrické polohy koleje provozované trati [24].

Podpražcové podložky mohou být vyrobeny z elastických materiálů, jako je například polyuretan, ethylene vinyl acetát nebo pryž [24]. Mohou se skládat z jedné či několika vrstev. Tyto vrstvy musí zajistit pružnost a připojení podložky k pražci. U měkčích podložek může být použita ochranná vrstva [26].

V současnosti jsou na trhu dostupné výrobky mnoha firem a jsou tedy k dispozici podpražcové podložky různých tuhostí. Tuhost výrobku vychází z použitého materiálu či kombinace materiálů a různé výrobky mohou mít různou míru odolnosti. Liší se také ve způsobu aplikace. Podpražcové podložky lze na pražec připevnit buď již v průběhu výroby (preferováno), nebo až na hotový pražec. Možnosti aplikace na hotový pražec jsou nalepení, nátěr nebo nástřik [24]. Při manipulaci s takto upravenými pražci se musí dbát na řádné dodržování podmínek a doporučení pro skladování a pokládku. V jiném případě by mohlo dojít k poškození materiálu naneseného na jejich ložnou plochu.

Pro každou konstrukci musí být konkrétní výrobek vybrán vhodně a v souladu s technickými normami i předpisy. Například dle předpisu S3 [10] musí být

pro konstrukce kolejí s rychlostí vyšší než 200 km/h použity pouze pražce s podpražcovou podložkou připevněnou k pražci již během výroby. Navrhování podpražcových podložek do konstrukcí železničních tratí ve vlastnictví státu je upravováno metodickým pokynem Správy železnic, s. o. [27].

3.2 Měření velikosti kontaktní plochy mezi ložnou plochou pražce a kolejovým ložem

Měření velikosti kontaktní plochy mezi ložnou plochou pražce a kolejovým ložem je vhodným způsobem, jak porozumět roznosu zatížení v této oblasti kolejového svršku. Na základě stanovení velikosti kontaktní plochy lze snadno dopočítat i orientační velikost napětí, které je přenášeno na kolejové lože. Nelze však uvažovat, že stejné napětí působí na všechna zrna šterku kolejového lože, jelikož napětí zpravidla není po celé kontaktní ploše rovnoměrně rozloženo. Některá zrna či celé oblasti materiálu pod ložnou plochou pražce mohou být namáhána více než okolí.

Dostupnost metod pro měření kontaktního napětí je značně omezená v porovnání s metodami pro měření kontaktní plochy. Toto omezení spočívá v technologické a finanční dostupnosti. V minulosti byly spíše využívány metody pro stanovení kontaktní plochy a až postupem času se začaly objevovat metody, které umožňují monitorování velikosti kontaktní plochy i kontaktního napětí.

Pro stanovení velikosti kontaktní plochy mezi pražcem a kolejovým ložem lze využít metody analytické (počítačové simulace) nebo metody experimentální. Pro vytvoření analytických modelů je možné využít například počítačové programy Illitrack, Geotrack či Kentrack [28]. Některé experimentální metody lze aplikovat pouze při měření v laboratoři, některé ale také in situ. Zpravidla se měření provádí v laboratoři, jelikož realizace měření v terénu je poměrně náročná – ne však nemožná. Měření kontaktní plochy v terénu bylo provedeno například jako součást práce B. Balážové [19].

Způsobů, jak měřit kontaktní plochu mezi pražcem a kolejovým ložem, je několik. Velikost této plochy je možné také odvodit z otisku kolejového lože na podložce odebrané z provozované trati po dostatečné době jejího zatěžování [19]. Časově

méně náročné měření jsou metody využívající černý kopírovací papír, nanášení nátěru na zatěžovací desku (nebo kolejové lože) nebo tlakový papír [19, 22]. Ze všech těchto metod je následně nutné zpracovat výsledky z grafické do numerické podoby, aby bylo možné jejich vzájemné porovnání. Moderním způsobem měření je použití tlakových senzorů.

Při provádění měření je nutné v předstihu zvolit vhodnou měřicí metodu a zajistit potřebné technické vybavení. Výběr metody se může odvíjet například od toho, v jakém měřítku bude experiment prováděn, jakým zatížením bude model zatěžován, kolikrát se bude zkouška opakovat a zda se bude zkouška provádět na jednom či více modelech. Mimo to také závisí na dostupném či požadovaném způsobu simulace kolejového lože.

3.2.1 Způsoby modelování kolejového lože

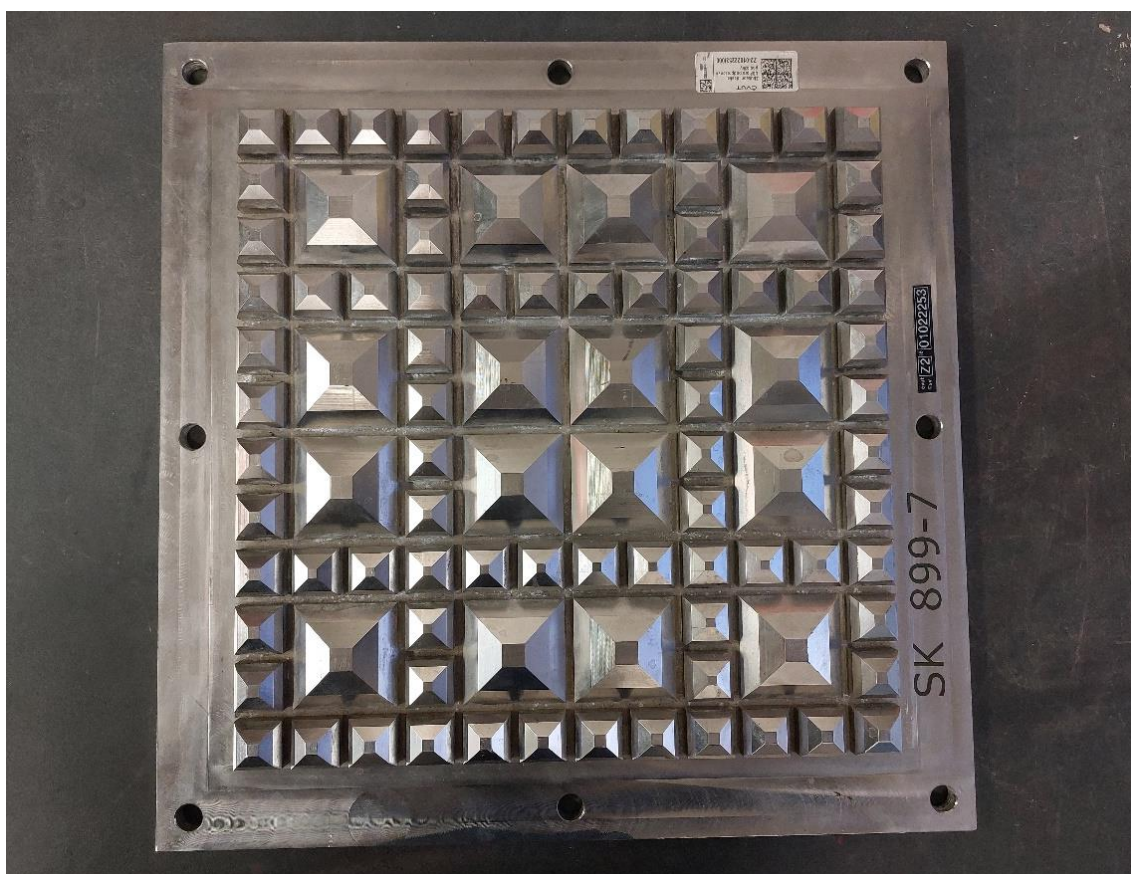
Pro všechny metody měření kontaktní plochy či napětí mezi ložnou plochou pražce a kolejovým ložem je společné, že pro získání relevantních výsledků je nutné pečlivě uvážit, jakým způsobem bude modelováno kolejové lože. Ve skutečnosti je uspořádání zrn kameniva pod každým pražcem jiné, ale při provádění experimentů je zpravidla nezbytné zajistit stejné podmínky pro celou sérii zkoušek. Vhodným způsobem namodelování kolejového lože lze zabránit nežádoucímu narušení uspořádání povrchu štěrku při manipulaci se zbylými částmi modelu a zkreslení výsledků měření. Jednou z možností je použití štěrku, jehož zrna budou prolita epoxidem či jiným vhodným pojivem [29].

Dále může být pro nasimulování jednotných podmínek vhodná náhrada kolejového lože profilovanou deskou. V minulosti již bylo v České republice i zahraničí navrženo mnoho různých typů zkušebních desek pro laboratorní měření. Některé z nich jsou shrnuty například v práci R. Popíka z roku 2011 [30]. Výhodné je užití jasně definované profilované desky, které zaručuje snadné použití a spolehlivou opakovatelnost experimentu. Profilované desky mohou vystihovat nepravidelnost reliéfu kolejového lože nebo mohou být přesně geometricky uspořádány [22]. Uspořádání může být voleno individuálně pro účely experimentu, nebo podle normy [9]. Materiál takové desky musí mít také

dostatečnou tuhost. Vhodné je použití různých slitin kovů. Jedním z faktorů pro výběr způsobu simulace kolejového lože může být i použitá metoda měření.

3.2.2 Geometrická štěrková deska

V souvislosti s technologickým pokrokem a zvyšujícími se nároky na odolnost železničních tratí proti účinkům dynamického zatížení byly vyvinuty podpražcové podložky. Aby bylo možné objektivně porovnávat technické parametry jednotlivých výrobků, byly vyvinuty normové zkušební postupy, které jsou zahrnuty v normě ČSN EN 16730 [9]. Pro účely zkoušek požadovaných touto normou je využívána geometrická štěrková deska SK 899 (viz Obr. 8) jako náhrada profilu kolejového lože. Tím došlo k mezinárodnímu sjednocení různých do té doby používaných zkušebních desek.



Obr. 8: Geometrická štěrková deska [Zdroj: Autor]

Požadavky na tvar i materiál geometrické štěrkové desky jsou kompletně popsány v Příloze A zmiňované normy [9]. Celá deska musí být vyrobena

z oceli 1.4301 dle souboru norem EN 10027. Půdorysný rozměr desky je 380 x 380 mm a výstupky simulující zrna kolejového lože jsou geometricky pravidelně rozmístěny na ploše 300 x 300 mm. Výstupky jsou ve tvaru jehlanů a lze je rozdělit do tří skupin: vnější malé, vnitřní malé a vnitřní velké jehlany. Jednotlivé skupiny se liší nejen velikostí a umístěním, ale také sklonem povrchu. Důležitým faktem je, že horní plochy všech výstupků tvoří jednu rovinu. Rozměry i rozmístění jehlanů jsou ve formě výkresů obsaženy v normě [9].

Díky nepříliš velkým rozměrům a váze desky (cca 27 kg) je zajištěna snadná manipulace při normových i ostatních laboratorních zkouškách. Při plánování experimentů s využitím této desky je nutné uvážit omezenou velikost zatěžovacího modelu a také jistou míru zkreslení výsledků oproti výsledkům z měření na skutečném kolejovém loži [29]. Dle americké studie z roku 2019 [29] vykazují měření s normovou geometrickou šterkovou deskou až 1,8x vyšší kontaktní plochu než bloky vyrobené ze šterku kolejového lože a také s tím spojené menší napětí. Lze předpokládat, že bude v budoucnu hledán způsob, jak parametry kolejového lože simulovat reálněji.

3.2.3 Metoda využívající kopírovací papír

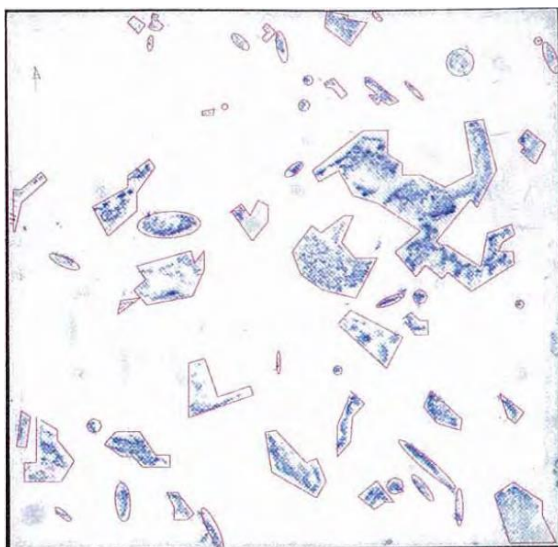
Volba způsobu modelování kolejového lože pro experimenty zkoumající kontaktní plochu mezi ložnou plochou pražce a kolejovým ložem se může mimo jiné odvíjet také od výběru metody měření. Zpravidla platí, že pro měření kontaktní plochy mezi ložnou plochou pražce a kolejovým ložem lze využít stejné metody jako u měření kontaktní plochy mezi podpražcovou podložkou a kolejovým ložem. Metody pro měření kontaktní plochy bývají zpravidla vhodné i pro analýzu počtu kontaktů, avšak pro měření kontaktního napětí jsou vhodné jen některé metody.

Jedna z prvních laboratorních metod pro měření kontaktní plochy byla představena v disertační práci V. Monaco [20]. Ta ve své práci měřila kontaktní plochu mezi ložnou plochou pražce pomocí černého kopírovacího papíru. Kopírovací papír byl vložen mezi podpražcovou podložku a model kolejového lože spolu s bílým papírem. Kopírovací papír zanechal na bílém papíře v místech zvýšeného napětí otisk a ten byl následně elektronicky zpracován (viz Obr. 9).

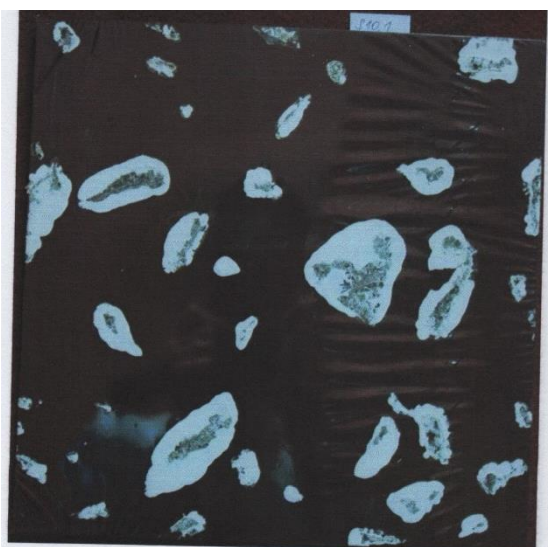
Výhodou této metody je, že lze použít zatížení odpovídající skutečnosti. Rizika této metody spočívají v možném poškození jednoho či obou papírů. [19]

3.2.4 Metoda využívající otisky

Další metoda měření byla vyvinuta v rámci diplomové práce B. Balážové [19], a to metoda využívající otisky. Metoda byla vyvinuta za cílem porovnání vlivu různých typů podpražcových podložek na velikost kontaktní plochy mezi pražcem a kolejovým ložem. Princip metody spočívá v nanesení barvy na kolejové lože v místě zatěžování a vložení průmyslové fólie mezi nabarvený povrch a pražec. Po zatížení zanechá barva otisk na místech se zvýšeným napětím (viz Obr. 10). Tento otisk je po zaschnutí možné zpracovat podobně jako při metodě s kopírovacím papírem. Naskenováním a zpracováním ve vhodném softwaru lze stanovit součet všech obarvených ploch na fólii. [19]



Obr. 9: Fotografie zvýrazněné kontaktní plochy zachycené pomocí kopírovacího papíru [20]



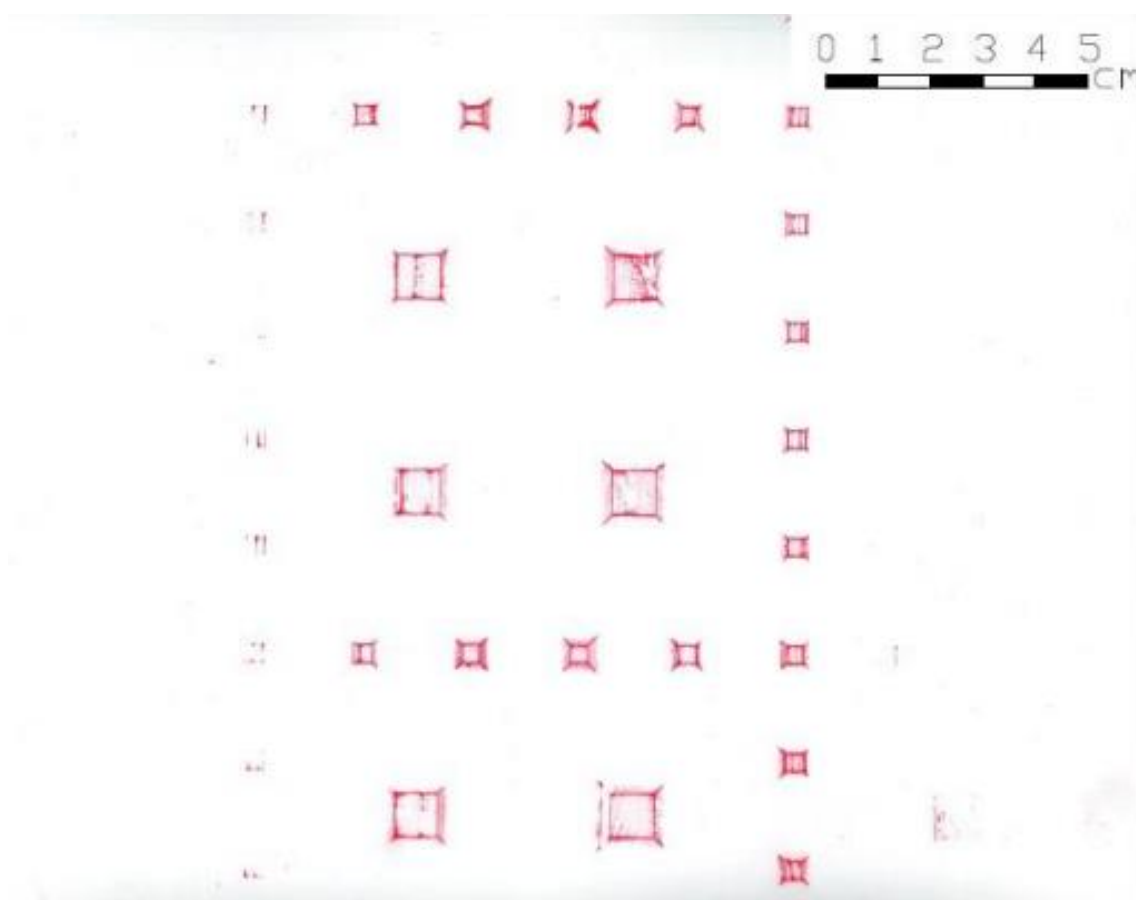
Obr. 10: Fotografie kontaktní plochy zachycené pomocí otisku [19]

B. Balážová metodu otisků prověřila jak pro použití v laboratoři, tak i pro použití v terénu. Výhodou metody otisků oproti metodě využívající kopírovací papír je větší citlivost a prokazatelnější výstupy [23]. Rizika použití této metody spočívají v možném narušení povrchu kolejového lože a přesnosti citlivosti na velikosti působícího napětí, která by mohla být ovlivňována více proměnnými. Velmi důležitý je výběr vhodné barvy a zajištění optimálních teplotních a vlhkostních podmínek. Pro dosažení relevantních výsledků je také nutné zbavit zrna jemných

nečistot ještě před nanesením barvy, což může být při měření v terénu obtížné. [19]

3.2.5 Metoda využívající tlakový papír

Využití tlakového papíru pro měření kontaktní plochy mezi pražcem a kolejovým ložem bylo přelomovým krokem, jelikož tato metoda umožňuje získávání informací nejen o kontaktní ploše, ale také o kontaktním napětí. Speciální tlakový papír obsahuje mikrokapsle s barvivem, které při překročení určité hladiny napětí prasknou, a tím dojde k obarvení papíru (viz Obr. 11). Obarvené plochy lze vyhodnocovat podobnými způsoby jako obě předchozí metody. Dále lze také zpracovat výsledky do prostorového výstupu, jelikož podle intenzity barvy lze zjistit i velikost napětí, které na zatěžované místo působilo. Pro vyhodnocení je nutné výsledky nejprve převést do elektronické podoby obdobně jako u předchozích metod. Ke zpracování výsledků je možné využít speciální software poskytovaný výrobcem tlakových papírů. [22]



Obr. 11: Tlakový papír po zatížení mezi pražcem a geometrickou štěrkovou deskou [22]

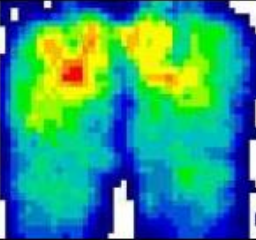
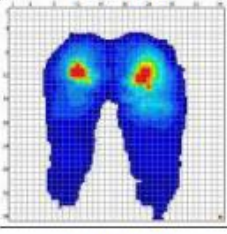
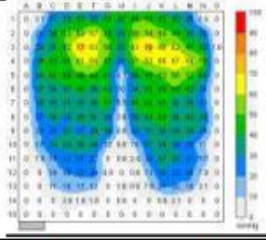
Velkou výhodou oproti předchozím metodám je, že existují různě citlivé varianty papíru. Například Abadi, Le Pen a Zervos použili pro svou práci [31] dva typy tlakového papíru, a to s citlivostí deklarovanou výrobcem v rozmezí 2,5-10,0 MPa a 10,0-50,0 MPa. Skutečná dolní mez citlivosti však byla při tomto výzkumu zjištěna jako nižší. Při využívání této metody je proto vhodné neopomenout kalibrační měření pro ověření skutečné citlivosti tlakového papíru. Efektivita této metody byla dále potvrzena i pro experimenty s geometrickou šterkovou deskou [21]. Nevýhodou této metody je, že tlakové papíry jsou jednorázové. Také je při manipulaci s nimi nutné dbát zvýšené opatrnosti, aby nedošlo k nechtěné aktivaci barviva. [31, 32]

3.2.6 Metoda měření tlakovými senzory

Současnou progresivní metodou je měření kontaktní plochy a napětí tlakovými senzory. Tlakové senzory v různých variantách nabízejí pro výzkum v oblasti železničního svršku i spodku široké využití. Jednou z jednodušších variant jsou talířové tlakové senzory použité např. pro monitoring napětí v pražcovém podloží pro měření zpracovávané v práci K. Hamšlágerové [26]. Pro výzkum kontaktní plochy je však podstatný vývoj sofistikovanějších snímačů, a to podložkových tlakových senzorů. Tyto podložky se skládají z jednotlivých pravidelně uspořádaných senzorů, které umožňují souvislé měření plochy mezi dvěma povrchy a poskytují elektronický výstup.

Užití soustav tlakových senzorů je moderní metoda, která slouží k mapování velikosti a rozmístění tlaku. Využití tlakových senzorů pro stanovení velikosti kontaktní plochy mezi kolejovým ložem a pražcem je jen jeden z možných způsobů použití. Tento systém může sloužit k výzkumným účelům například i v oblastech strojírenství či zdravotnictví. Příkladem může být práce [33], která vznikla za účelem posouzení vhodnosti tlakových senzorů různých výrobců pro výzkum zdokonalení podpory těla při sezení na invalidním vozíku. Jedním z použitých výrobků v této práci je tlaková podložka firmy Tekscan, tedy stejné firmy jako je podložka použitá pro laboratorní měření v kapitole 5. Tlaková podložka firmy Tekscan vybraná pro toto měření měla oproti dvěma konkurenčním výrobkům nejmenší rozestupy mezi jednotlivými senzory.

Při měření se tedy projevila jako nejpřesnější a poskytla neinterpolované výsledky v nejvyšším rozlišení (viz Obr. 12).

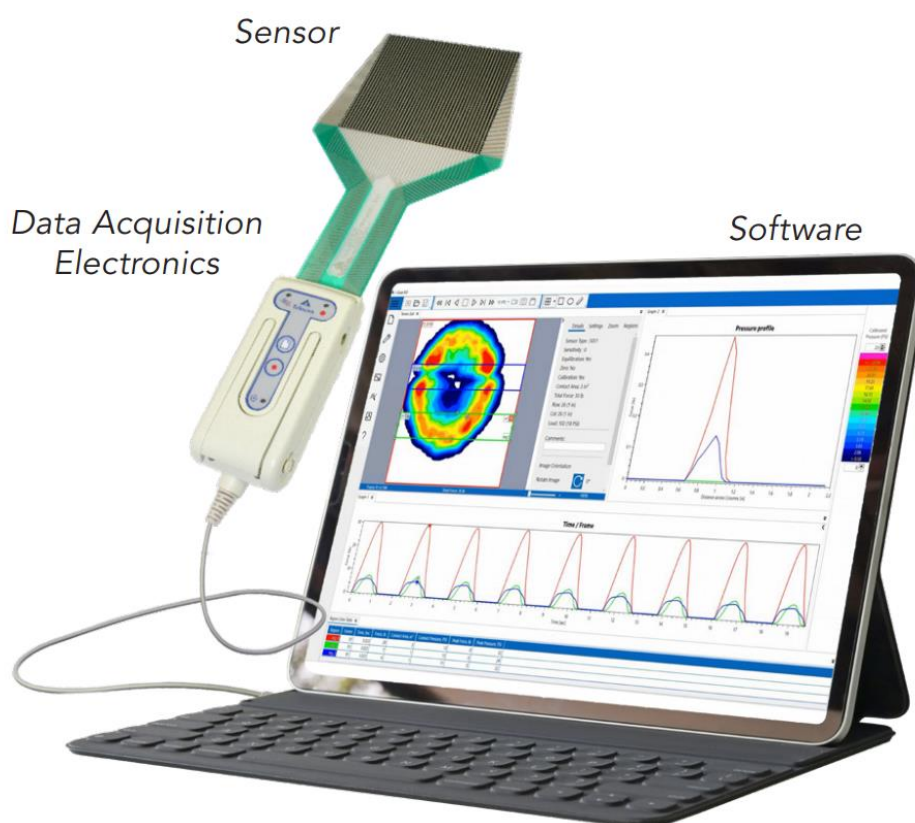
System	Tekscan	Xsensor	FSA
Manufacturer	Tekscan Inc. Boston. US	Xsensor Technology Corporation, Calgary, Canada	Vista Medical, Winnipeg, Canada
			
Sensor type	Conductive ink	Capacitive	Conductive rubber
Single sensor area	103 mm ²	135 mm ²	298 mm ²
Sensor pitch	10 mm	13 mm	25 mm
Number sensors	1558	1296	225

Obr. 12: Porovnání tlakových podložek tří různých výrobců [33]

Vhodnost této technologie pro měření kontaktní plochy a napětí byla předpovězena v příspěvku z roku 2011 [34]. V roce 2013 byly zveřejněny výsledky výzkumu zaměřeného na možnosti kalibrace tlakových podložek pro použití na nesterodných površích jako je šterkové lože [35]. Tlakové podložky mohou být použity i k dalším měřením na železničním svršku. Při volbě vhodné velikosti podložky je možné měřit například kontaktní napětí mezi kolejnicí a pražcem [34]. Velkou výhodou oproti předchozím metodám je, že tlakové senzory pořizují snímky v nastavených časových intervalech a nejsou tedy omezeny jen na maximální hodnoty kontaktní plochy či napětí, která během zatížení nastala. Podrobnější zhodnocení vhodnosti této inovativní metody pro měření kontaktní plochy mezi ložnou plochou pražce a kolejovým ložem je obsahem kapitoly 6.

4 Technologie Tekscan

Jedním z výrobců tlakových podložek je firma Tekscan, Inc. Tato firma poskytuje tlakové podložky v mnoha různých tvarech a velikostech. Pro účely této práce bude dále popsán jen jeden konkrétní výrobek této firmy, a to *Pressure Mapping Sensor 5315-A*. Tato tlaková podložka byla použita pro měření popsané v kapitole 5. Pro provádění měření touto podložkou je nutné jeho propojení s počítačem prostřednictvím zařízení pro sběr dat – tzv. čtecí hlavy (viz *Data Acquisition Electronics* na Obr. 13). Na způsobu propojení závisí maximální rychlost snímání, která se pohybuje v rozmezí 100 Hz (Standard USB) až 20 kHz (High Speed USB). V počítači musí být nainstalován speciální software, který umožňuje sledování aktuálních výsledků měření a jejich záznam. [36]



Obr. 13: Příklad uspořádání měřicí techniky firmy Tekscan, Inc. [36]

Výrobek *Pressure Mapping Sensor 5315-A* je složen ze skupiny senzorů uspořádaných v pravouhlé soustavě. Umožňuje měření tlaku mezi dvěma

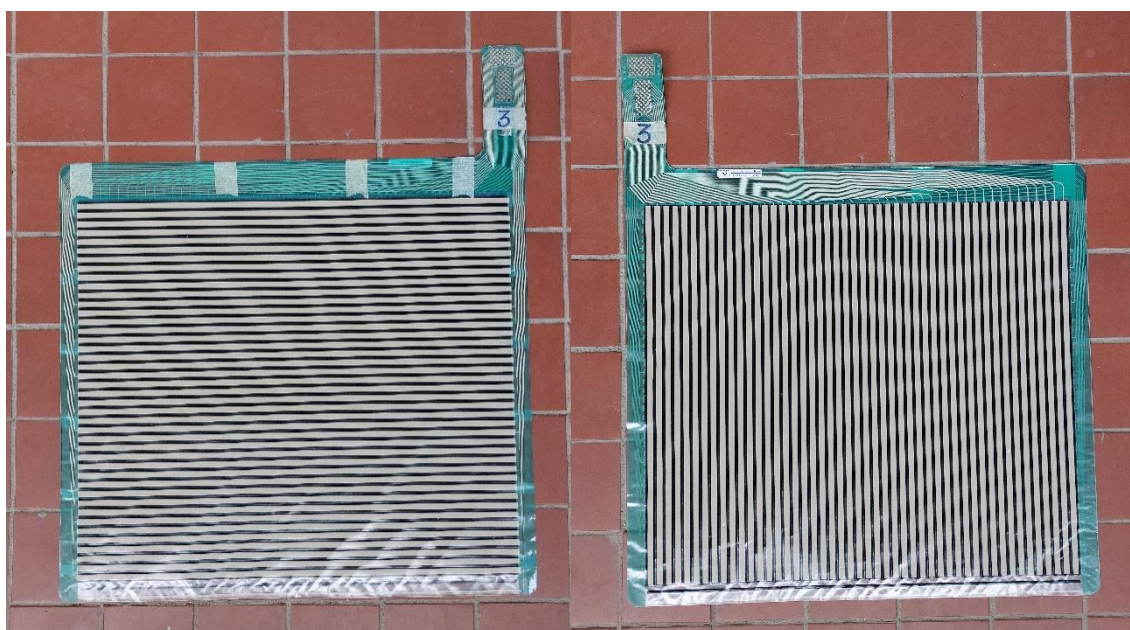
styčnými plochami. Senzory jsou rozmístěny na ploše o rozměru 487,7 x 426,7 mm. Na této ploše je rovnoměrně uspořádáno celkem 2 016 jednotlivých tlakových senzorů. To znamená, že hustota pokrytí je 1 senzor/cm². Maximální měřitelné zatížení je 207 kPa (případně 41 kPa u jiné varianty výrobku). Při kolové síle 125 kN dosahuje napětí na ložné ploše příčného pražce hodnot v rozmezí 300 – 400 kPa [17]. Kolová síla při měření senzorem *Pressure Mapping Sensor 5315-A* musí tedy být přibližně dvakrát menší, aby nedošlo k přetížení a následnému poškození senzoru. Na tento odhad se však při měření kontaktní plochy mezi ložnou plochou pražce a kolejovým ložem nelze spolehnout, jelikož na nerovném povrchu kameniva není napětí rozmístěno rovnoměrně. Mohlo by tedy dojít k nežádoucímu poškození určité části tlakových senzorů podložky a znehodnocení výrobku i výsledků měření. [36, 37]

Tlakové podložky jsou tvořeny dvěma tenkými elastickými polyesterovými foliemi, které mají elektricky vodivé elektrody. Tyto dvě vrstvy jsou vůči sobě natočeny o 90° (viz Obr. 14). Celková tloušťka této sensorové folie je zhruba 0,4 mm, což umožňuje různé účely využití i ve stísněných podmínkách a minimalizuje zkreslení výsledků způsobených tloušťkou měřicího senzoru. Pracovní teplota senzorů je -40 °C až +60 °C, a tudíž není vyloučeno ani provádění měření in situ. [36, 37]

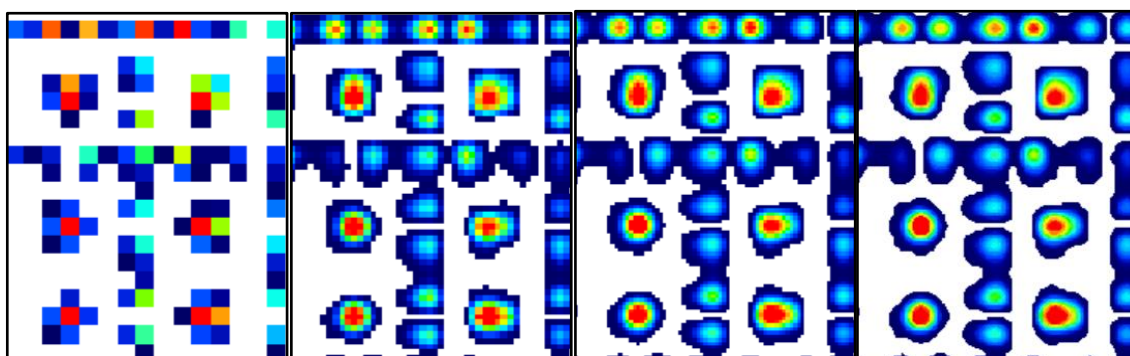
Výsledky měření jsou v reálném čase zobrazovány na obrazovce počítače pomocí softwaru I-Scan. Tento software umožňuje kalibraci, sledování výsledků v absolutních či relativních jednotkách a ukládání výstupu ve videoformátu s příponou .avi či export naměřených dat do formátu .csv. Tento systém měření umožňuje zjišťování dat o velikosti zatížení, velikosti zatěžované plochy, kontaktním napětí, extrémech zatížení a extrémech kontaktního napětí. [36]

Software nabízí různá uživatelská nastavení co do barevnosti i stylu vykreslování. Je možné omezit barevnost výsledků na stupně šedi a volit barvu pozadí výsledků. Pro neomezenou barevnost výsledků je vhodné použít bílou barvu na pozadí, jelikož pak zřetelně vyniknou i nižší napětí reprezentovaná tmavou modrou barvou. Výsledky mohou být zobrazeny jako 2D či 3D (viz Obr. 15 a Obr. 16).

U 2D výsledků může být zvolena možnost *bez interpolace* (*no interpolation*), ze které je možné v kombinaci se zapnutím zobrazení číselných výsledků (viz Obr. 17) přesně stanovit napětí na každém jednotlivém senzoru tlakové podložky. Realističtější grafické zobrazení lze získat zvolením módu interpolace 1x1, 3x3 či nejjemnějšího 5x5. Výsledkem je obraz o vyšším rozlišení. Avšak toto zobrazení je uměle vytvořené ze stále stejného datového podkladu a je s ním tedy nutné nakládat obezřetně.



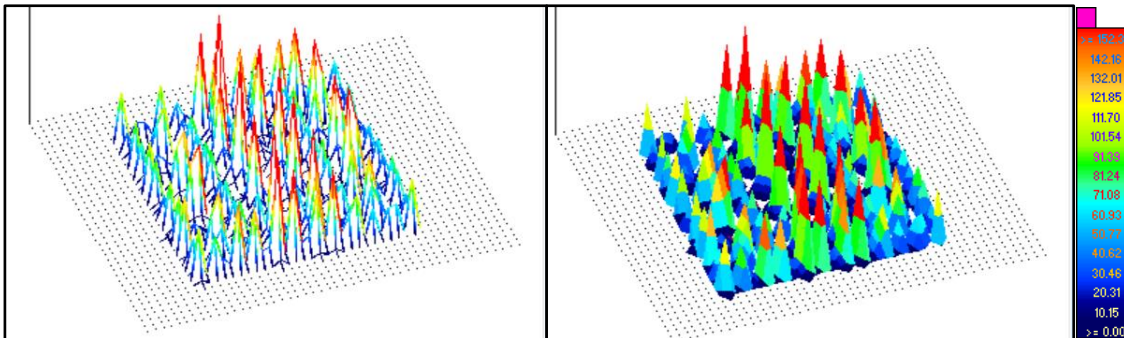
Obr. 14: Fotografie tlakového senzoru Pressure Mapping Sensor 5315-A z horní a dolní strany
[Zdroj: Autor]



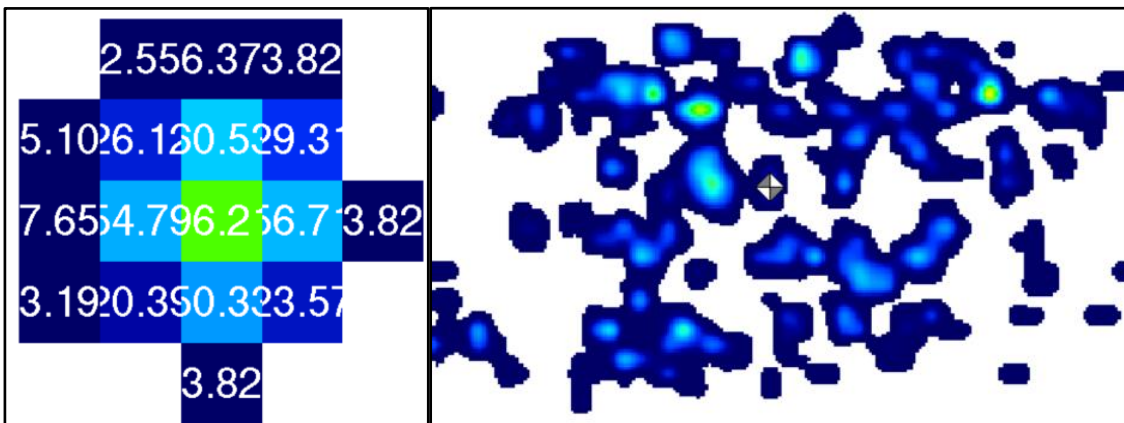
Obr. 15: Možnosti interpolace v softwaru I-Scan: No interpolation, Interpolation 1x1, 3x3 a 5x5
[Zdroj: Autor]

Do výsledků je také možné promítnout výslednici sil působících na podložku (viz Obr. 17). Při větším počtu snímků z průběhu zatěžování podložky je možné

sledovat trajektorii této výslednice. Sérii snímků lze pořídit buď ručním ukládáním jednotlivých snímků nebo automatickým snímáním v předem stanovených intervalech, čímž vzniká videozáznam. [36, 37]



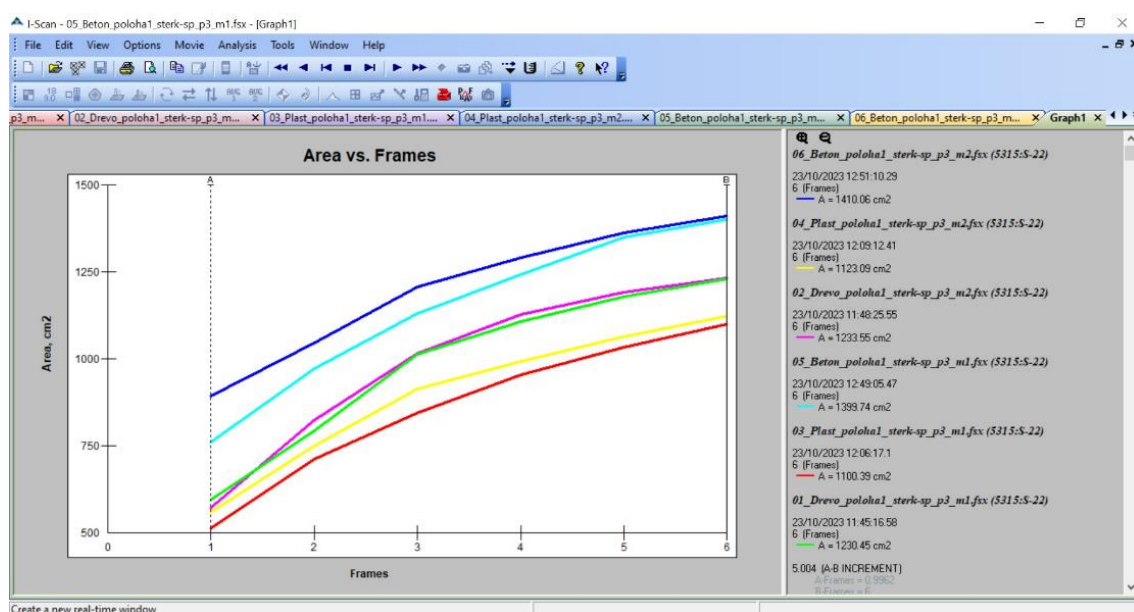
Obr. 16: Možnosti 3D zobrazení v softwaru I-Scan: Wireframe, 3D contours, legenda hodnot napětí [Zdroj: Autor]



Obr. 17: Možnosti zobrazení v softwaru I-Scan: Zobrazení číselných výsledků, zobrazení výslednice sil [Zdroj: Autor]

Naměřená data lze v softwaru I-Scan ořezávat a porovnávat. Způsob vyhodnocení lze uložit jako samostatný soubor a později použít pro výsledky dalšího měření. Oříznutí je prováděno s přesností na 1 senzor umístěním tzv. boxu. Dále software umožňuje vynesení dat do grafu, a to buď zvlášť pro jedno měření, nebo lze do grafu přidat data ze záznamů dalších měření (viz Obr. 18). Pomocí šipek na klávesnici lze zjišťovat konkrétní hodnoty zobrazených funkcí v jednotlivých snímcích. Popis hodnot přímo v grafu není možný, ale je možné zpracovat exportovaná data v tabulkovém procesoru a grafy naformátovat dle vlastní potřeby.

Před zahájením měření je vhodné načíst kalibrační soubor. Problematikou kalibrace tlakových podložek Tekscan pro účely měření na nerovných površích se zabývá například práce z roku 2013 [34]. Princip kalibrace spočívá v zatížení podložky známou velikostí síly a na jasně definovatelném povrchu. Řešením může být stlačení podložky mezi hladkým ocelovým plechem a deskou s tzv. vaflovým reliéfem [34]. Vytváření kalibračního souboru probíhá přímo v softwaru I-Scan. [38]



Obr. 18: Pracovní prostředí softwaru I-Scan – vynesení dat několika zaznamenaných měření do grafu [Zdroj: Autor]

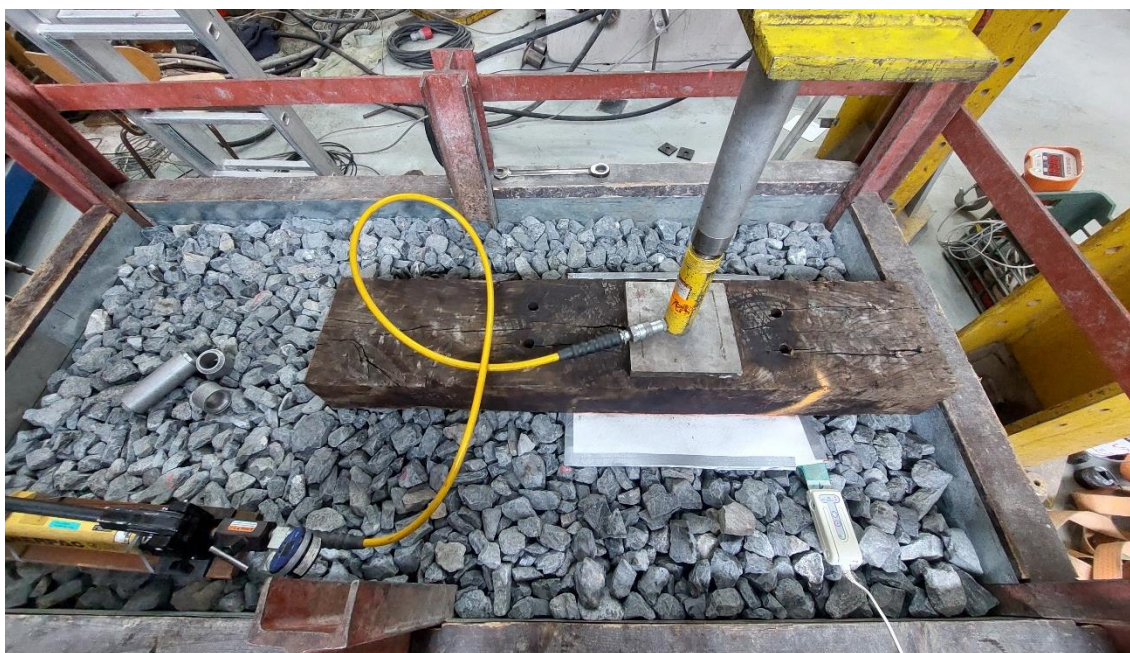
Metoda měření kontaktní plochy a kontaktního napětí mezi ložnou plochou pražce a kolejovým ložem tlakovými podložkami má mnoho výhod i nevýhod, které jsou shrnuty v samostatné kapitole této práce.

5 Laboratorní měření

Cílem provedených laboratorních měření bylo získání praktických zkušeností s měřením kontaktní plochy mezi ložnou plochou pražce a kolejovým ložem inovativní metodou využívající tlakové senzory Tekscan. Dále na základě poznatků z průběhu zkoušek a vyhodnocení dat zhodnotit vhodnost metody pro mapování napětí vznikajícího mezi pražcem a kolejovým ložem.

Měření probíhalo v laboratoři Experimentálního centra Fakulty stavební ČVUT, která je umístěna v kryté hale s dostatečně stálými teplotními a vlhkostními podmínkami. Všechna měření proběhla v co nejmenších časových rozestupech, aby byly po celou dobu zajištěny jednotné podmínky měření.

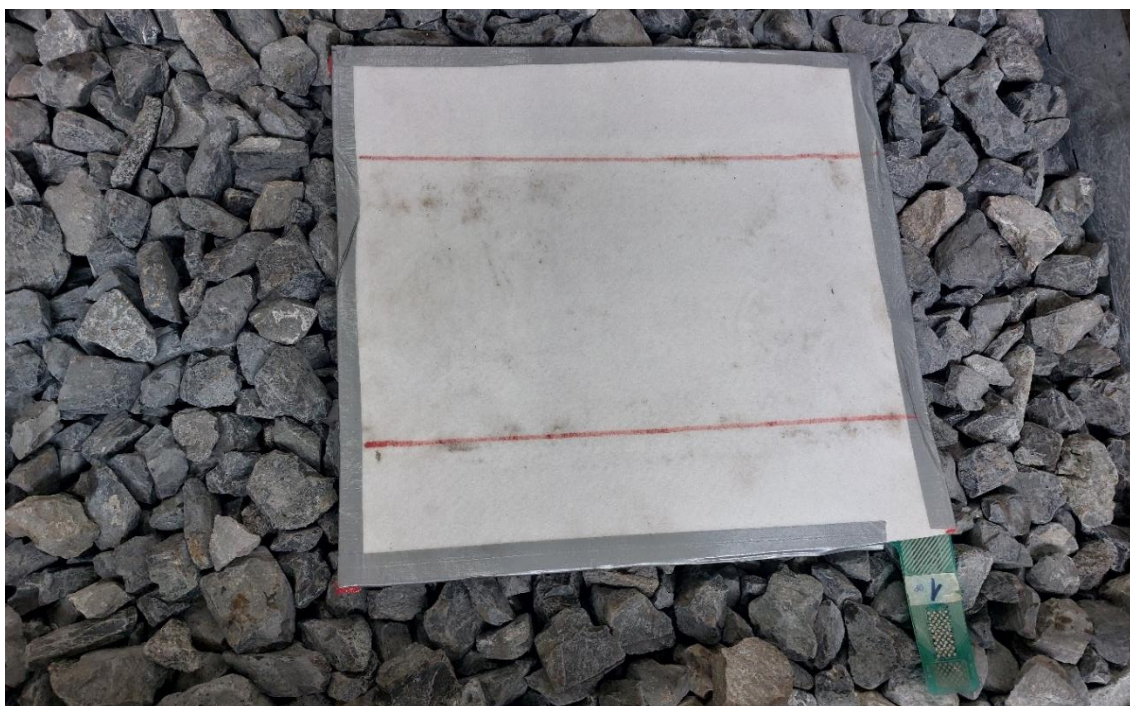
Měření bylo prováděno ve speciálním zkušebním boxu naplněném kamenivem (viz Obr. 19). Pro měření byly vybrány tři pražce z různých materiálů a tři různé vzorky kameniva. Pro každou kombinaci pražce a kameniva byla provedena měření ve dvou polohách, tedy ve dvou různých prostorových umístěních pražce na kamenivo. V každé poloze proběhlo pro danou kombinaci pražce a kameniva měření dvakrát. Zatěžování každého připraveného modelu bylo prováděno pomocí hydraulického lisu postupným zatěžováním.



Obr. 19: Typická sestava zkušebního modelu [Zdroj: Autor]

5.1 Měření s geometrickou štěrkovou deskou

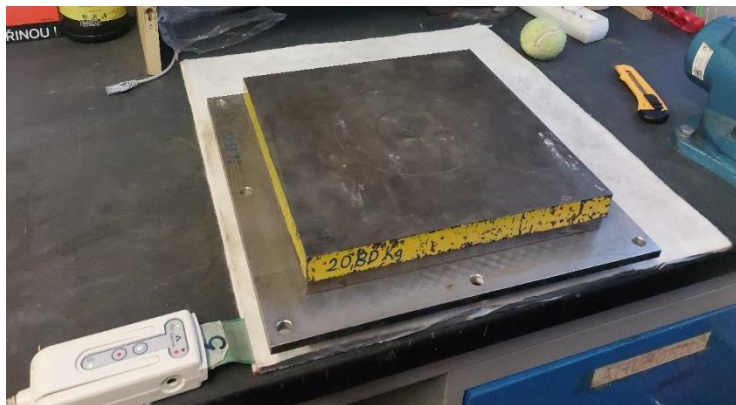
Před samotným vlastním měřením byla provedena přípravná série měření s tlakovou podložkou číslo 1. Z důvodu rizika poškození sensorů byla podložka obalena jednou vrstvou 2 mm tlusté netkané geotextilie z každé strany. I přes toto opatření došlo během přípravných měření k problému se čtením několika řad sensorů tlakové podložky číslo 1. Z tohoto důvodu bylo nutné pro další měření použít jinou tlakovou podložku, konkrétně podložku číslo 3. Pro snížení rizika poškození sensorů byla zvýšena ochrana podložky, a to zvýšením počtu vrstev geotextilie. Tlaková podložka tedy byla na horní i dolní straně opatřena dvěma vrstvami 2 mm tlusté netkané geotextilie (viz Obr. 20).



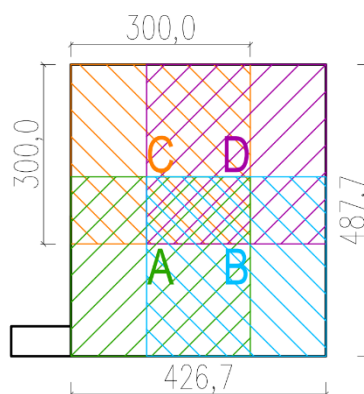
Obr. 20: Tlaková podložka Tekscan opatřená ochrannou vrstvou z geotextilie [Zdroj: Autor]

Vzhledem k podezření na zkreslení výsledků měření při použití tlakové podložky s ochrannou vrstvou byla provedena série měření pro objasnění vlivu celkové tloušťky všech ochranných vrstev na výsledky měření. Toto měření proběhlo na rovném povrchu, na který byla umístěna tlaková podložka a na ni byla umístěna geometrická štěrková deska SK-899 spodní plochou navrch (viz Obr. 21). Jelikož je půdorysná plocha geometrické štěrkové desky (300 x 300 mm) menší než půdorysná plocha tlakové podložky

(487,7 x 426,7 mm), bylo měření prováděno ve 4 různých polohách: poloha A, B, C a D (viz schéma na Obr. 22).



Obr. 21: Zatížení tlakové podložky silou 599 N v poloze A [Zdroj: Autor]



Obr. 22: Schéma poloh A, B, C a D [Zdroj: Autor]

Měření proběhlo pro podložku obalenou celkem čtyřmi, třemi a dvěma vrstvami geotextilie. Obalení čtyřmi vrstvami znamenalo dvě ochranné vrstvy na spodní i horní ploše podložky. Tři ochranné vrstvy vznikly odebráním jedné vrstvy z horní plochy podložky, a poté byla odebrána také jedna vrstva ze spodní plochy podložky a bylo provedeno měření s celkem dvěma vrstvami ochranné geotextilie.

V každé poloze probíhalo zatěžování ve třech krocích pomocí tří různých ocelových desek (viz Obr. 21). Nejprve byla tlaková podložka zatížena všemi třemi deskami, a poté byly desky postupně odebírány. K zatěžování byla použita vlastní váha geometrické šterkové desky (26,85 kg) a dvě ocelové desky (13,45 kg a 20,80 kg). Postupně tedy docházelo k zatížení tlakové podložky různými silami ve třech zatěžovacích stavech:

- ZS1: 599 N,
- ZS2: 395 N,
- ZS3: 263 N.

5.2 Popis pražců

Pro laboratorní měření byly vybrány 3 různé pražce – dřevěný, plastový a betonový (viz Obr. 23). Vzhledem k velikosti zkušebního boxu a ulehčení manipulace nebyly použity pražce ve své původní délce, ale byly zkráceny řezem

ve své prostřední části. Pro manipulaci s nimi byly použity pražcové kleště a halový jeřáb.

Jako dřevěný pražec byl použit dubový výhybkový pražec s rozměry po oříznutí 26,5 x 15 x 130 cm a o váze 40,0 kg. Na pražci bylo možné nalézt pražcové hřeby, podle kterých lze upřesnit, že se jedná o pražec SŽDC 1 vyrobený v Soběslavi v roce 2011. Vzhledem k zabarvení, otlačení i rozevření trhlin se jednalo o pražec již značně opotřebovaný.

Rozměry plastového pražce po zkrácení byly 24,5 x 15x 129,5 cm a váha 57,5 kg.

Betonovým pražcem vybraným pro měření byl pražec typu B91S/1. Délka pražce po zkrácení byla 130 cm a váha 165,0 kg. Ostatní rozměry odpovídaly typu pražce.



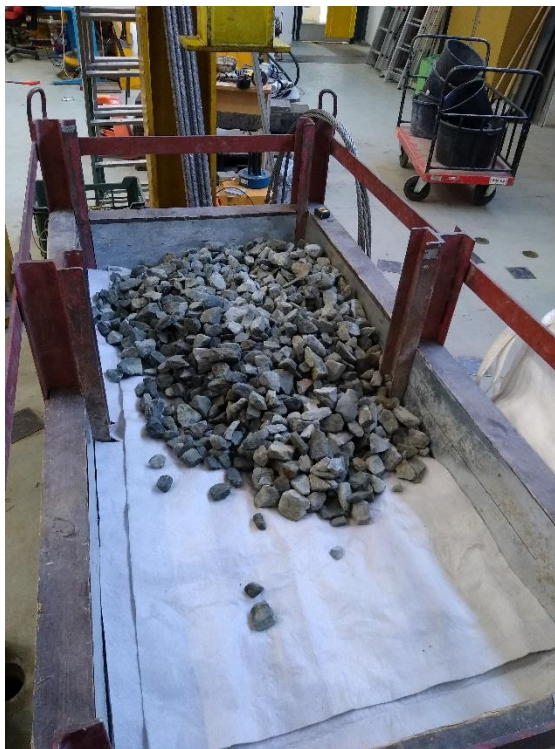
Obr. 23: Použité vzorky pražců (zleva: betonový, plastový, dřevěný) [Zdroj: Autor]

5.3 Popis kameniva

K dispozici byly pro měření 3 typy kameniva: nové čisté s ostrými zrny, čisté se zaoblenými zrny a kamenivo znečištěné se zaoblenými zrny. Zkušební box byl nejdříve vyplněn novým čistým kamenivem s ostrými zrny v tloušťce 17 cm po celé ploše boxu. Na toto kamenivo byly položeny dvě vrstvy 2 mm tlusté netkané geotextilie a na ni byly ukládány vzorky kameniva dle aktuálního modelu vždy v tloušťce 13 cm (viz Obr. 24 a Obr. 25). Celková tloušťka kameniva byla tedy pro všechny připravované modely 30 cm. Vlastnosti jednotlivých vzorků kameniva byly stanoveny v akreditované laboratoři (viz Příloha 1) vždy z části vzorku kameniva o hmotnosti 30 kg. Dle dodaného protokolu byly všechny vzorky klasifikovány jako kategorie zrnitosti D – třída B1 (recyklované kamenivo). Na připravených modelech byla vždy před uložením prvního pražce provedena zkouška lehkou dynamickou deskou. Pro každý model byla tato zkouška provedena na 3 různých místech (v oblasti vlevo, uprostřed a vpravo) a následně byl stanoven průměr těchto hodnot.



Obr. 24: Uložení geotextilie na první vrstvu štěrku [Zdroj: Autor]



Obr. 25: Ukládání ostrohranného kameniva na geotextilii [Zdroj: Autor]

Prvním vzorkem kameniva bylo nové ostrohranné přírodní kamenivo frakce 32/63. Kamenivo bylo suché, téměř nové a ostrohranné se zaobleností zrn 17 %. Objemová hmotnost byla stanovena jako 1736 kg/m³. Použité množství tohoto kameniva do vrstvy pod geotextilii bylo 619 kg a do vrstvy na geotextilii bylo použito dalších 434 kg. Průměrný rázový modul deformace zhutněného kameniva zjištěný lehkou dynamickou deskou byl 21,7 MPa.

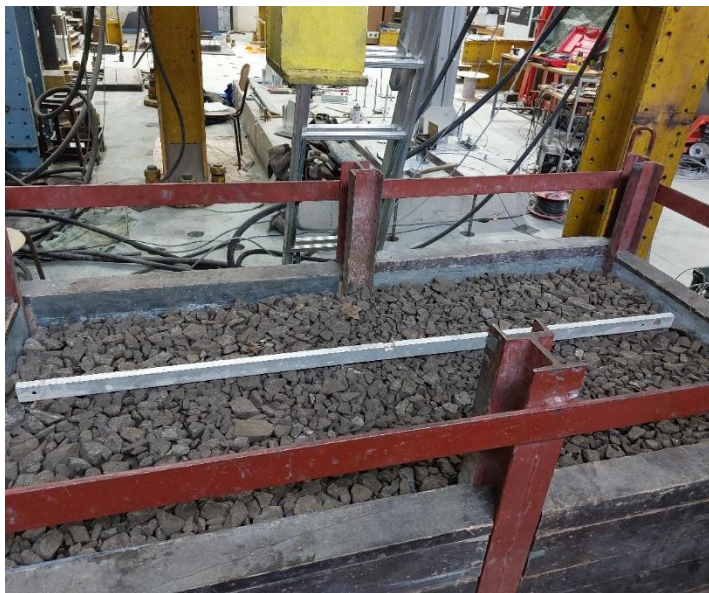
Druhý vzorek kameniva bylo přírodní kamenivo se zaoblenými zrny frakce 32/63. Kamenivo bylo suché a se zaobleností zrn 25 %. Objemová hmotnost byla stanovena jako 2019 kg/m³. Pro přípravu modelu bylo použito 539,5 kg tohoto kameniva. Průměrný rázový modul deformace zhutněného kameniva zjištěný lehkou dynamickou deskou byl 21,5 MPa.

Třetím vzorkem kameniva bylo znečištěné přírodní kamenivo frakce 32/63. Kamenivo bylo suché a se zaobleností zrn 32 %. Součinitel znečištění tohoto kameniva byl 29 %. Objemová hmotnost byla stanovena jako 2103 kg/m³. Pro přípravu modelu bylo použito 562 kg tohoto kameniva. Průměrný rázový modul deformace zhutněného kameniva zjištěný lehkou dynamickou deskou byl 18,3 MPa.

5.4 Postup přípravy modelu

Do speciálního zkušebního boxu o vnitřních rozměrech 99 x 210 cm bylo vloženo 619 kg prvního vzorku kameniva a na to byly vloženy 2 vrstvy 2 mm tlusté netkané geotextilie. Na takto připravený podklad byl uložen vzorek kameniva odpovídající sérii měření. Tento postup skladby modelu kolejového lože byl zvolen z důvodu urychlení přípravy dalších vzorků kameniva. Vložené kamenivo bylo hutněno 15 minut, a poté byla provedena kontrola rovinatosti pomocí latě s vodováhou (viz Obr. 26). Pokud to bylo nutné, byl povrch upraven krátkodobým dohutněním. Na takto připraveném modelu kolejového lože byla provedena zkouška LDD (lehkou dynamickou deskou, viz Obr. 27) pro každý vzorek ve třech místech: v levé (poloha 1), střední a pravé (poloha 2) části zkušebního boxu. Na takto upravený povrch byl uložen vzorek pražce do daného umístění (poloha 1 či poloha 2). Na pražec bylo ručně zatlačeno v několika místech, aby se ověřilo

jeho rovnoměrné podepření zrny kameniva. V případě, že takto uložený pražec vykazoval nestabilitu, byl povrch upraven.



Obr. 26: Kontrola rovinnosti vzorku kameniva (kamenivo zaoblené znečištěné) připraveného ve zkušební boxu [Zdroj: Autor]
Obr. 27: Zkouška lehkou dynamickou deskou [Zdroj: Autor]

5.5 Zatěžovací stavy

Zatěžování modelu pro měření kontaktní plochy a kontaktního napětí mezi ložnou plochou vzorku pražce a vzorkem kameniva bylo prováděno pomocí hydraulického lisu složeného z hydraulického ručního čerpadla ENERPAC P392 a hydraulického válce ENERPAC RC106. Displej hydraulického čerpadla zobrazuje vnášené zatížení v barech. Pro lepší představu bylo toto zatížení přepočítáno dle kalibračního listu a plochy pístu válce na sílu v Newtonech (viz hodnoty v závorkách). Každý zatěžovací cyklus se skládal ze 6ti zatěžovacích stavů:

- ZS1: vlastní tíha pražce + tlak 0 bar (0 N),
- ZS2: vlastní tíha pražce + tlak 12 bar (1 701 N),
- ZS3: vlastní tíha pražce + tlak 24 bar (3 403 N),
- ZS4: vlastní tíha pražce + tlak 36 bar (5 104 N),
- ZS5: vlastní tíha pražce + tlak 48 bar (6 805 N),
- ZS6: vlastní tíha pražce + tlak 60 bar (8 522 N).

Tyto zatěžovací stavy byly použity pro všechny kombinace vzorků pražců a kameniva. Maximální velikost zatížení byla zvolena na základě předchozího zkušebního měření s tlakovou podložkou číslo 1 a to tak, aby byla minimalizována pravděpodobnost přetížení senzorů. Zatížení pro ostatní zatěžovací stavy bylo stanoveno tak, aby docházelo k postupnému zatěžování vždy se stejným krokem, a to po 12 bar. Pro každou kombinaci vzorku pražce a kameniva byl celý zatěžovací cyklus proveden dvakrát bezprostředně po sobě. Naměřená data z každého zatěžovacího cyklu byla ukládána jako samostatný soubor. Každý tento soubor se skládal ze 6ti záznamů, kdy každý záznam odpovídal jednomu zatěžovacímu stavu a zachycoval hodnoty napětí v každém senzoru tlakové podložky.

5.6 Postup měření

Ihned po přípravě a kontrole zkušebního modelu bylo přistoupeno k měření. Připravený model byl zatěžován pomocí hydraulického lisu tlakem 100 bar (10 000 kPa). Pro rovnoměrnější zatěžování pražce byla mezi hydraulický lis a pražec umístěna ocelová roznášecí deska o rozměrech 22 x 22 x 3 cm. Toto zatěžování bylo provedeno vždy jen pro první vzorek pražce v dané poloze. Následně byl pražec opatrně nadzdvihnut a byla pod něj vložena tlaková podložka opatřená ochrannou vrstvou. Během této manipulace nesmělo dojít k manipulaci se zrny kameniva.

Vzhledem k rozdílným rozměrům pražce a tlakové podložky nebylo možné provádět měření po celé půdorysné ploše pražce, ale jen na její části. Umístění podložky bylo vždy voleno tak, aby pražec byl uprostřed podložky a aby tlak vnášený do modelu hydraulickým lisem byl také uprostřed podložky. Na ochrannou vrstvu podložky byly fixem vyneseny pomocné čáry, díky kterým bylo zaručeno uložení pražce vždy ve stejném místě (viz Obr. 28). Aby bylo možné se podle čar orientovat při ukládání jakéhokoliv pražce, byly tyto orientační značky vyrobeny obtažením polohy nejširšího pražce, tedy toho betonového. Fixem bylo vyznačeno i umístění tlakové podložky na kamenivu, aby i po výměně pražců bylo možné umístit podložku na stejné místo a výsledky pak

bylo možné porovnávat. Na kamenivo byly vždy vyneseny značky označující všechny 4 rohy tlakové podložky.



Obr. 28: Označení místa pro uložení tlakové podložky a pro uložení pražce [Zdroj: Autor]

Až po osazení podložky byl vložen její konektor do čtecí hlavy. Ihned po zapojení tlakové podložky a načtení kalibračního souboru bylo možné pomocí softwaru I-Scan sledovat aktuální zatížení působící na tlakovou podložku (viz Obr. 29). V této sestavě byla provedena vždy měření 2 zatěžovacích cyklů ihned po sobě (měření 1 a měření 2). Poté byla odpojena čtecí hlava, byl vyměněn vzorek pražce a provedeno měření dalších 2 zatěžovacích cyklů. Po provedení měření s posledním vzorkem pražce byl model přestavěn do polohy 2 (viz Obr. 30). Po vložení pražce do správného místa byl pražec opět zatížen tlakem 100 bar, a teprve poté bylo prováděno měření s tlakovou podložkou.

Po provedení měření v obou polohách uložení se všemi pražci byla vyměněna vrstva vzorku kameniva nad geotextilií. Měření bylo provedeno obdobně jako pro předchozí vzorek. Všechny série měření byly prováděny s tlakovou podložkou č. 3. Některé kombinace vzorku pražce a kameniva byly ihned

po změření tlakovou podložkou č. 3 změřeny také tlakovou podložkou č. 1 pro případ pozdější nutnosti ověření správnosti měření.

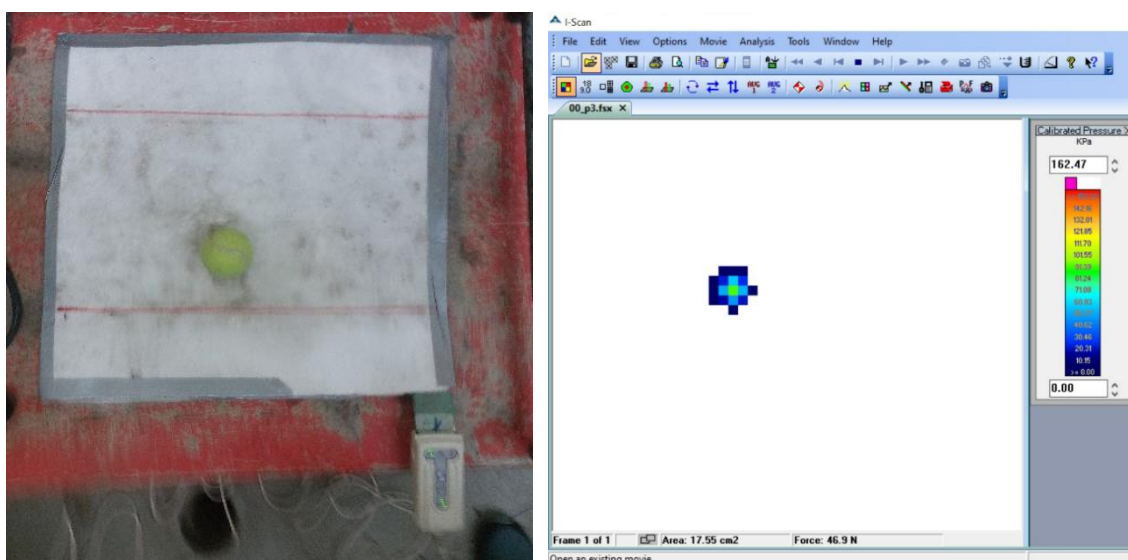


Obr. 29: Průběh měření: sestavený model a zapojení kompletní měřicí soustavy při uložení pražce v poloze 1, pohled zepředu [Zdroj: Autor]



Obr. 30: Průběh měření v poloze 2, pražec plastový na kamenivu ostrohranném, pohled shora [Zdroj: Autor]

Během měření bylo nutné ověřovat funkčnost všech sloupců a řádků senzorů tlakové podložky. Proto byl vždy před zahájením měření, při výměně pražců a po ukončení série měření proveden test zatížení podložky míčkem (viz Obr. 31). Při pohybu míčku po tlakové podložce bylo sledováno aktuální zatížení podložky v softwaru (viz Obr. 32). Nejdříve byly zkontrolovány všechny sloupce, a poté všechny řádky. Eventuálně bylo možné přejet podložku míčkem diagonálně, což byla rychlejší a stejně přesná forma kontroly funkčnosti senzorů. Případné poškození senzorů by tímto způsobem bylo možné okamžitě odhalit.



Obr. 31: Test zatížení míčkem ve skutečnosti [Zdroj: Autor] Obr. 32: Test zatížení míčkem v softwaru I-Scan [Zdroj: Autor]

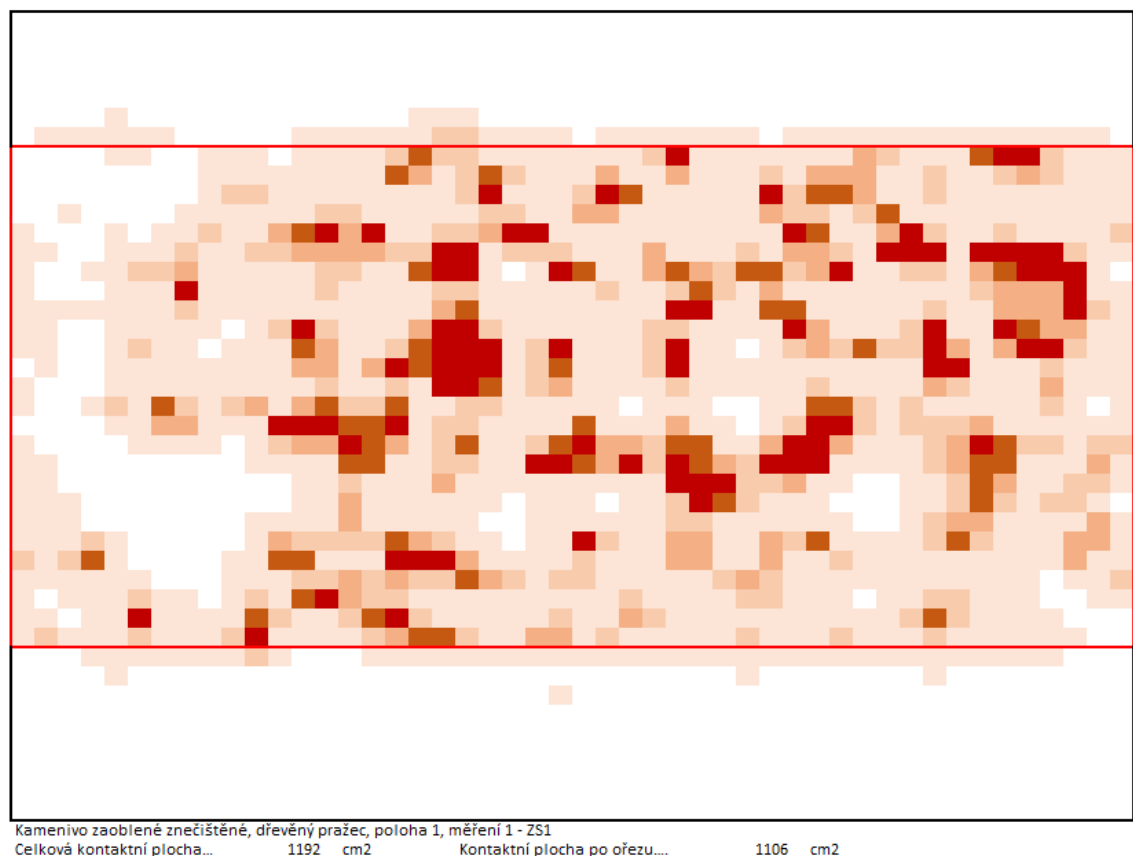
5.7 Vyhodnocení výsledků měření

Naměřená data bylo možné vyhodnocovat přímo v softwaru *I-Scan* (verze 7.60), ale pro širší možnosti vyhodnocení bylo výhodnější výsledky zpracovat v tabulkovém editoru. Pro toto zpracování dat byl vybrán software Microsoft Excel. Vyhodnocení v softwaru bylo však užitečné pro ověření správnosti zpracovaných výsledků.

Důležitým krokem při zpracování výsledků byl ořez dat. Zrna umístěna pod hranou pražce působila na podložku i mimo půdorysnou plochu pražce a zapříčinila tak nenulový záznam v místech, kde pražec ve skutečnosti na zrna zatížení nepřenáší. Proto musely být výsledky ořezány podle skutečné plochy

pražce probíhající přes tlakovou podložku. Při tomto ořezu byl brán v potaz jednak rozměr šířky pražce a také rozmístění nejvíce zatížených ploch.

Při ořezávání dat bylo nutné držet se několika zásad. Ořez probíhal po řádcích a nemohlo dojít k započítání hodnot jen některých senzorů v jednom řádku. Počet započítaných řádků vynásobený roztečí řádků (1,016 cm) musel být stejný nebo větší než šířka pražce. Pro všech 6 zatěžovacích stavů jednoho zatěžovacího cyklu musel být ořez dat stejný. Pro každý zatěžovací cyklus musel být ořez stanoven individuálně. Pro snadnější orientaci při ořezávání dat v Excelu byla data zpracována pomocí příkazu *Podmíněné formátování*. Nebylo tedy v tomto kroku nutné sledovat přesné hodnoty napětí jednotlivých senzorů, ale bylo možné pracovat jen s barevně zvýrazněnými nenulovými hodnotami (viz Obr. 33). Finální ořez byl vyznačen také do snímků přímo v softwaru I-Scan. Takto upravené snímky ZS1, ZS3 a ZS6 všech měření jsou součástí Přílohy 2.



Obr. 33: Příklad oříznutí dat v softwaru Microsoft Excel [Zdroj: Autor]

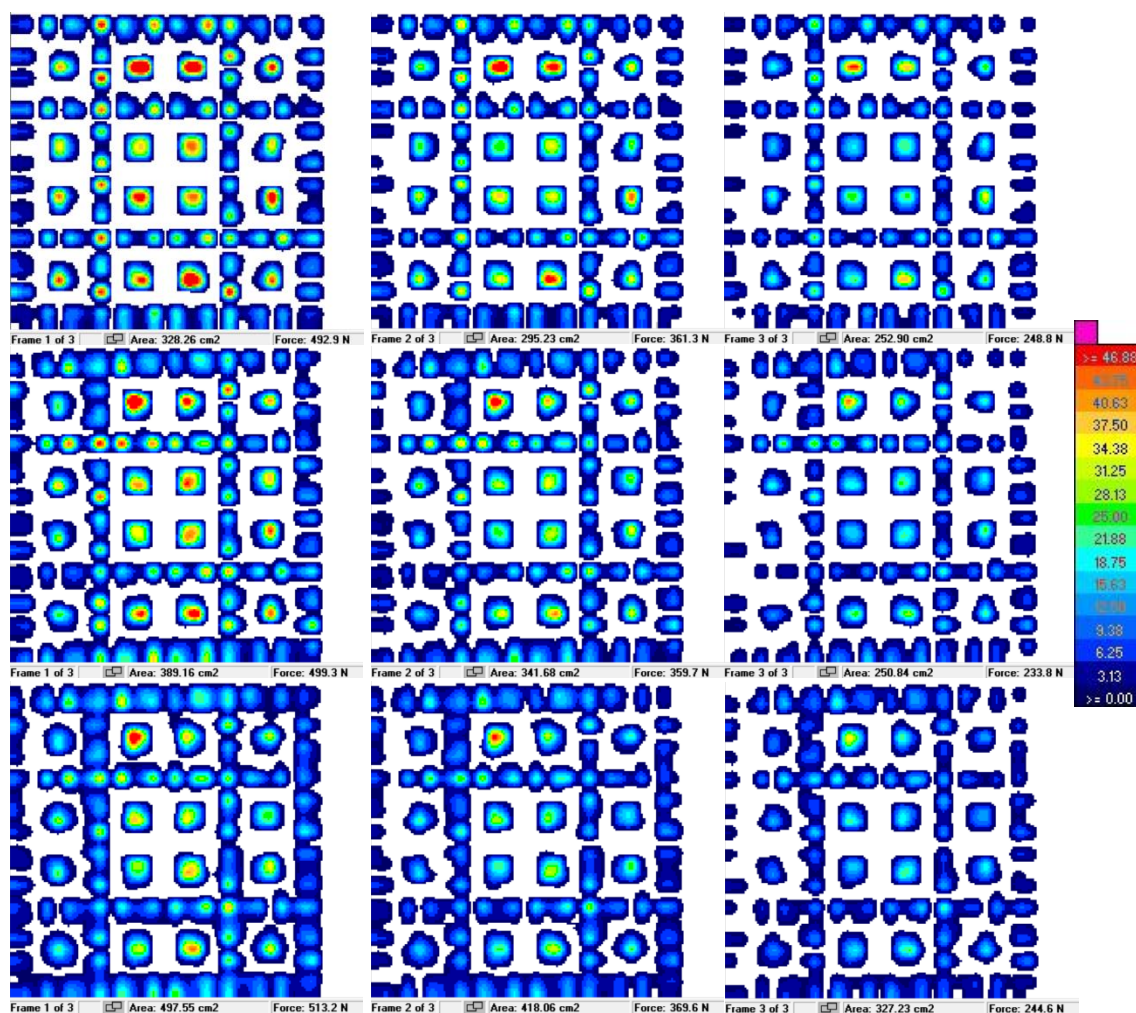
Vzhledem k různému počtu započítaných řádků jednotlivých měření bylo nutné vyřešit problematiku výpočtu kontaktní plochy v procentech tak, aby bylo možné výsledky porovnávat s co nejmenším zkreslením. Jako kontaktní plocha v cm^2 je v této práci uvažován počet všech senzorů s nenulovou hodnotou kontaktního napětí v oblasti započítaných řádků po ořezu přenásobený plochou jednoho senzoru ($1,03226 \text{ cm}^2$). Z této hodnoty je následně vypočítána velikost kontaktní plochy v procentech, a to vydělením plochou všech započítaných senzorů. Ke stejnému výsledku lze také dospět postupem, kdy se procentuální kontaktní plocha stanoví jako poměr počtu senzorů uvnitř oříznuté plochy s nenulovým kontaktním napětím ku celkovému počtu senzorů uvnitř oříznuté plochy. S takto zpracovanými daty bylo možné dále pracovat a porovnávat mezi sebou výsledky různých měření.

5.7.1 Vyhodnocení měření s geometrickou štěrkovou deskou

Vyhodnocení výsledků z měření s geometrickou štěrkovou deskou bylo zásadní pro zjištění vlivu počtu ochranných vrstev tlakové podložky na výsledky měření. Již při pohledu na grafické znázornění naměřených dat v softwaru byl zřejmý rozdíl mezi jednotlivými měřeními s různými tloušťkami geotextilie i mezi jednotlivými zatěžovacími stavy (viz měření v poloze B na Obr. 34). Pro vyhodnocení nebylo potřeba tato data ořezávat a mohly být porovnávány hodnoty kontaktní plochy v absolutních jednotkách.

Nejprve byly stanoveny kontaktní plochy jednotlivých zatěžovacích stavů v rámci jednotlivých zatěžovacích poloh. Následně byl z těchto 4 různých poloh stanoven průměr (viz Graf 1). Rozptyl hodnot byl ověřen výpočtem směrodatné odchylky a variačním koeficientem (viz Příloha 3). Nejvyšší hodnota variačního koeficientu byla 13,5% a byla shledána jako vyhovující. Proto bylo průměrné hodnoty možné využít k vyhodnocení. Následně tedy bylo možné vyjádřit pomocí Grafu 2 porovnání velikosti kontaktní plochy v závislosti na počtu ochranných vrstev. Z grafu je patrné, že s vyšší celkovou tloušťkou ochranných vrstev znatelně narůstá velikost kontaktní plochy. Zvětšení kontaktní plochy má za následek i snížení kontaktního napětí, což lze deklarovat pomocí Grafu 3, z něhož je

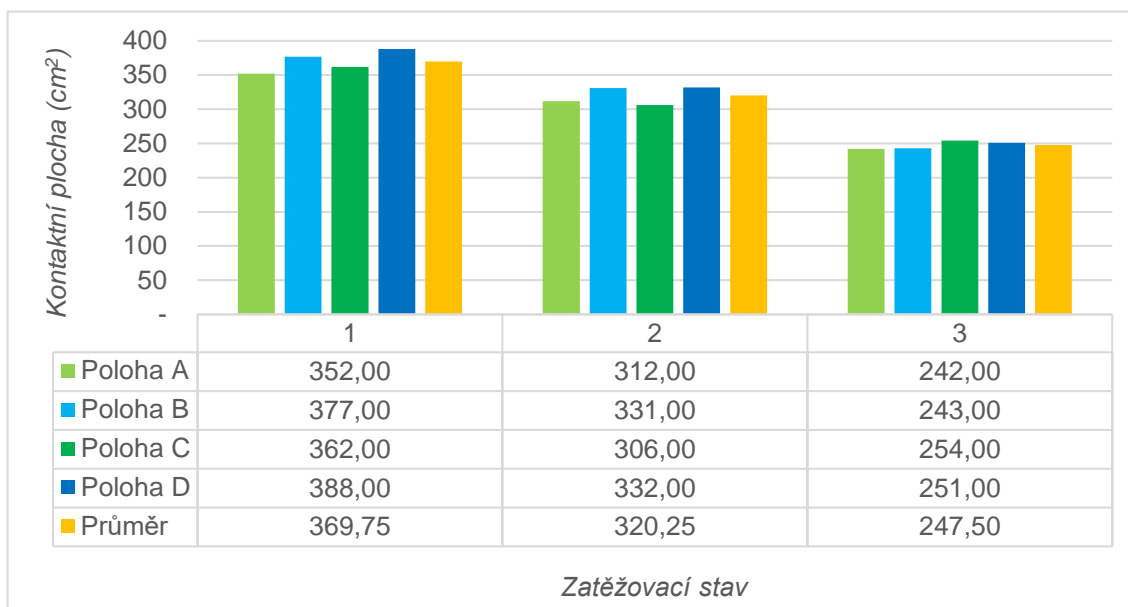
patrné, že s vyšším počtem ochranných vrstev tlakové podložky dochází ke snižování hodnoty maximálního naměřeného kontaktního napětí.



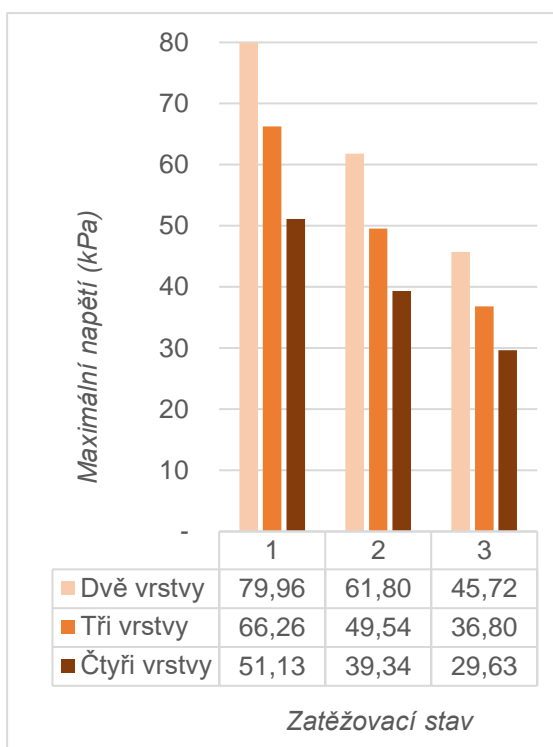
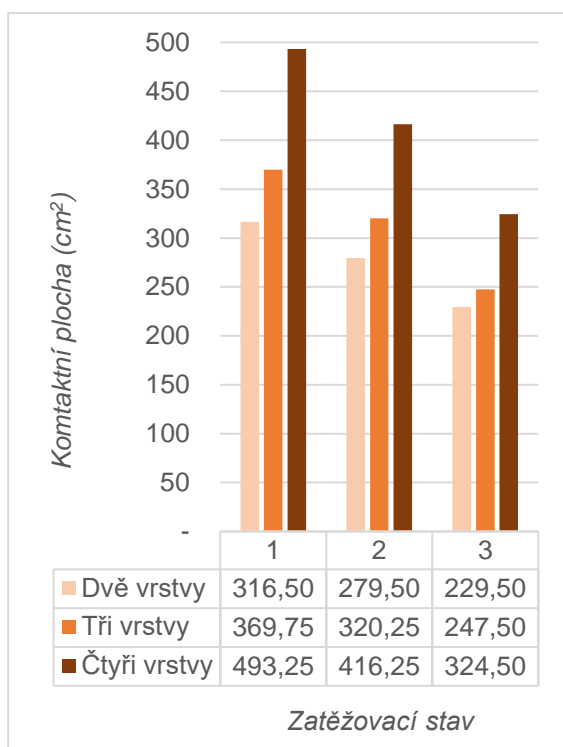
Obr. 34: Grafické porovnání kontaktní plochy a kontaktního napětí změřené tlakovou podložkou v poloze B se 2 (nahore), 3 (uprostřed) a 4 (dole) vrstvami ochranné geotextilie v ZS1 (vlevo), ZS2 (uprostřed) a ZS3 (vpravo) [Zdroj: Autor]

Závislost velikosti kontaktní plochy na celkové tloušťce ochranných vrstev nelze vyjádřit jednoduchým lineárním koeficientem. Lze ji však vyjádřit např. pomocí polynomické funkce 2. stupně – viz Graf 4. Tyto funkce byly sestaveny pomocí regresní funkce v softwaru Microsoft Excel a jejich správnost byla ověřena ručním výpočtem. Pro každý zatěžovací stav je ale funkce jiná, a tak není možné stanovit závislost velikosti kontaktní plochy na počtu ochranných vrstev jedinou funkcí.

Důsledkem je, že se při interpretaci výsledků měření s takto upravenou tlakovou podložkou Tekscan musí uvážit i jistá míra zkreslení výsledků, kterou ale nelze pomocí jednoduchého matematického postupu odstranit.

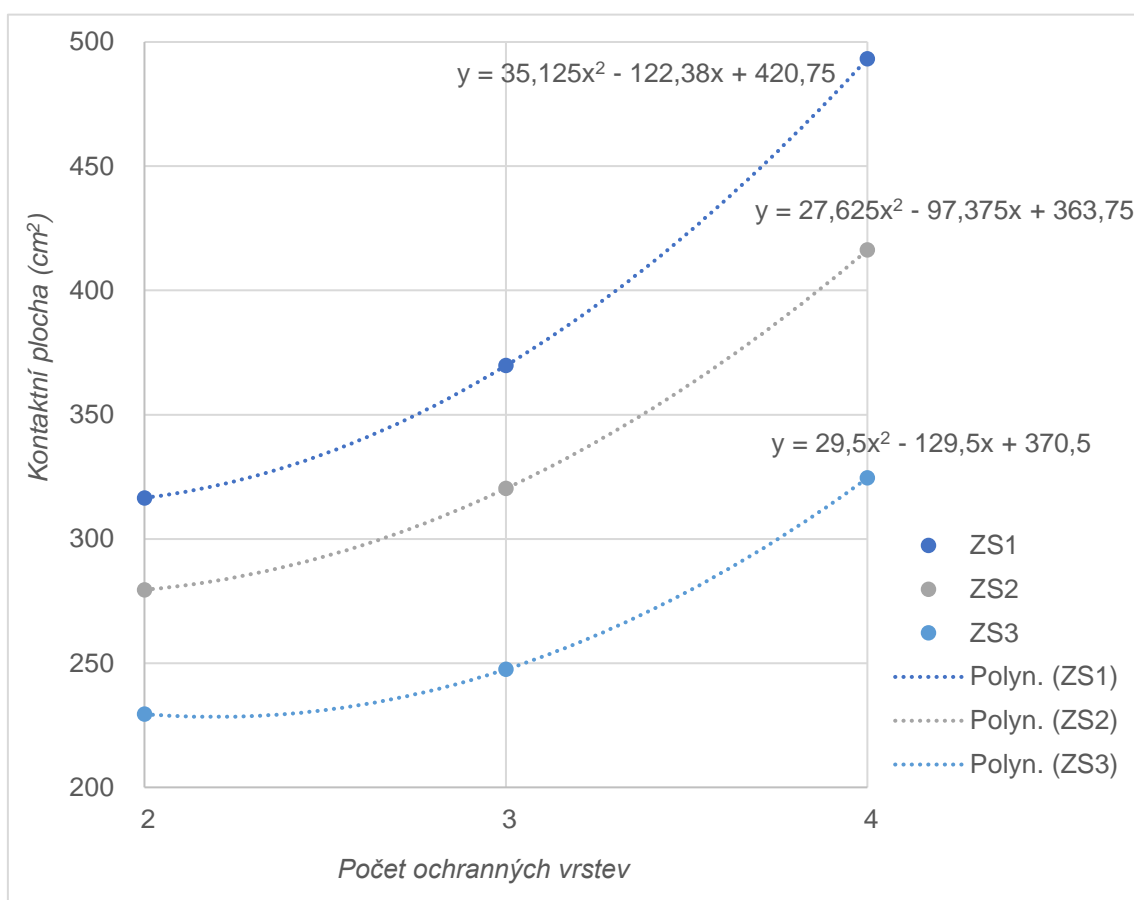


Graf 1: Znárodnění průměrné kontaktní plochy pro podložku se třemi ochrannými vrstvami [Zdroj: Autor]



Graf 2: Porovnání velikosti kontaktní plochy v závislosti na počtu ochranných vrstev [Zdroj: Autor]

Graf 3: Porovnání maximálního napětí v závislosti na počtu ochranných vrstev [Zdroj: Autor]



Graf 4: Zobrazení závislosti velikosti kontaktní plochy na počtu ochranných vrstev podle zatěžovacího stavu [Zdroj: Autor]

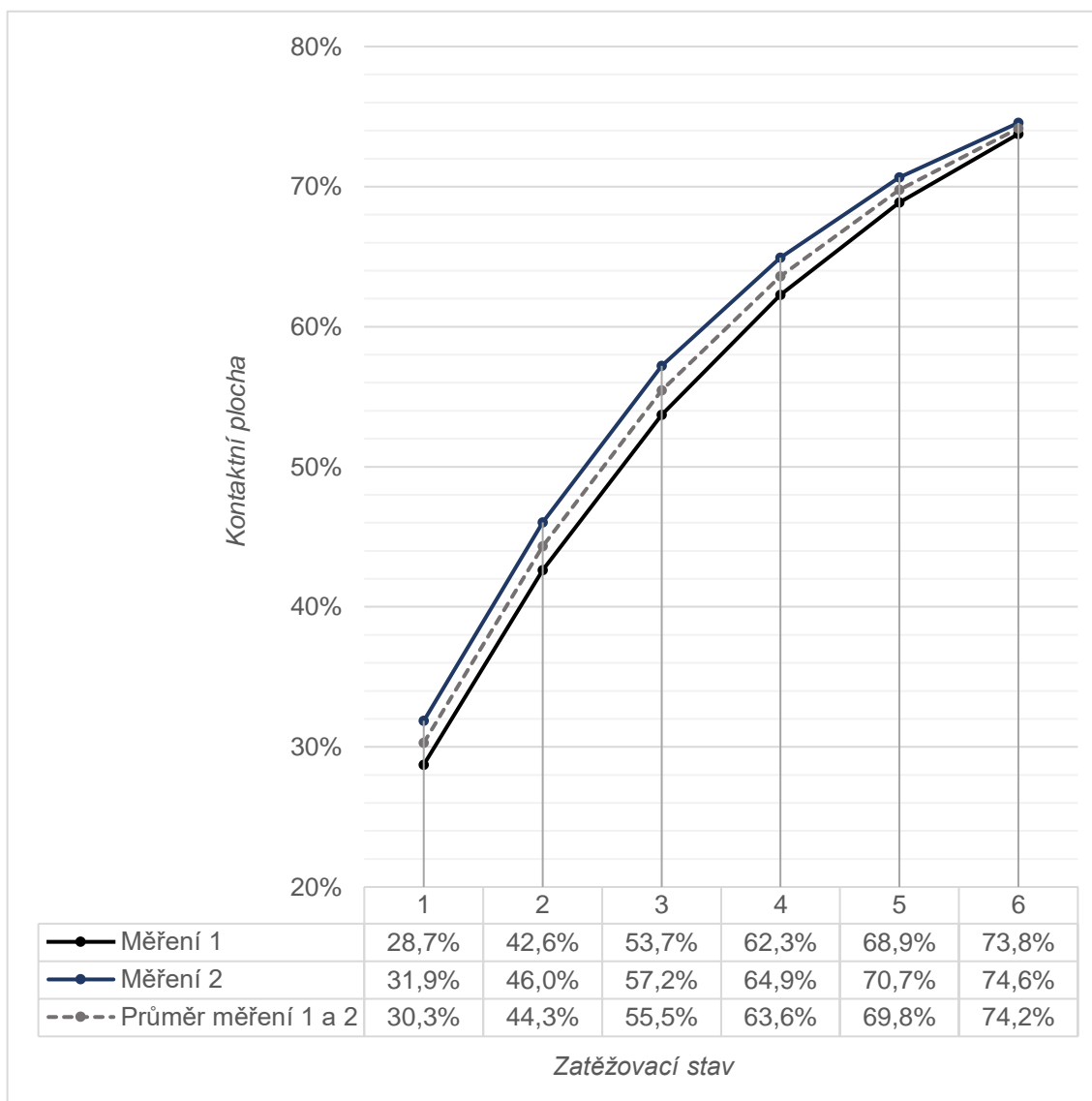
5.7.2 Porovnání měření 1 a měření 2

Po ořezu naměřených dat bylo možné přistoupit k jejich vyhodnocení. Nejprve byly porovnány hodnoty velikosti kontaktní plochy pro sobě si odpovídající první a druhá měření. Pro tyto hodnoty byly vypočteny směrodatné odchylky a variační koeficienty. Výsledné hodnoty velikostí kontaktních ploch všech zatěžovacích stavů všech měření s tlakovou podložkou č. 3 spolu s vypočtenými průměrnými hodnotami a tomu odpovídajícími směrodatnými odchylkami a variačními koeficienty jsou obsaženy v Příloze 3.

Jen v jednom případě byla zaznamenána příliš vysoká hodnota variačního koeficientu pro ZS1 a to 25,8 % pro měření v poloze 2 s dřevěným pražcem a kamenivem znečištěným. Pro tuto polohu a kombinaci materiálů bylo provedeno i měření tlakovou podložkou číslo 1. Díky tomu bylo možné vyloučit chybu ve zpracování dat či v manipulaci s modelem. Také byla vyloučena

možnost, že by ke znehodnocení dat došlo v důsledku změny chování ochranného obalu, jelikož se nejednalo o první ani poslední měření toho dne a výsledky ostatních měření vykazovaly standardní hodnoty variačního koeficientu. Protože ZS2 až ZS6 nevykazovaly podobné extrémní hodnoty, byl záznam tohoto měření v podkladech pro vyhodnocení ponechán.

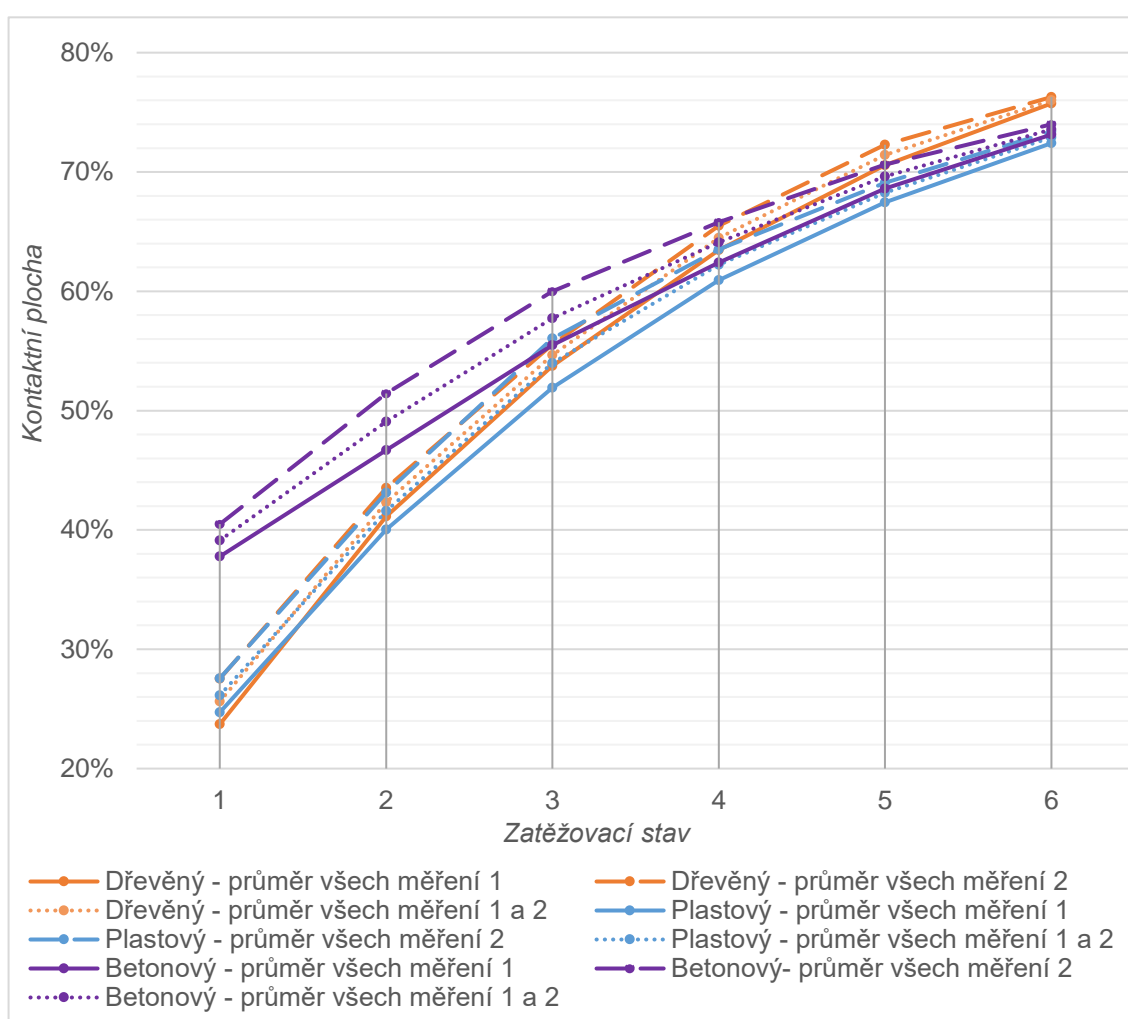
Při porovnání průměrů všech měření 1 a všech měření 2 je možné vyčíst, že předtížení prvním měřením má vliv na měření druhé (viz Graf 5). Tento rozdíl je nejznatelnější v ZS1. S rostoucím zatížením se však tento rozdíl stává téměř zanedbatelným.



Graf 5: Porovnání měření 1 a měření 2 [Zdroj: Autor]

5.7.3 Porovnání podle typu pražce

Na výsledné hodnoty velikosti kontaktní plochy mezi ložnou plochou pražce a kamenivem kolejového lože se lze také podívat z pohledu jednotlivých vzorků pražců – viz Graf 6. Pokud se zprůměrují hodnoty z různých poloh a různých kameniv, lze porovnat vliv jednotlivých typů pražců na velikost kontaktní plochy. Například betonový pražec má počáteční kontaktní plochu největší, oproti ostatním dvěma typům zhruba 1,6násobnou. Ale poté s větším nárůstem zatížení hodnota dále stoupá pomaleji než u pražce dřevěného či plastového.

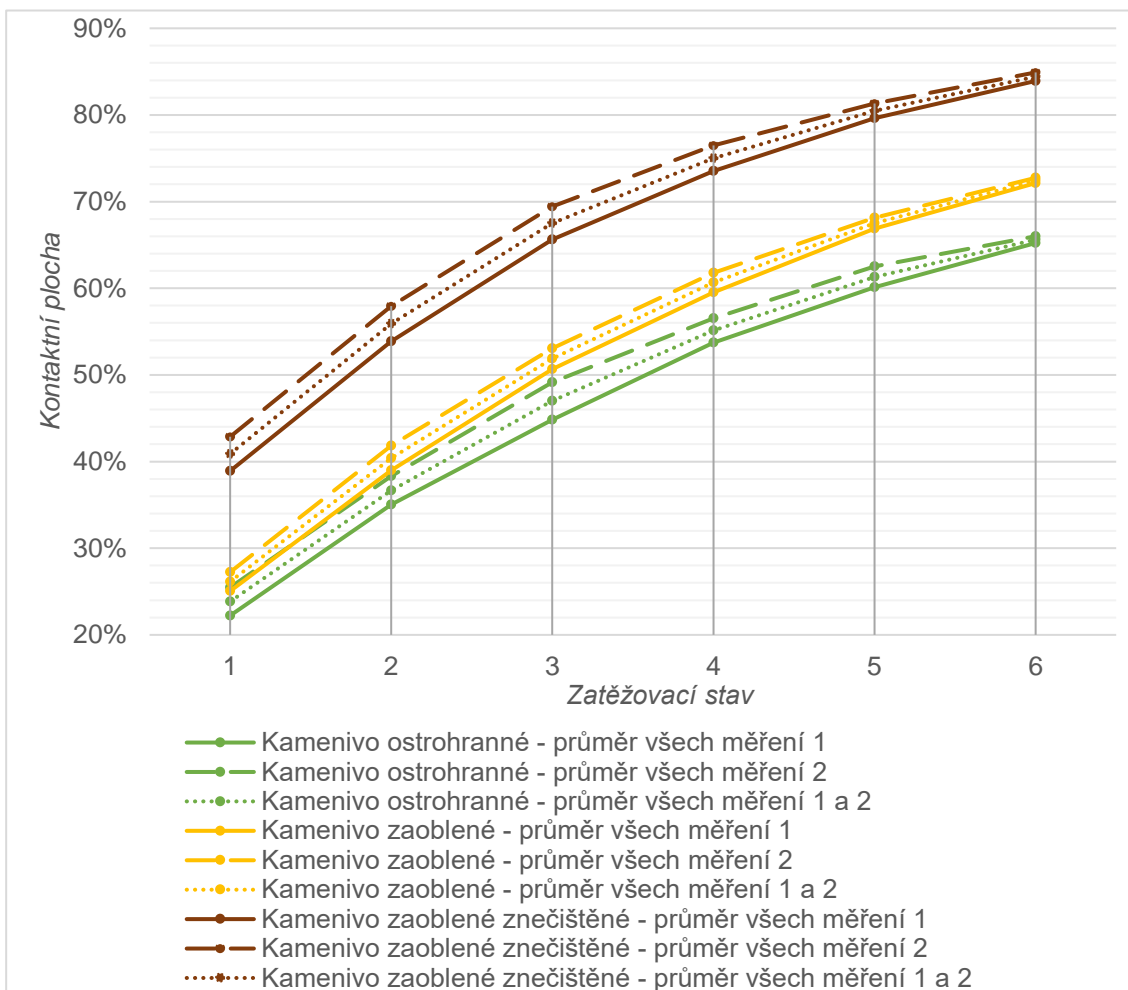


Graf 6: Porovnání kontaktní plochy podle typu pražce [Zdroj: Autor]

5.7.4 Porovnání podle typu kameniva

Obdobně lze vypracovat graf porovnávající velikost kontaktní plochy na základě vzorku kameniva – viz Graf 7. Zde je na začátku zatěžování (ZS1) velmi zřejmý

rozdíl mezi kamenivem zaobleným znečištěným a ostatními dvěma typy. S vyšším zatížením je tento rozdíl stále podobný. Zvětšuje se však rozdíl mezi kamenivem ostrohranným a zaobleným. Při maximálním zatížení vykazuje kamenivo zaoblené znečištěné až o 12 % větší kontaktní plochu než kamenivo zaoblené čisté a o 19 % větší kontaktní plochu než kamenivo ostrohranné.



Graf 7: Porovnání kontaktní plochy podle typu kameniva [Zdroj: Autor]

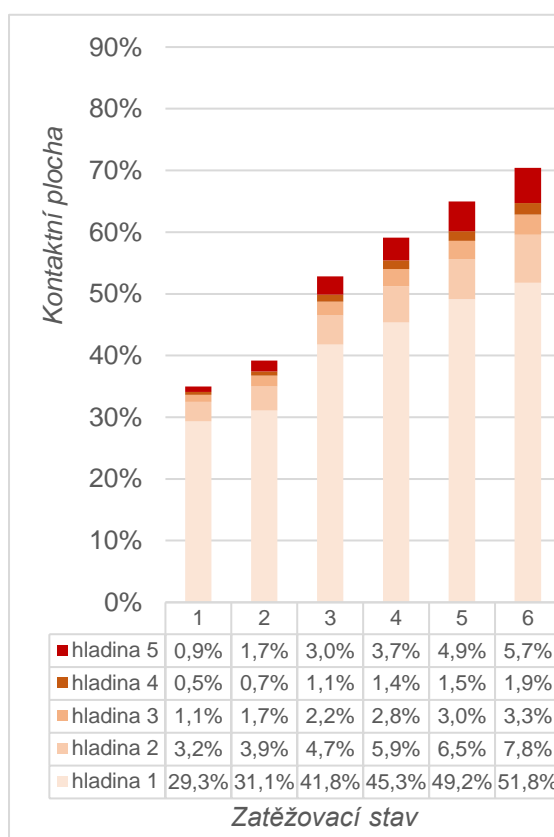
5.7.5 Další možnosti vyhodnocení

Kromě běžných numerických vyhodnocení umožňuje tato metoda měření velikosti kontaktní plochy a napětí také v jiných formách. Oproti jiným metodám lze především přesně analyzovat velikost kontaktního napětí a jeho postupný nárůst. Vyfiltrováním výsledků podle těchto hladin lze získat bližší představu o nerovnoměrnosti rozložení napětí na kontaktní ploše. Pro kalibraci použitou u všech zkušebních měření v této práci platí, že maximální měřitelný tlak je

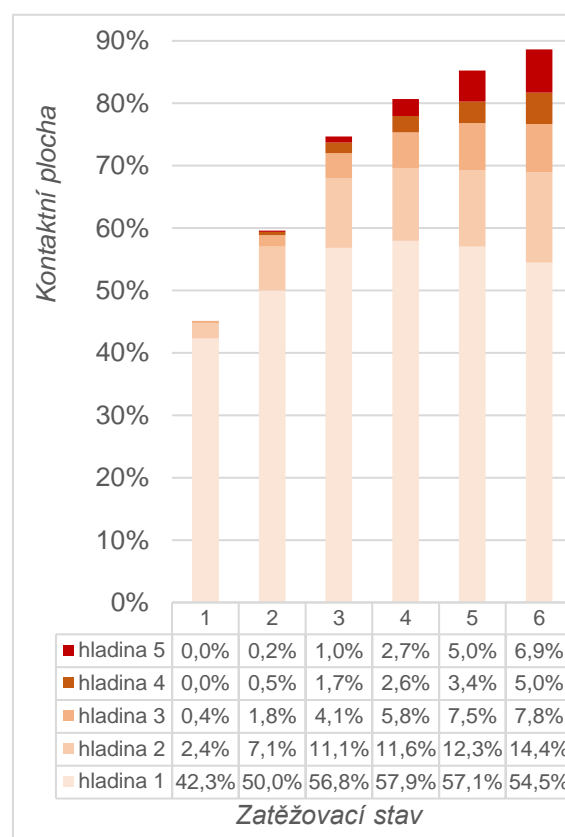
162,47 kPa. Hladiny napětí pro vyhodnocení lze volit dle vlastního uvážení, v tomto případě byly meze hladiny stanoveny následovně:

- Hladina 1: 0 až 40 kPa,
- Hladina 2: 40 až 80 kPa,
- Hladina 3: 80 až 120 kPa
- Hladina 4: 120 až 160 kPa,
- Hladina 5: 160 až 162,47 kPa.

Takto zpracované výsledky lze porovnat například mezi modelem s betonovým pražcem na kamenivu ostrohranném a modelem s dřevěným pražcem na kamenivu zaobleném znečištěném – viz Graf 8 a 9. Zatímco druhý model má celkovou kontaktní plochu větší, tak v ZS1 až ZS4 lze u prvního modelu vyčíst větší procento nejvíce zatížené plochy.

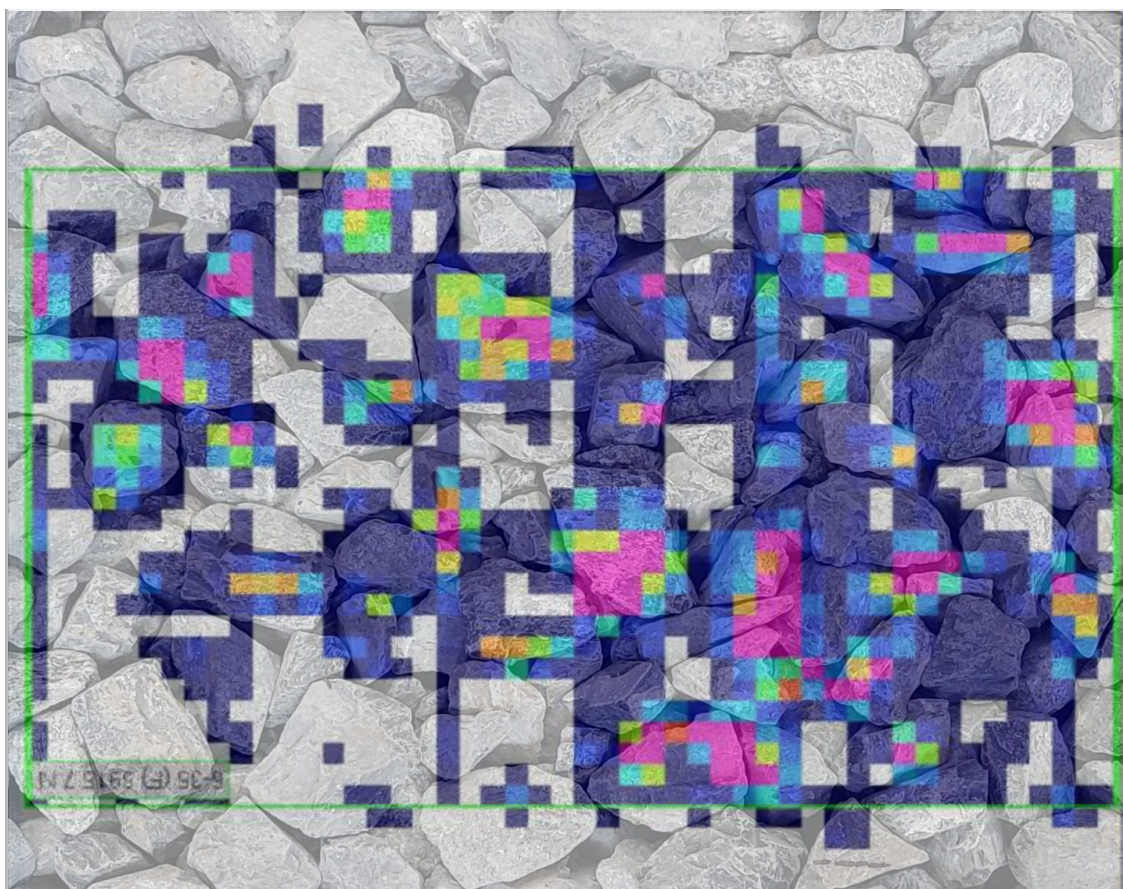


Graf 8: Kamenivo ostrohranné čisté, betonový pražec [Zdroj: Autor]



Graf 9: Kamenivo zaoblené znečištěné, dřevěný pražec [Zdroj: Autor]

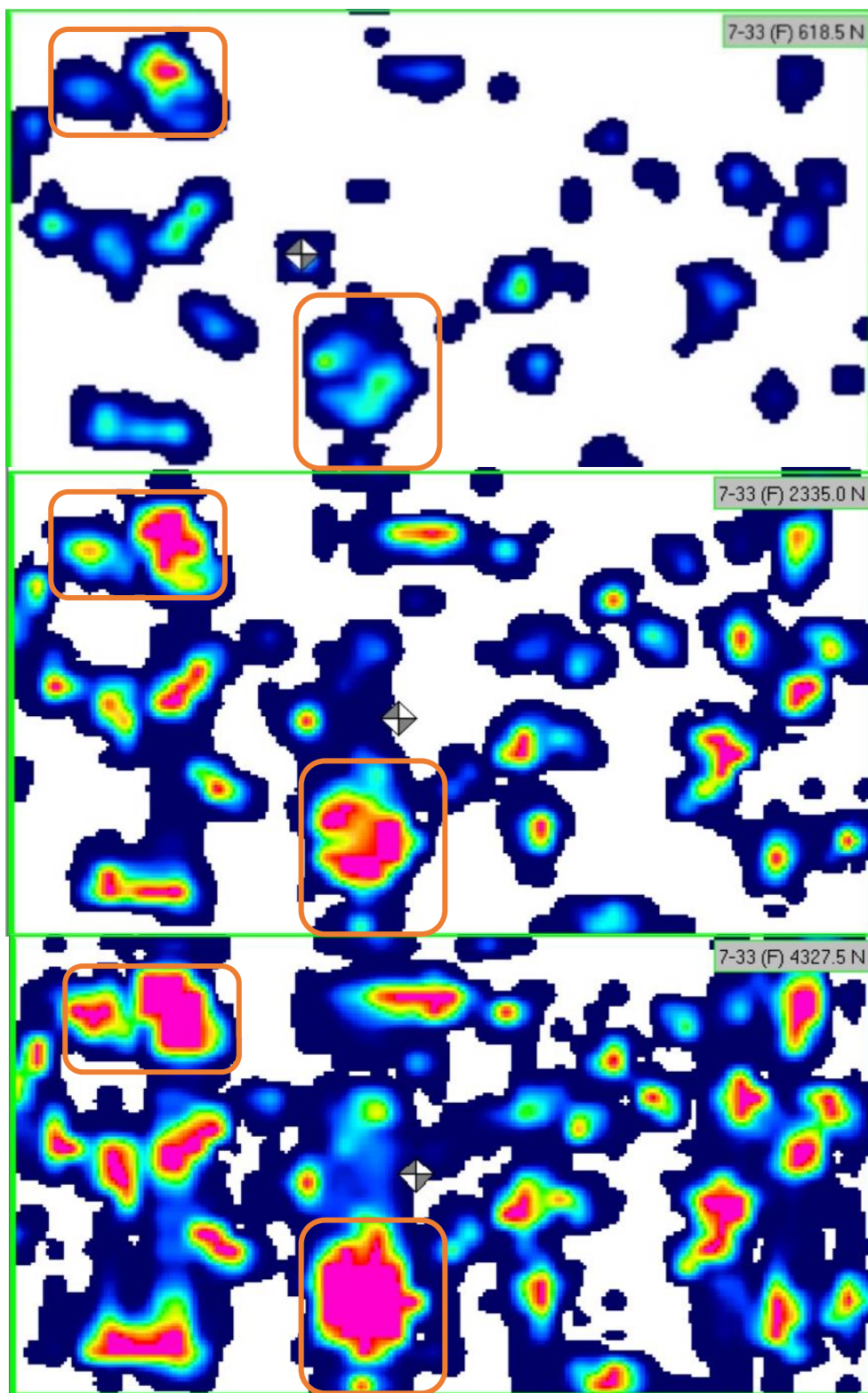
V některých případech může být užitečné i porovnání grafických výsledků přímo s povrchem šterku ve formě fotografie (viz Obr. 35). Díky vyneseným značkám při ukládání tlakové podložky na kamenivo lze fotografii povrchu kameniva zarovnat pod grafické zobrazení kontaktní plochy a je možné určit jednotlivá nejvíce zatížená zrna. Bylo by tak například možné předejít propíchnutí tlakové podložky, pokud by při zatížení malou silou docházelo na určitém zrně k extrémnímu napětí.



Obr. 35: Fotografie kameniva ostrohranného s vyznačením grafického záznamu kontaktní plochy ze softwaru I-Scan [Zdroj: Autor]

Další možností je analýza výslednice sil. Ze softwaru lze jednoduše získat vypočtenou velikost a souřadnice zatížení pro každý snímek - v našem případě 1 snímek odpovídá 1 zatěžovacímu stavu. Je tedy možné sledovat umístění a případně i trajektorii této síly – viz Obr. 36. Je také možné zkoumat, jak se mění kontaktní plocha v místě s největším napětím či v jiném vytipovaném úseku.

Například na Obr. 36 lze pozorovat, že plochy s největším napětím zůstávají při postupném zatěžování stále na stejných místech.



Obr. 36: Vyznačení výslednice sil a dvou hlavních ploch napětí v ZS1, ZS2 a ZS3 [Zdroj: Autor]

6 Zhodnocení metody Tekscan

Na základě zkušeností získaných během laboratorní části této práce lze posoudit vhodnost metody měření tlakovými podložkami Tekscan pro měření kontaktní plochy mezi ložnou plochou pražce a kolejovým ložem. Vzhledem k existenci dalších metod měření je kromě individuálního hodnocení také praktické provést hodnocení v porovnání s těmito dalšími metodami.

6.1 Porovnání různých metod měření kontaktní plochy

Podkladem pro porovnání různých metod měření kontaktní plochy mezi ložnou plochou pražce a kolejovým ložem jsou informace získané z literatury použité pro vypracování teoretické části této práce (kapitoly 3.2.1 až 3.2.6). Výjimkou je metoda měření tlakovými podložkami Tekscan. Ta je hodnocena na základě osobních zkušeností získaných v rámci praktické části této práce.

Porovnání vybraných metod měření není vzhledem k rozdílnému zdroji podkladů plně objektivní. V budoucnu by bylo vhodné vytvořit obdobné hodnocení založené na výsledcích měření různými metodami na jednom a tom samém modelu. I přes tento nedostatek bylo porovnání provedeno, jelikož se jedná o názorné a užitečné shrnutí charakteristik různých metod měření.

Porovnání metod dle vybraných kritérií je shrnuto v tabulce (viz Tab. 1). Volba kritérií byla provedena tak, aby porovnání pokrylo hlavní rozdílnosti jednotlivých metod. Pro větší názornost, byly relativně pozitivní hodnoty zvýrazněny zeleně a relativně negativní hodnoty červeně. Oranžová barva byla použita pro vyznačení hodnot na pomezí mezi těmito extrémy.

Nyní již k samotnému porovnání metod. Do porovnání metod byly zahrnuty metody měření pomocí kopírovacího papíru, otisků, tlakového papíru a tlakových senzorů Tekscan. Z hlediska získávání a zpracování výsledků se metody liší jak časovou náročností, tak i přesností výstupních dat a dalšími parametry. Hodnocení podle některých kritérií je zřejmé – zejména u kritérií č. 7 až 10. Pro správnou interpretaci ostatních kritérií je nezbytné je blíže vysvětlit – viz dále.

Kritérium	Metoda			
	Kopírovací papír	Otisky	Tlakový papír	Tlakové podložky Tekscan
1. Dostupnost	vysoká	vysoká	střední	nizká
2. Časová náročnost měření	střední	vysoká	střední	nizká
3. Riziko poškození dat při manipulaci	ano	ano	ano	ne
4. Stálost citlivosti na tlak	vysoká	střední	vysoká	vysoká
5. Přesnost měření kontaktní plochy	vysoká	střední	vysoká	střední
6. Přesnost měření kontaktního napětí	nelze	nelze	střední	vysoká
7. Převod dat do elektronické podoby	skenováním	skenováním	skenováním	automatický
8. Speciální vyhodnocovací software	ne	ne	ano	ano
9. Sledování výsledků v reálném čase	ne	ne	ne	ano
10. Záznam průběhu měření	ne	ne	ne	ano

Tab. 1: Porovnání různých metod měření kontaktní plochy [Zdroj: Autor]

Jako první kritérium byla zvolena dostupnost metody, ve které je zahrnuta dostupnost technologická i finanční. Nejvíce finančně nákladnou metodou je užití tlakových podložek Tekscan. Užití této metody vyžaduje sestavení kompletní měřicí soustavy. Finančně dostupnější je měření tlakovým papírem. Zbylé metody využívají běžněji dostupných a levnějších nástrojů.

Z hlediska časové náročnosti je nejméně výhodná metoda otisků, jelikož je před každým měřením nutné provést precizní nanesení barvy na povrch štěrku. Nejvýhodnější je metoda měření tlakovými podložkami, jelikož jako jediná nevyžaduje manipulaci s modelem mezi jednotlivými zatěžovacími kroky. Tato metoda eliminuje také riziko mechanického poškození výsledků při manipulaci s grafickým výstupem (viz kritérium č. 3). U všech ostatních metod může nedostatečně opatrným nakládáním s médiem pro grafický záznam dat dojít ke znehodnocení výsledků měření.

Dle kritéria č. 4 se jako nejméně výhodná jeví metoda otisků. Výsledky získané touto metodou jsou úzce závislé na volbě barvy, preciznosti jejího nanesení

na povrch štěrku a vlivu okolní teploty a vlhkosti na schopnost barvy vytvořit otisk. U ostatních metod je tento nedostatek eliminován. Výhodou měření tlakovými papíry je, že lze měřitelný rozsah velikosti kontaktního napětí ovlivnit volbou výrobku s požadovaným rozsahem citlivosti na tlak. Obdobně je potřeba provést výběr správné varianty tlakové podložky. Dle potřeby lze v rámci rozsahu měřitelného tlaku konkrétního výrobku v průběhu měření omezit rozsah zobrazovaných hodnot napětí (v případě výrobků firmy Tekscan, Inc. pomocí softwaru I-Scan).

Přesnost měření kontaktní plochy je jedním z klíčových kritérií. U analogových metod měření pomocí kopírovacího či tlakového papíru je v porovnání s ostatními metodami výsledná přesnost výsledků nejlepší. U metody otisků není zaručeno otisknutí barvy na příliš malých dílčích kontaktních plochách. U metody měření tlakovými podložkami je zase omezena velikost rozlišení výsledků, a to v závislosti na velikosti plochy snímané 1 senzorem. Tato metoda však umožňuje v porovnání s tlakovým papírem vyšší rozlišení dat kontaktního napětí. Zbylé dvě metody měření kontaktního napětí neumožňují.

Pro experimentální výzkum přenášení sil mezi pražcem a kolejovým ložem musí být volba metody měření přizpůsobována hlavním cílům měření. Při měření kontaktního napětí bude nejpřesnějších výsledků dosaženo při měření tlakovými podložkami. Pro měření kontaktní plochy spolu s kontaktním napětím by mohlo být vhodné metodu měření tlakovou podložkou zkombinovat s některou analogovou metodou.

Například při vložení bílého a kopírovacího papíru mezi pražec a tlakovou podložku by bylo teoreticky možné získat kvalitní grafický výstup maximální dosažené kontaktní plochy, orientační elektronický výstup postupného vývoje kontaktní plochy a záznam vývoje kontaktního napětí. Výhodou by bylo snížené riziko poškození analogového výstupu a obohacení tohoto výstupu o data z měření kontaktního napětí. Každá jednotlivá metoda měření přináší jiné výhody a nevýhody, které by při volbě metody pro měření kontaktní plochy a napětí měly být brány v potaz.

6.2 Vhodnost metody Tekscan pro měření kontaktní plochy mezi ložnou plochou pražce a kolejovým ložem

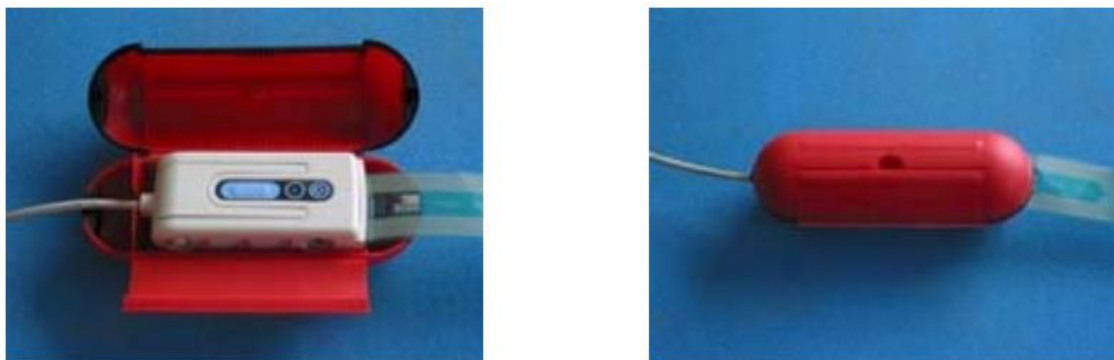
Na základě předchozích zkušeností z provedeného laboratorního měření a vyhodnocení dat lze zhodnotit metodu Tekscan. Hlavní výhodou této technologie je možnost sledovat výsledky v živém čase a monitorovat nikoliv jen maximální kontaktní plochu, ale především její vývoj v čase a v závislosti na zatížení. Měření touto metodou je rychlé a po prvotním seznámením se softwarem také poměrně uživatelsky přívětivé. Naopak o dost náročnější může být kalibrace senzorů.

Výhodné pro série měření je, že bez manipulace s modelem lze samostatně zaznamenat data z několika po sobě jdoucích zatěžovacích stavů, což u žádné z předchozích metod nebylo možné. Je tak vyloučena chyba z opětovného skládání modelu v jeden celek po vyjmutí měřicí techniky. Další výhodou je možnost vyhodnocení přímo v softwaru a široké možnosti nastavení uživatelského prostředí. Pozitivně lze hodnotit také možnost exportu dat pro zpracování v tabulkovém procesoru či jiném vhodném softwaru, který uživateli vyhovuje.

Při měření je nutné postupovat opatrně a zvážit možná rizika. Hlavním rizikem je poškození měřicí techniky, a to jak tlakové podložky při jejím náhodném přetížení či propíchnutí, tak také čtecí hlavy. Ta se stejně jako tlaková podložka vyskytuje během měření v bezprostřední blízkosti modelu, a tak hrozí její poškození jejím upuštěním z výšky či pádem předmětu na ni. Toto riziko by bylo možné eliminovat výběrem tlakové podložky s větší vzdáleností mezi tlakovými senzory a výstupními kontaktními plochami.

Dalším rizikem je zanesení hlavy prachem, ke které může dojít například při manipulaci se štěrkem. Vzhledem k finanční náročnosti nebývá na rozdíl od tlakových podložek k dispozici více těchto čtecích hlav, a tak by její poškození mohlo narušit poměrně značně průběh experimentu. Citlivým detailem je způsob zapojení podložky do čtecí hlavy. Oblast s kontakty není na samotné tlakové podložce nijak chráněna a při jejím poškození či jen nedoléhání v čtecí hlavě

dochází k vypadávání přenosu dat z některých řad či sloupců senzorů. Při zapojování do čtecí hlavy je nutné dbát zvýšené opatrnosti, aby nedošlo k nežádoucímu ohnutí či jinému poškození této části. Jako alespoň částečná ochrana může sloužit vhodné pouzdro (viz Obr. 37).



Obr. 37: Pouzdro na čtecí hlavu [38]

Riziko poškození tlakové podložky je možné řešit dodatečnou ochranou z vhodného materiálu. Je však nutné zvážit zkreslení dat vlivem zvětšené tloušťky či tuhosti podložky. K dalšímu zkreslení dochází na základě přesnosti měření senzorů. Například u podložky použité v této práci jsou rozestupy mezi senzory cca 1 cm. To znamená, že pokud senzor bude zatížen i jen na malé ploše, do výsledků se tato informace propíše jako zatížení na celé ploše senzoru. Proto výsledky měření touto metodou mohou poskytovat až několikanásobně vyšší hodnoty velikosti kontaktní plochy.

Kvůli větším naměřeným hodnotám velikosti kontaktní plochy může být také obtížná či neproveditelná analýza počtu dílčích kontaktních ploch. Dalším vlivem na naměřenou velikost kontaktní plochy je citlivost měřicí techniky na tlak. Pokud využijeme techniku s nižší hranicí citlivosti, je pravděpodobné, že se to projeví zvětšením naměřené plochy, protože dojde k zaznamenání tlaku i v místech, kde jiné metody nezaznamenají nic.

Metoda se jeví jako použitelná pro kratší měření v terénu. Při delších měřeních by bylo nutné zajistit přívod elektrické energie, jelikož ukládání dat probíhá výlučně v notebooku, a zvážit životnost tlakové podložky při vystavení povětrnostním jevům. Dále je nutné zmínit, že se jedná o finančně poměrně náročnější variantu, než je tomu například u metody otisků. Výhodné však může

být, že odpadají náklady na jednorázové výrobky a nezbytné plánování potřebného počtu výrobků pro sérii měření jako je tomu například u kopírovacích a tlakových papírů. Také je pravděpodobné, že pro větší objem měření se bude jednat o metodu výhodnější, a to hlavně z časových důvodů, jelikož odpadá nutnost převodu dat do digitální podoby skenováním či focením.

I přes některé slabší stránky se stále jedná o metodu měření kontaktního tlaku a napětí s jistou perspektivou využití nejen v oboru železničních staveb. Na základě provedených měření v rámci této práce lze metodu měření tlakovými senzory Tekscan doporučit pro další výzkum přenosu sil v železničním svršku. Před případným dalším užíváním této metody pro měření kontaktní plochy mezi ložnou plochou pražce či podpražcovou podložkou a kolejovým ložem by bylo vhodné provést porovnávací měření s jinými staršími metodami. V ideálním případě by mohly být v rámci jedné série experimentů porovnány všechny výše zmiňované metody měření.

Nutno podotknout, že měření provedené v rámci této práce bylo prováděno jen s jedním konkrétním výrobkem. Na trhu jsou však dostupné různé další varianty tlakových podložek lišících se jak tvarem a velikostí snímané plochy, tak i uspořádáním senzorů [36]. Některé varianty mají senzory uspořádány s menšími rozestupy a poskytují tak výsledky ve vyšším rozlišení, ale zato mají menší celkovou snímanou plochu. Volba varianty výrobku se tedy odvíjí nejen od finanční náročnosti a hustoty uspořádání tlakových senzorů, ale také od požadavků na pokrytí dostatečně velké plochy.

Závěr

Problematika týkající se kontaktní plochy a napětí mezi pražcem a kamenivem kolejového lože je významná pro životnost železničního svršku i konstrukce v okolí železniční trati a je předmětem výzkumu v mezinárodním měřítku. Nově získané znalosti v této problematice je možné využívat při úpravě návrhu konstrukce železniční trati i při výrobě jednotlivých součástí jako jsou příčné pražce či podpražcové podložky. Výzkum v oblasti kontaktní plochy a kontaktního napětí mezi ložnou plochou pražce a kolejovým ložem by měl v budoucnu poskytnout informace důležité pro lepší pochopení přenosu zatížení v železničním svršku a také posloužit jako podklad pro návrh podpražcových podložek.

V rámci této práce byla provedena série laboratorních zkoušek s cílem posoudit vhodnost nové moderní metody pro měření kontaktní plochy a napětí mezi ložnou plochou pražce a kolejovým ložem. Z porovnání různých metod v kapitole 6.1 jasně vyplývá, že metoda měření tlakovými senzory Tekscan je inovativní zejména v poskytování výstupu v elektronické podobě. Tím je umožněno sledování aktuální kontaktní plochy i napětí. Jedná se o první metodu, při které je možné monitorovat průběh zatěžování modelu. Mimo to tato metoda také snižuje časovou náročnost zpracování výsledků. Oproti analogovým metodám tato metoda měření sice poskytuje data kontaktní plochy zpravidla v horším rozlišení, nicméně umožňuje získávání kvalitních informací o kontaktním napětí v porovnání s ostatními metodami.

Na základě provedených měření byla ověřena využitelnost metody měření kontaktní plochy a napětí tlakovou podložkou Tekscan pro další výzkum. Další měření s tlakovými podložkami by mohla v budoucnu poskytnout nové informace působení sil nejen mezi pražcem a kolejovým ložem, ale v celém železničním svršku a spodku.

Seznam použitých zdrojů

- [1] SLABÁ, R. a HOUŠŤ, R. *Ročenka dopravy České republiky: 2022*. [online] Zlín: Ministerstvo dopravy, 2022. ISSN: 1801-3090. [vid. 22-11-2023] Dostupné z: https://www.sydos.cz/cs/rocenka_pdf/Rocenka_dopravy_2022.pdf
- [2] ČSN EN 13481-4. *Železniční aplikace – Kolej – Požadavky na vlastnosti systémů upevnění – Část 4: Systémy upevnění pro ocelové pražce v kolejovém loži*. Česká agentura pro standardizaci, 2023. ICS: 93.100. Třídící znak: 736370.
- [3] ČSN EN 13450. *Kamenivo pro kolejové lože*. Český normalizační institut, 2004. ICS: 91.100.15. Třídící znak: 721506.
- [4] SPRÁVA ŽELEZNIC, s. o. *Obecné technické podmínky: Kamenivo pro kolejové lože železničních drah*. Praha, 2021.
- [5] ČSN EN 13145+A1. *Železniční aplikace – Kolej – Dřevěné příčné a výhybkové pražce*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012. ICS: 79.040; 93.100. Třídící znak: 491410.
- [6] ČSN EN 13230-1. *Železniční aplikace – Kolej – Betonové příčné a výhybkové pražce – Část 1: Obecné požadavky*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017. ICS: 91.100; 93.100. Třídící znak: 736365.
- [7] ČSN EN 13230-2. *Železniční aplikace – Kolej – Betonové příčné a výhybkové pražce – Část 2: Předpjaté monoblokové pražce*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017. ICS: 91.100; 93.100. Třídící znak: 736365.
- [8] ČSN EN 13230-6. *Železniční aplikace – Kolej – Betonové příčné a výhybkové pražce – Část 6: Konstrukce*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020. ICS: 91.100; 93.100. Třídící znak: 736365.

- [9] ČSN EN 16730. *Železniční aplikace – Kolej – Betonové příčné a výhybkové pražce s podpražcovými podložkami*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017. ICS: 93.100. Třídící znak: 736367.
- [10] SPRÁVA ŽELEZNIC, s. o. *SŽ S3 Železniční svršek*. Praha, 2021.
- [11] SPRÁVA ŽELEZNIC, s. o. *Technické kvalitativní podmínky staveb státních drah. Kapitola 7: Kolejové lože*. [PDF] Praha, 2021.
- [12] SPRÁVA ŽELEZNIČNÍ DOPRAVNÍ CESTY, s. o. *Technické kvalitativní podmínky staveb státních drah. Kapitola 8: Konstrukce koleje a výhybek*. Praha, 2013.
- [13] SPRÁVA ŽELEZNIČNÍ DOPRAVNÍ CESTY, s. o. *Obecné technické podmínky: Betonové pražce pro železniční dráhy*. Praha, 2007.
- [14] SPRÁVA ŽELEZNIČNÍ DOPRAVNÍ CESTY, s. o. *Obecné technické podmínky: Dřevěné kolejnicové podpory pro železniční dráhy*. Praha, 2013.
- [15] SPRÁVA ŽELEZNIC, s. o. *Seznamy výrobků schválených pro běžnou kolej*. [online] [vid. 22-12-2023] Dostupné z: <https://www.spravazeleznic.cz/dodavatele-odberatele/technicke-pozadavky-na-vyrobky-zarizeni-a-technologie-pro-zdc/zeleznicni-svrsek/soubory-ke-stazeni/seznam-vyrobku-kolej>
- [16] SPRÁVA ŽELEZNIC, s. o. *Přehled značení součástí železničního svršku a průvodních dokladů o kvalitě – Průběžná aktualizace části patnácté SR 103/3(S)*. [online] [vid. 22-12-2023] Dostupné z: <https://www.spravazeleznic.cz/documents/50004227/50158166/SR+103-3+-+slou%C4%8Den%C3%A9+do+jednoho+dokumentu.pdf/c62d98bc-442c-44c1-9c0a-7f627faebe09>
- [17] KREJČÍŘÍKOVÁ, H. a TYC, P. *Železniční stavby 20*. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta stavební, 2003. Dotisk prvního vydání. ISBN: 80-01-02411-3.
- [18] PLÁŠEK, O. et al. *Železniční stavby: Železniční spodek a svršek*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2004. ISBN: 80-214-2620-9.

- [19] BALÁŽOVÁ, Blanka. *Posouzení velikosti kontaktní plochy mezi podpražcovou podložkou a kamenivem kolejového lože*. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, 2009.
- [20] MONACO, Valentina. *Untersuchungen zu Schwellenbesonhlunger im Oberbau*. Disertační práce. TU Graz, 2003.
- [21] LOJDA, V., JEŘÁBEK, J. a HORNÍČEK, L. *Utilizing a pressure paper for the determination of contact parameters between aggregate and a railway sleeper*. In: 19th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2019. Sofia: STEF92 Technology Ltd., 2019. p. 565-571. vol. 19. [PDF] ISSN: 1314-2704. ISBN: 978-619-7408-77-5.
- [22] JEŘÁBEK, Jaroslav. *Experimentální stanovení parametrů kontaktu kameniva kolejového lože a pražce*. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, 2019.
- [23] HORNÍČEK, Leoš. *Measurement of the Magnitude of the Contact Area between Under Sleeper Pads and Ballast Bed Aggregates*. In: Proceedings of the First International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance. Stirling: Civil-Comp Press Ltd, 2012. p. 1-12. [PDF] ISSN: 1759-3433. ISBN: 978-1-905088-53-9.
- [24] ADAMEK, Roman. *Podložky pod ložnou plochou pražce a jejich pozitivní vliv na geometrickou polohu koleje*. Vědeckotechnický sborník ČD č. 21. Praha, 2006.
- [25] GETZNER. *Under Sleeper Pads for Ballasted Track*. [online] [vid. 22 11-2023] Dostupné z: <https://www.getzner.com/en/products/rail-products/sleeper-pads>
- [26] HAMŠLÁGEROVÁ, Klára. *Hodnocení zkušebního úseku s podpražcovými podložkami*. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2018.

- [27] SPRÁVA ŽELEZNIC, s. o. *SŽ MP Metodický pokyn pro navrhování pražců s podpražcovými podložkami do konstrukce kolejí, výhybek a výhybkových konstrukcí*. Praha, 2020.
- [28] SELIG, E a WATERS, J. *Track Geometry and Substructure management*. Thomas Telford Publications, London, 1994. ISBN: 0-7277-2013-9.
- [29] BRANSON, J. et al. *Analysis of geometric ballast plate for laboratory testing of resilient track components*, Transportation Geotechnics, Volume 20, 2019, 100240. [PDF] ISSN: 2214-3912. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.04.003>.
- [30] POPÍK, Roman. *Analýza změny vlastností antivibračních rohoží vyvolaná tvarem kontaktní plochy*. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, 2011.
- [31] ABADI, T. et al. *Measuring the Area and Number of Ballast Particle Contacts at Sleeper/Ballast and Ballast/Subgrade Interfaces*, University of Southampton, 2015. [PDF]
- [32] FUJIFILM. *Measurement Film Catalog Brochure*. [online] [vid. 15-11-2023] Dostupné z: <https://www.tekscan.com/products-solutions/pressure-sensing-film/fujifilm-prescale-film>
- [33] NICHOLSON, G. et al. *Comparative evaluation of pressure mapping systems*. University College London. [PDF]
- [34] ROMERO, M. et al. *Investigation of Concrete Sleeper Rail Seat Pressure Distributions for Varying Fastening Systems and Loading Conditions*. University of Illinois at Urbana-Champaign, In: Proceedings of the 2011 International Heavy Haul Association Conference. Canada, 2011. [PDF]
- [35] MCHENRY, M. et al. *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*. Transportation Research Board 93rd Annual Meeting, 2013. [PDF]

- [36] TEKSCAN, Inc. *I-Scan: Product Selection Guide*. [online] [vid. 18-06-2023]
Dostupné z: https://www.tekscan.com/sites/default/files/resources/IDL-I-Scan-SelectionGuide_RevL.pdf
- [37] TEKSCAN, Inc. *Pressure Mapping Sensor 5315-A*. [online] [vid. 18-06-2023]
Dostupné z: <https://www.tekscan.com/products-solutions/pressure-mapping-sensors/5315-a>
- [38] TEKSCAN, Inc. *I-Scan Equilibration and Calibration Practical Suggestions*.
2003. [PDF]

Seznam obrázků

Obr. 1: Nové přírodní kamenivo	17
Obr. 2: Znečištěné použité kamenivo.....	17
Obr. 3: Označení dřevěného pražce pražcovým hřebem.....	18
Obr. 4: Schéma přenášení napětí v konstrukci železničního svršku	22
Obr. 5: Viditelné otlacení pražce od kolejového lože na jeho původní ložné ploše	24
Obr. 6: Umístění podpražcových podložek v konstrukci	25
Obr. 7: Roznášení zatížení bez (vlevo) a s podpražcovými podložkami (vpravo)	26
Obr. 8: Geometrická štěrková deska	29
Obr. 9: Fotografie zvýrazněné kontaktní plochy zachycené pomocí kopírovacího papíru.....	31
Obr. 10: Fotografie zvýrazněné kontaktní plochy zachycené pomocí otisku.....	31
Obr. 11: Tlakový papír po zatížení mezi pražcem a geometrickou štěrkovou deskou	32
Obr. 12: Porovnání tlakových podložek tří různých výrobců	34
Obr. 13: Příklad uspořádání měřicí techniky firmy Tekscan, Inc.	35
Obr. 14: Fotografie tlakového senzoru Pressure Mapping Sensor 5315-A z horní a dolní strany	37
Obr. 15: Možnosti interpolace v softwaru I-Scan: No interpolation, Interpolation 1x1, 3x3 a 5x5	37
Obr. 16: Možnosti 3D zobrazení v softwaru I-Scan: Wireframe, 3D contours, legenda hodnot napětí	38
Obr. 17: Možnosti zobrazení v softwaru I-Scan: Zobrazení číselných výsledků, zobrazení výslednice sil	38
Obr. 18: Pracovní prostředí softwaru I-Scan – vynesení dat několika zaznamenaných měření do grafu	39
Obr. 19: Typická sestava zkušebního modelu	40
Obr. 20: Tlaková podložka Tekscan opatřená ochrannou vrstvou z geotextilie	41
Obr. 21: Zatížení tlakové podložky silou 0,599 kN v poloze A	42
Obr. 22: Schéma poloh A, B, C a D	42

Obr. 23: Použité vzorky pražců (zleva: betonový, plastový, dřevěný)	43
Obr. 24: Uložení geotextilie na první vrstvu štěrku.....	44
Obr. 25: Ukládání ostrohranného kameniva na geotextilii.....	44
Obr. 26: Kontrola rovinatosti vzorku kameniva (kamenivo zaoblené znečištěné) připraveného ve zkušebním boxu	46
Obr. 27: Zkouška lehkou dynamickou deskou	46
Obr. 28: Označení místa pro uložení tlakové podložky a pro uložení pražce ...	48
Obr. 29: Průběh měření: sestavený model a zapojení kompletní měřicí soustavy při uložení pražce v poloze 1, pohled zepředu.....	49
Obr. 30: Průběh měření v poloze 2, pražec plastový na kamenivu ostrohranném, pohled shora	49
Obr. 31: Test zatížení míčkem ve skutečnosti	50
Obr. 32: Test zatížení míčkem v softwaru I-Scan	50
Obr. 33: Příklad oříznutí dat v Excelu	51
Obr. 34: Grafické porovnání kontaktní plochy a kontaktního napětí změřené tlakovou podložkou v poloze B se 2 (nahore), 3 (uprostřed) a 4 (dole) vrstvami ochranné geotextilie v ZS1 (vlevo), ZS2 (uprostřed) a ZS3 (vpravo)	53
Obr. 35: Fotografie kameniva ostrohranného s vyznačením grafického záznamu kontaktní plochy ze softwaru I-Scan	60
Obr. 36: Vyznačení výslednice sil a dvou hlavních ploch napětí v ZS1, ZS2 a ZS3	61
Obr. 37: Pouzdro na čtecí hlavu.....	66

Seznam tabulek a grafů

Graf 1: Znázornění průměrné kontaktní plochy pro podložku se třemi ochrannými vrstvami	54
Graf 2: Porovnání velikosti kontaktní plochy v závislosti na počtu ochranných vrstev	54
Graf 3: Porovnání maximálního napětí v závislosti na počtu ochranných vrstev	54
Graf 4: Zobrazení závislosti velikosti kontaktní plochy na počtu ochranných vrstev podle zatěžovacího stavu	55
Graf 5: Porovnání měření 1 a měření 2	56
Graf 6: Porovnání kontaktní plochy podle typu pražce	57
Graf 7: Porovnání kontaktní plochy podle kameniva.....	58
Graf 8: Kamenivo ostrohranné čisté, betonový pražec	59
Graf 9: Kamenivo zaoblené znečištěné, dřevěný pražec.....	59
Tab. 1: Porovnání různých metod měření kontaktní plochy	63

Seznam příloh

Příloha 1: Protokol o zkoušce vzorků kameniva	
Příloha 2: Grafické výstupy měření v softwaru I-Scan s vyznačenými ořezy kontaktních ploch	
Příloha 3: Výsledky měření	

Příloha 1: Protokol o zkoušce vzorků kameniva

PROTOKOL O ZKOUŠCE

Číslo protokolu: **23 242 / 02**

STANOVENÍ ZRNITOSTI KAMENIVA - SÍTOVÝ ROZBOR

Použitý zkušební postup:

Stanovení zrnitosti kameniva - síťový rozbor dle ČSN EN 933-1

Stanovení rozlišných částic kameniva dle ČSN 72 1180 *)

Zkoušky označené značkou *) byly prováděny mimo rozsah akreditace Zkušební laboratoře společnosti 4G consite s.r.o. udělené Českým institutem pro akreditaci, o.p.s.

Objednatel:	České vysoké učení technické v Praze
Adresa:	Fakulta stavební, Thákurova 7, 166 29 Praha 6

Název akce:	FSv ČVUT – studie – kolejové lože
Číslo akce:	23 242
Celkový počet stran protokolu:	4

Místo odběru vzorku:	FSv ČVUT – laboratoř
Zkoušený prvek:	šterk kolejového lože

Přesná lokalizace je uvedena v rámci jednotlivých zkoušek.

Údaje sloužící pro popis místa odběru vzorku byly poskytnuty ze strany objednatele.

Datum dodání do laboratoře: 8.11.2023
Datum provedení zkoušky: 16.11.2023 - 27.11.2023
Datum vydání protokolu: 27.11.2023



Za protokol odpovídá:

.....
Ing. Jan Mynář
zástupce vedoucího laboratoře

Poznámky :
Výsledky zkoušek se týkají pouze zkoušeného prvku odpovídajícímu uvedené lokalizaci a reprezentují vlastnosti v době provádění zkoušek in situ, resp. vzorků, jak byly předány do laboratoře.
Údaje o názvu akce, místě odběru vzorku a zkoušeném prvku uvedené v protokolu byly předány objednatelem.
Laboratoř za tyto předané údaje nenes odpovědnost.
Bez písemného souhlasu laboratoře se nesmí protokol reprodukovat jinak než celý.

název akce: **FSv ČVUT – studie – kolejové lože**

číslo akce: 23 242

místo odběru vzorku: FSv ČVUT – laboratoř

datum odběru: neuveдено

datum provedení zk.: 16.11.2023-27.11.2023

zkoušený prvek: štěrk kolejového lože

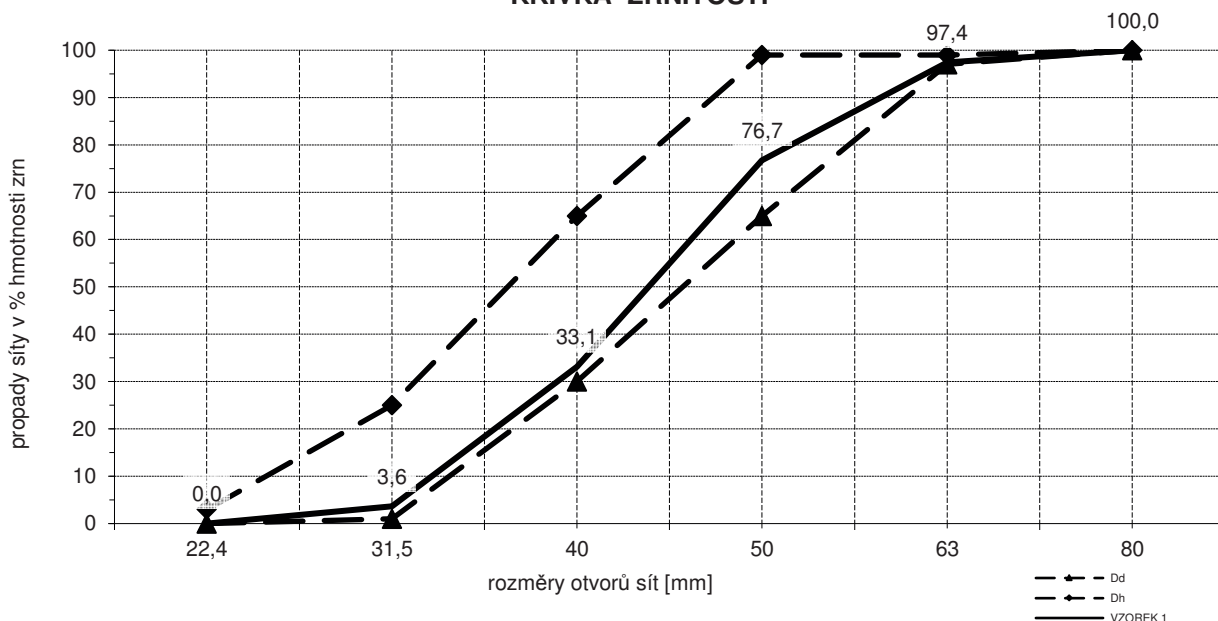
zkoušku provedl: L.Caltová

vizuál. popis materiálu: nové ostrohranné přírodní kamenivo frakce 32/63

barva vzorku: šedá

otvor síta [mm]	procento zůstatku materiálu [% hm.]	součtové procento propadu [% hm.]	požadavky na zrnitost dle ČSN EN 13450, resp. OTP [% hm.]	ostatní vlastnosti ¹⁾
80	0,0	100,0	100,0	stanovení rozlišných částic ²⁾
63	2,6	97,4	97 - 99	cizorodé částice [% hm.]: -
50	20,7	76,7	65 - 99	břidličnatá zrna [% hm.]: -
40	43,6	33,1	30 - 65	kamenivo z vysokopecní strusky [% hm.]: -
31,5	29,5	3,6	1 - 25	
22,4	3,6	0,0	0 - 3	podíl ostrohranných zrn ³⁾ - OZ ₃₂₋₆₃ [% ks zrn]: -
0,5	0,0	0,0		zaoblenost hran zrn ⁴⁾ [% ks zrn]: 17 %
0,063	0,0	0,0		
< 0,063	0,0	0,0		KLASIFIKACE ⁵⁾
podíl propadu zrn 31,5 - 63 mm:		93,8	≥ 50	dle ČSN EN 13450, NA a OTP
obsah drobných zrn (< 0,50 mm):		0,0	≤ 3,0 % dekl.	kategorie zrnitosti D - třída B1 (recyklované kamenivo)
obsah jemných částic (< 0,063 mm):		0,0	≤ 3,0 % dekl.	
částečný rozpad během dopravy (propad na sítu 22,4 mm):		0,0	≤ 5,0 % (A)	

KŘIVKA ZRNITOSTI



podklady pro čištění kolejového lože	součinitel znečištění m_1 (stanoveno dle SŽDC S3/1, Změna č.2, čl. 177, mimo rozsah akreditace): 0 %
---	--

poznámky:

odběr vzorku: vzorek dodán objednatelem, výsledky zkoušek se vztahují ke vzorku, jak byl přijat

použitá zkušební metoda: prosévání za sucha

zkušební zařízení: sada kontrolních sít dle ISO 3310

¹⁾ doplňující údaje stanovené mimo rozsah akreditace zkušební laboratoře; ²⁾ stanoveno dle OTP Kamenivo pro kolejové lože, Příloha D; resp. ČSN 72 1180; ³⁾ stanoveno dle OTP Kamenivo pro kolejové lože, Příloha E; ⁴⁾ stanoveno dle OTP Kamenivo pro kolejové lože, Příloha F;

⁵⁾ interpretace, klasifikace podle ČSN EN 13450, NA, resp. OTP Kamenivo pro kolejové lože se vztahuje pouze na uvedená kritéria

název akce: **FSv ČVUT – studie – kolejové lože**

místo odběru vzorku: FSv ČVUT – laboratoř

číslo akce: 23 242

datum odběru: neuveдено

datum provedení zk.: 20.11.2023-27.11.2023

zkoušený prvek: štěrk kolejového lože

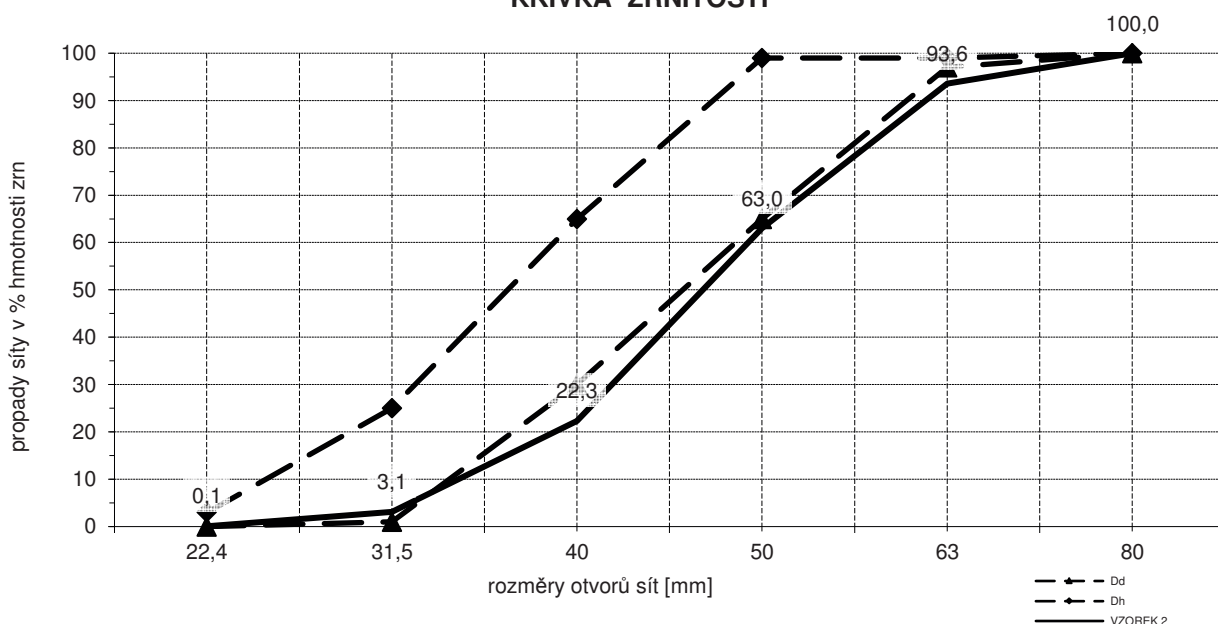
zkoušku provedl: L.Caltová, N. Rádlová

vizuál. popis materiálu: přírodní kamenivo se zaoblenými zrny frakce 32/63

barva vzorku: šedá

otvor síta [mm]	procento zůstatku materiálu [% hm.]	součtové procento propadu [% hm.]	požadavky na zrnitost dle ČSN EN 13450, resp. OTP [% hm.]	ostatní vlastnosti ¹⁾
80	0,0	100,0	100,0	stanovení rozlišných částic ²⁾
63	6,4	93,6	97 - 99	cizorodé částice [% hm.]: -
50	30,6	63,0	65 - 99	břidličnatá zrna [% hm.]: -
40	40,7	22,3	30 - 65	kamenivo z vysokopecní strusky [% hm.]: -
31,5	19,2	3,1	1 - 25	
22,4	3,0	0,1	0 - 3	podíl ostrohranných zrn ³⁾ - OZ ₃₂₋₆₃ [% ks zrn]: -
0,5	0,0	0,0		zaoblenost hran zrn ⁴⁾ [% ks zrn]: 25 %
0,063	0,0	0,0		
< 0,063	0,0	0,0		KLASIFIKACE ⁵⁾
podíl propadu zrn 31,5 - 63 mm:		90,5	≥ 50	dle ČSN EN 13450, NA a OTP
obsah drobných zrn (< 0,50 mm):		0,0	≤ 3,0 % dekl.	kategorie zrnitosti D - třída BI (recyklované kamenivo)
obsah jemných částic (< 0,063 mm):		0,0	≤ 3,0 % dekl.	
částečný rozpad během dopravy (propad na sítu 22,4 mm):		0,1	≤ 5,0 % (A)	

KŘIVKA ZRNITOSTI



podklady pro čištění kolejového lože	součinitel znečištění m_1 (stanoveno dle SŽDC S3/1, Změna č.2, čl. 177, mimo rozsah akreditace): 0 %
---	--

poznámky:

odběr vzorku: vzorek dodán objednatelem, výsledky zkoušek se vztahují ke vzorku, jak byl přijat

použitá zkušební metoda: prosévání za sucha

zkušební zařízení: sada kontrolních sít dle ISO 3310

¹⁾ doplňující údaje stanovené mimo rozsah akreditace zkušební laboratoře; ²⁾ stanoveno dle OTP Kamenivo pro kolejové lože, Příloha D; resp. ČSN 72 1180; ³⁾ stanoveno dle OTP Kamenivo pro kolejové lože, Příloha E; ⁴⁾ stanoveno dle OTP Kamenivo pro kolejové lože, Příloha F;

⁵⁾ interpretace, klasifikace podle ČSN EN 13450, NA, resp. OTP Kamenivo pro kolejové lože se vztahuje pouze na uvedená kritéria

název akce: **FSv ČVUT – studie – kolejové lože**

číslo akce: 23 242

místo odběru vzorku: FSv ČVUT – laboratoř

datum odběru: neuveдено

datum provedení zk.: 20.11.2023

zkoušený prvek: štěrk kolejového lože

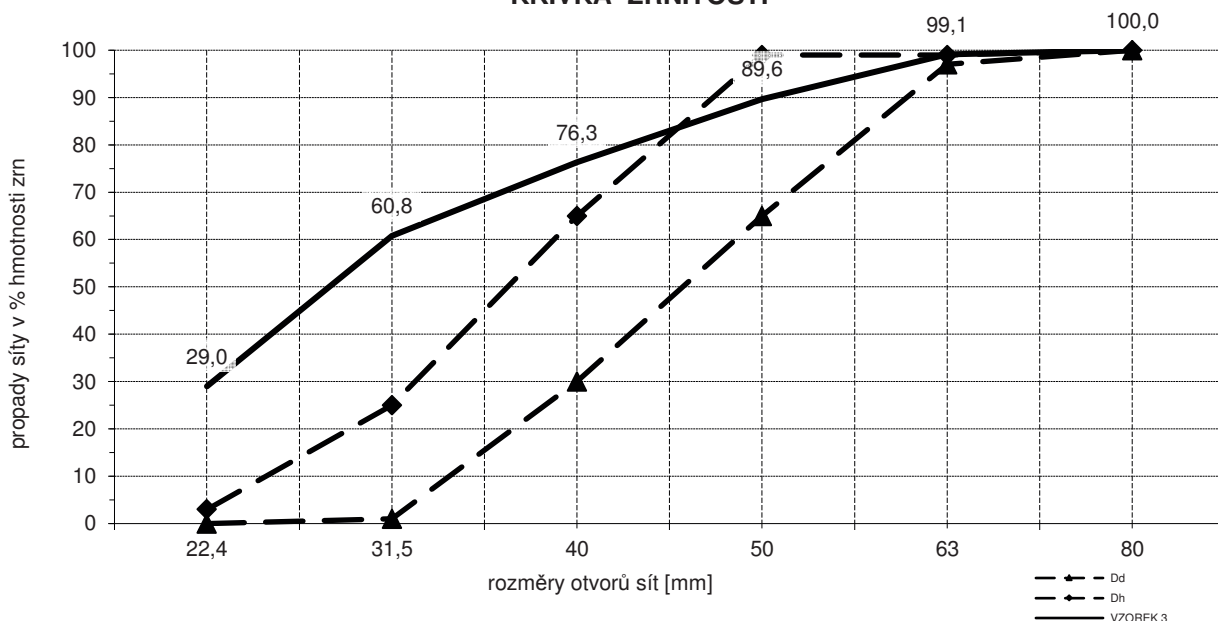
zkoušku provedl: L.Caltová, N. Rádlová

vizuál. popis materiálu: znečištěné přírodní kamenivo frakce 32/63

barva vzorku: šedá

otvor síta [mm]	procento zůstatku materiálu [% hm.]	součtové procento propadu [% hm.]	požadavky na zrnitost dle ČSN EN 13450, resp. OTP [% hm.]	ostatní vlastnosti ¹⁾
80	0,0	100,0	100,0	stanovení rozlišných částic ²⁾
63	0,9	99,1	97 - 99	cizorodé částice [% hm.]: -
50	9,5	89,6	65 - 99	břidličnatá zrna [% hm.]: -
40	13,3	76,3	30 - 65	kamenivo z vysokopecní strusky [% hm.]: -
31,5	15,6	60,8	1 - 25	
22,4	31,8	29,0	0 - 3	podíl ostrohranných zrn ³⁾ - OZ ₃₂₋₆₃ [% ks zrn]: -
0,5	28,7	0,3		zaoblenost hran zrn ⁴⁾ [% ks zrn]: 32 %
0,063	0,3	0,0		
< 0,063	0,0	0,0		
				KLASIFIKACE ⁵⁾
podíl propadu zrn 31,5 - 63 mm:		38,3	≥ 50	dle ČSN EN 13450, NA a OTP
obsah drobných zrn (< 0,50 mm):		0,3	≤ 3,0 % dekl.	kategorie zrnitosti D - třída BI (recyklované kamenivo)
obsah jemných částic (< 0,063 mm):		0,0	≤ 3,0 % dekl.	
částečný rozpad během dopravy (propad na sítu 22,4 mm):		29,0	≤ 5,0 % (A)	

KŘIVKA ZRNITOSTI



podklady pro čištění kolejového lože	součinitel znečištění m_1 (stanoveno dle SŽDC S3/1, Změna č.2, čl. 177, mimo rozsah akreditace): 29 %
---	---

poznámky:

odběr vzorku: vzorek dodán objednatelem, výsledky zkoušek se vztahují ke vzorku, jak byl přijat

použitá zkušební metoda: prosévání za sucha

zkušební zařízení: sada kontrolních sít dle ISO 3310

¹⁾ doplňující údaje stanovené mimo rozsah akreditace zkušební laboratoře; ²⁾ stanoveno dle OTP Kamenivo pro kolejové lože, Příloha D; resp. ČSN 72 1180; ³⁾ stanoveno dle OTP Kamenivo pro kolejové lože, Příloha E; ⁴⁾ stanoveno dle OTP Kamenivo pro kolejové lože, Příloha F;

⁵⁾ interpretace, klasifikace podle ČSN EN 13450, NA, resp. OTP Kamenivo pro kolejové lože se vztahuje pouze na uvedená kritéria

- KONEC PROTOKOLU -

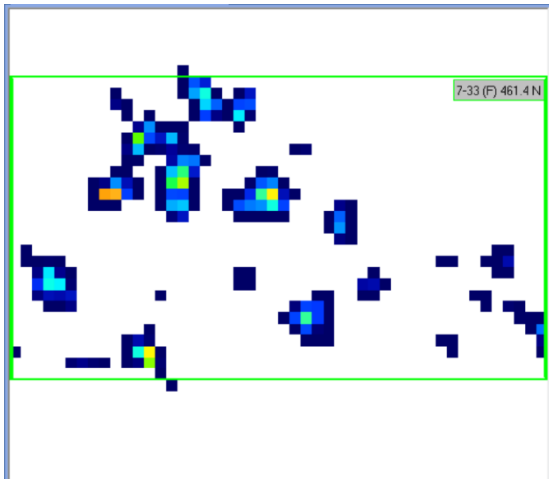
Příloha 2: Grafické výstupy měření v softwaru I-Scan s vyznačenými ořezy kontaktních ploch

Stupnice napětí [kPa]

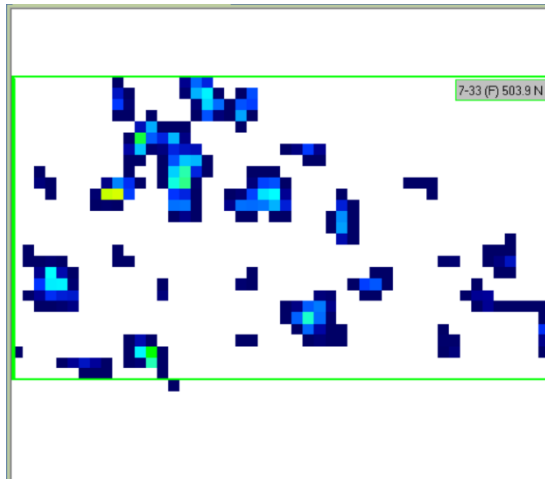


Kamenivo ostrohranné, pražec dřevěný, poloha 1

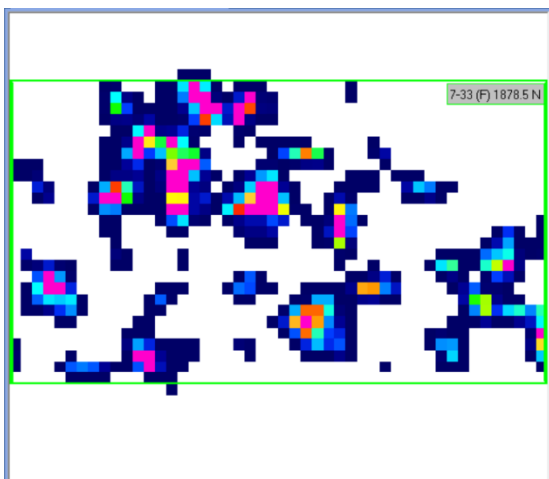
Měření 1: ZS1



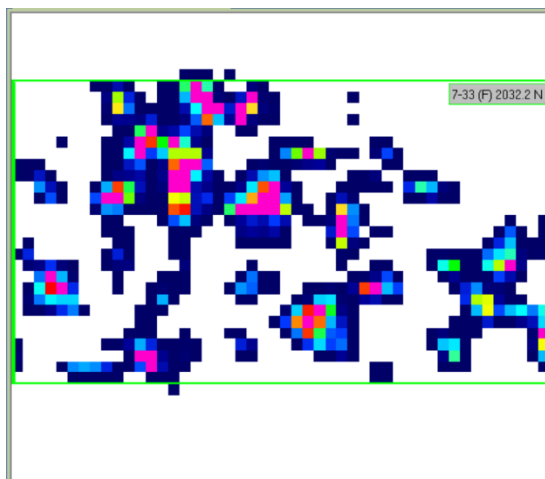
Měření 2: ZS1



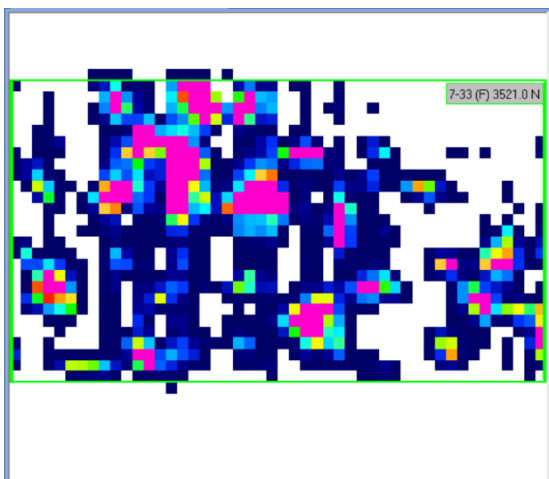
Měření 1: ZS3



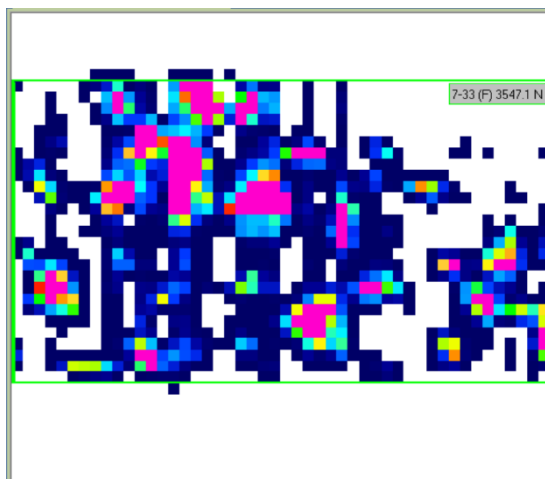
Měření 2: ZS3



Měření 1: ZS6

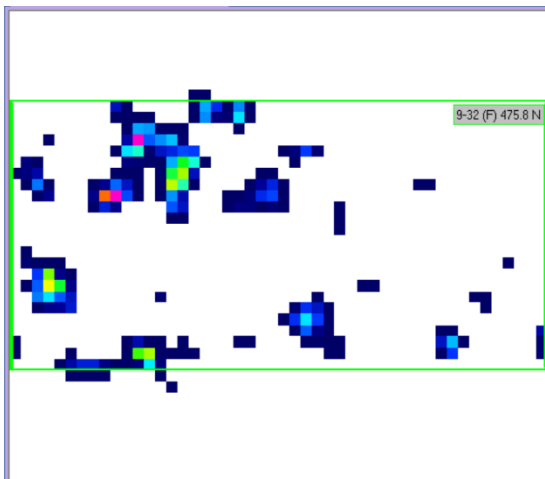


Měření 2: ZS6

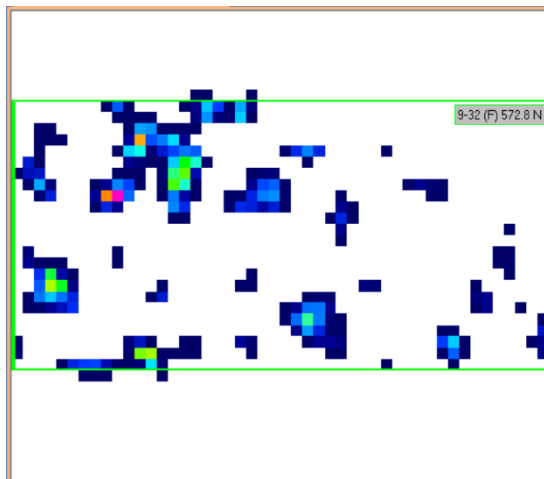


Kamenivo ostrohranné, pražec plastový, poloha 1

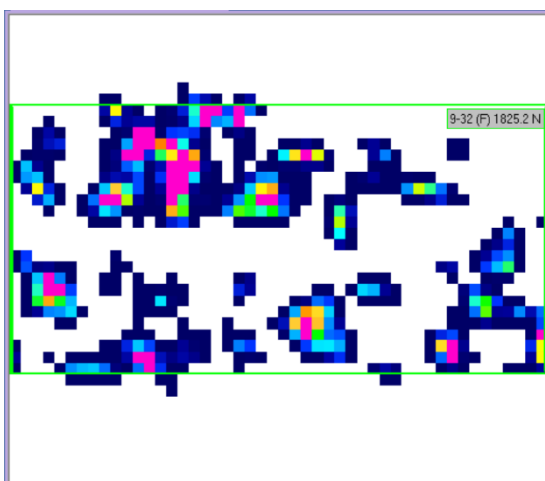
Měření 1: ZS1



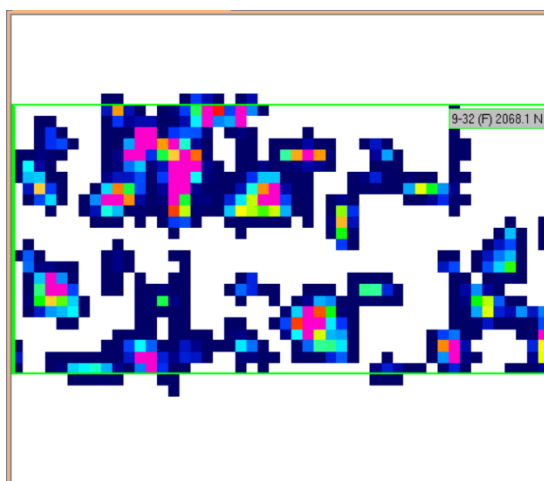
Měření 2: ZS1



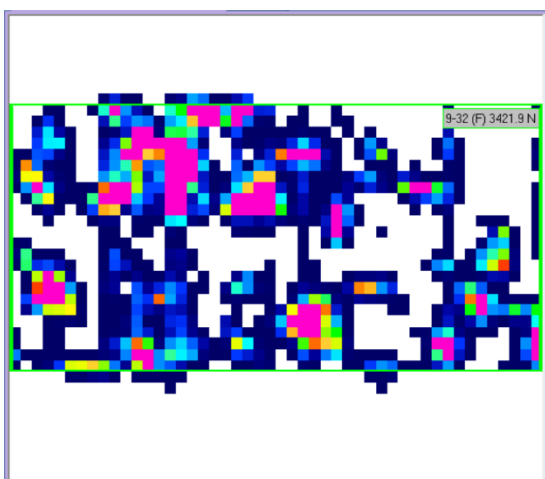
Měření 1: ZS3



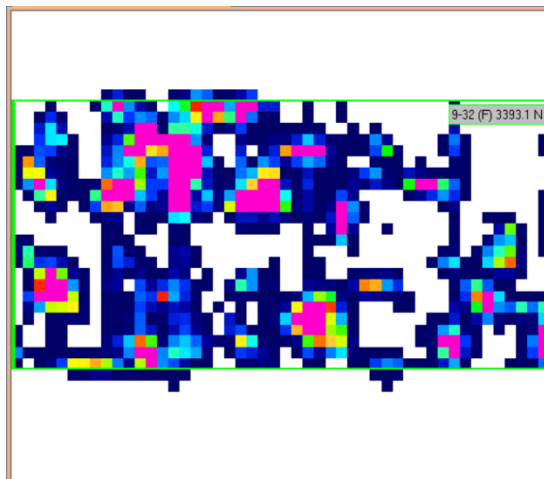
Měření 2: ZS3



Měření 1: ZS6

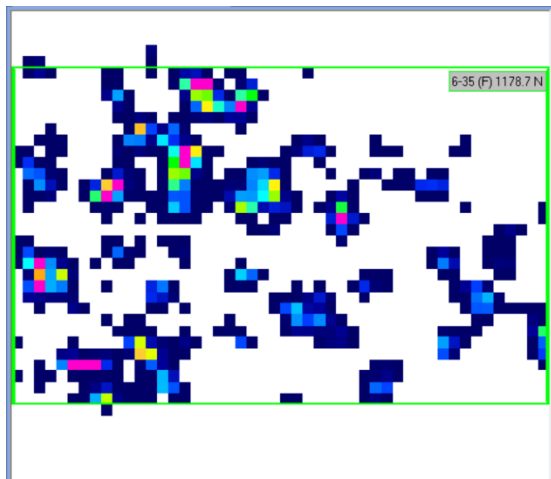


Měření 2: ZS6

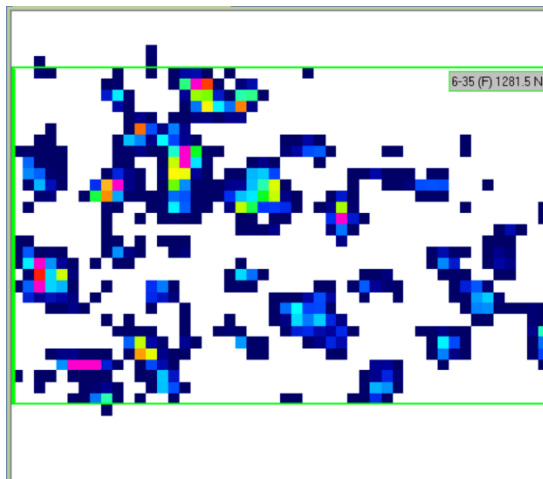


Kamenivo ostrohranné, pražec betonový, poloha 1

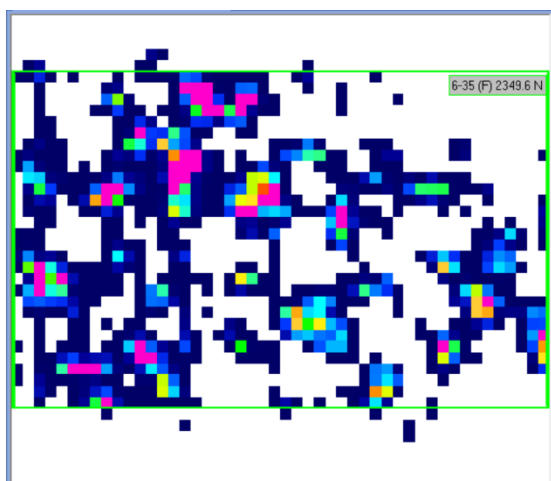
Měření 1: ZS1



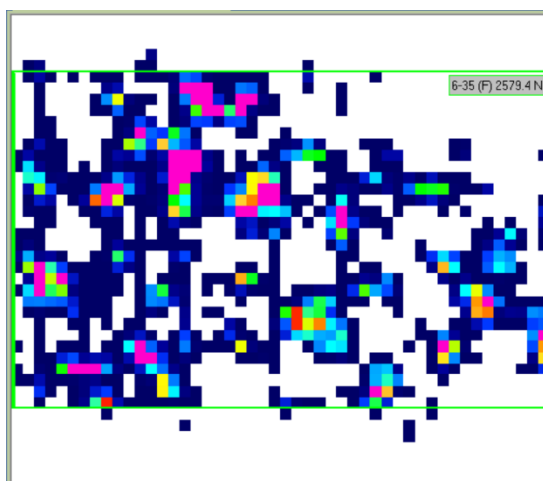
Měření 2: ZS1



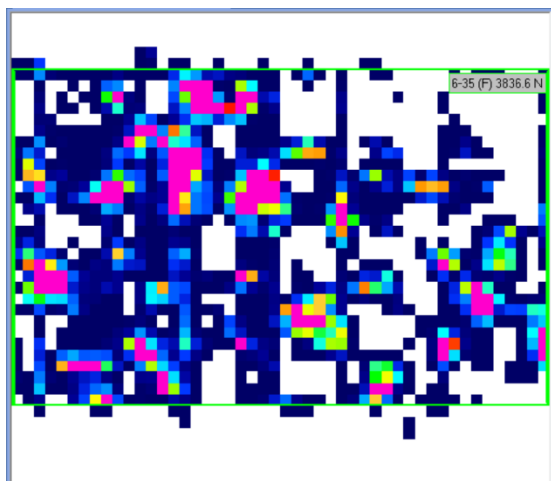
Měření 1: ZS3



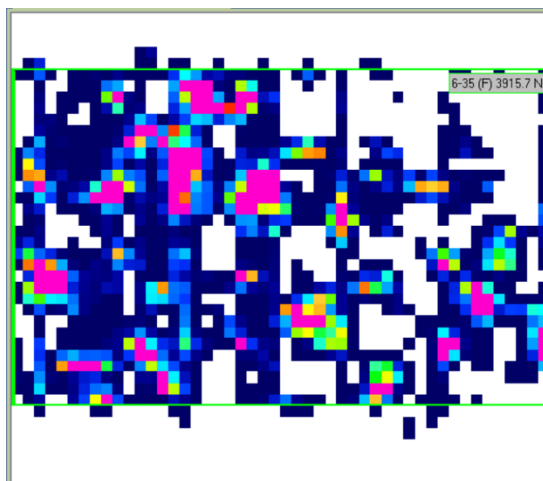
Měření 2: ZS3



Měření 1: ZS6

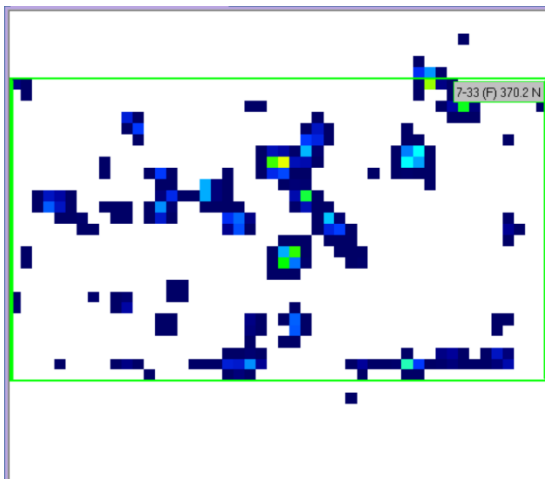


Měření 2: ZS6

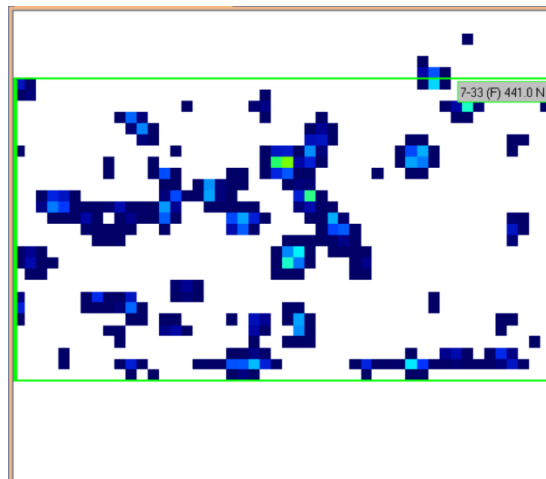


Kamenivo ostrohranné, pražec dřevěný, poloha 2

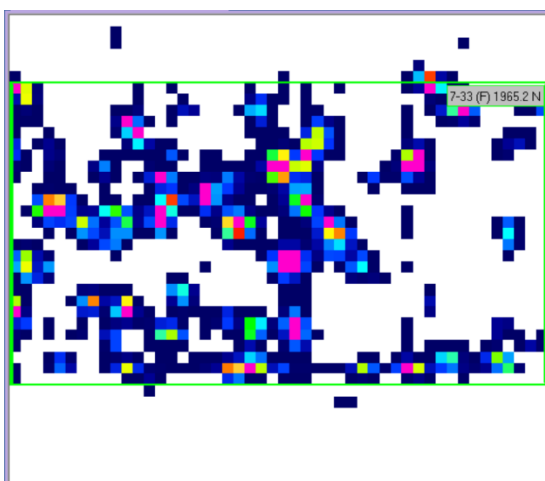
Měření 1: ZS1



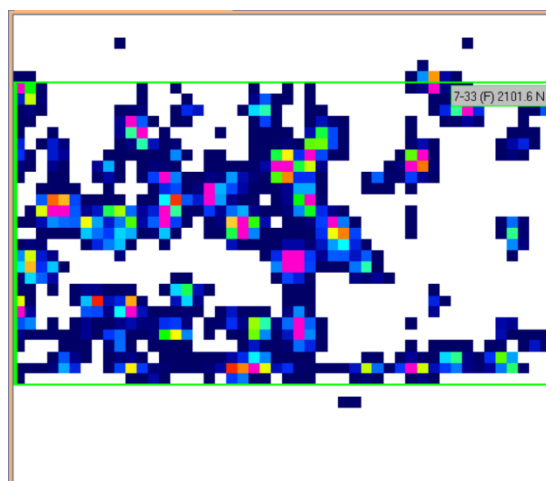
Měření 2: ZS1



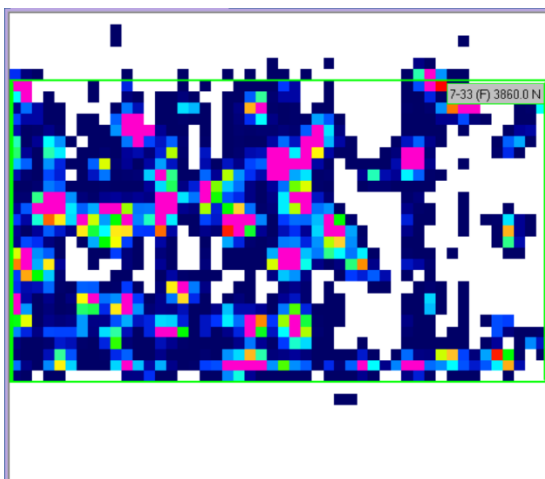
Měření 1: ZS3



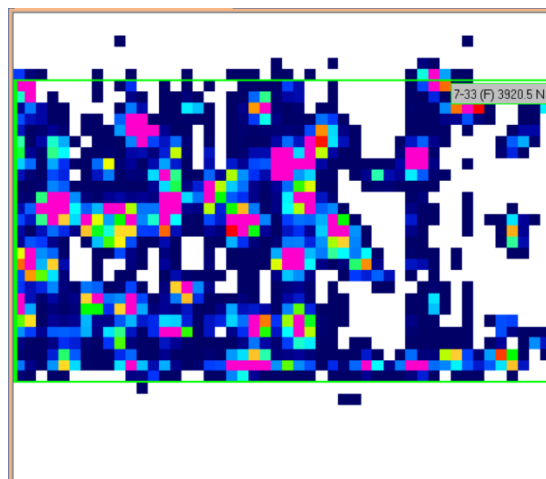
Měření 2: ZS3



Měření 1: ZS6

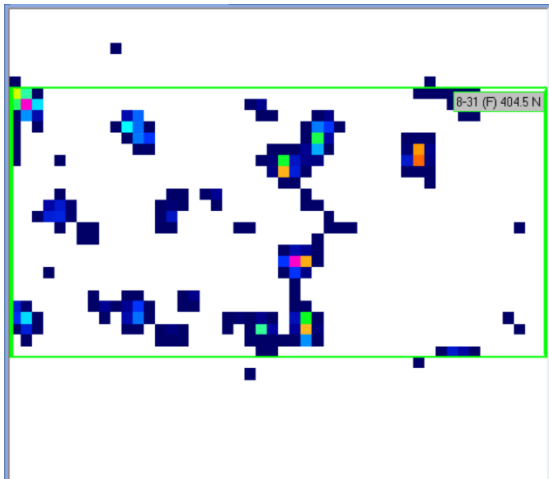


Měření 2: ZS6

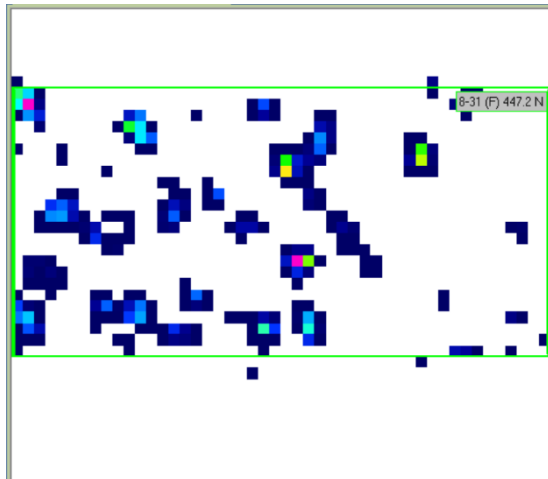


Kamenivo ostrohranné, pražec plastový, poloha 2

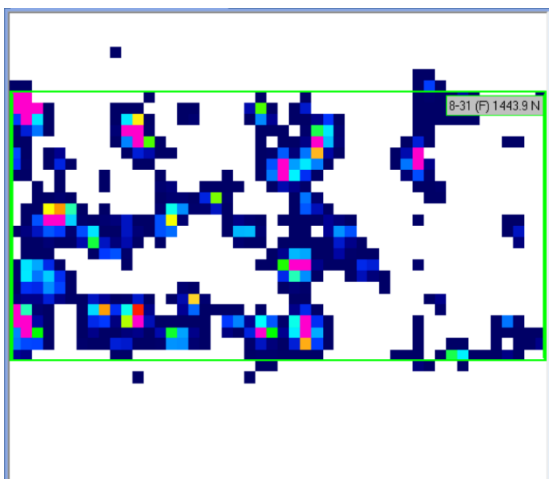
Měření 1: ZS1



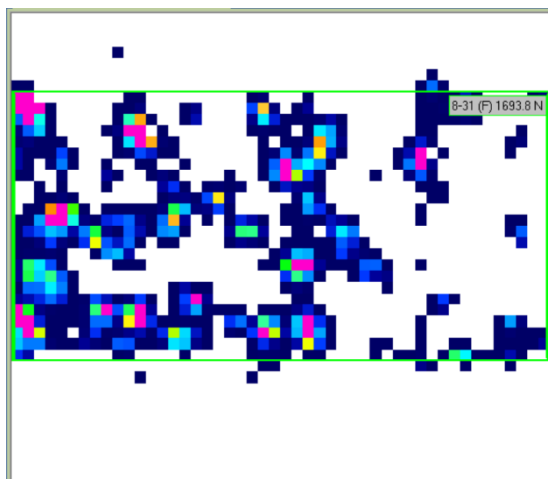
Měření 2: ZS1



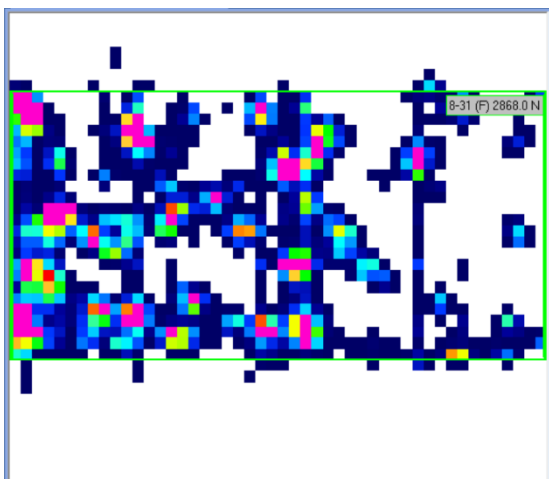
Měření 1: ZS3



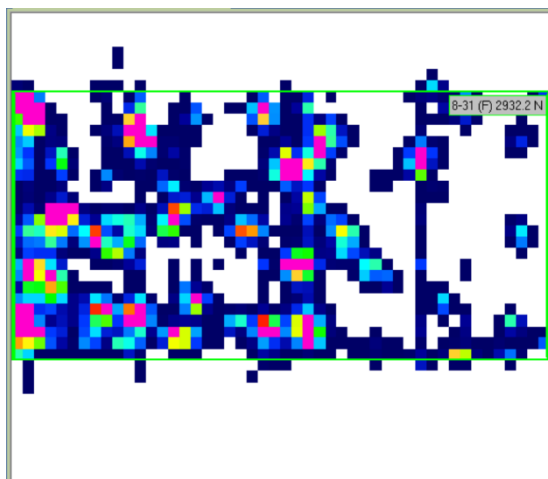
Měření 2: ZS3



Měření 1: ZS6

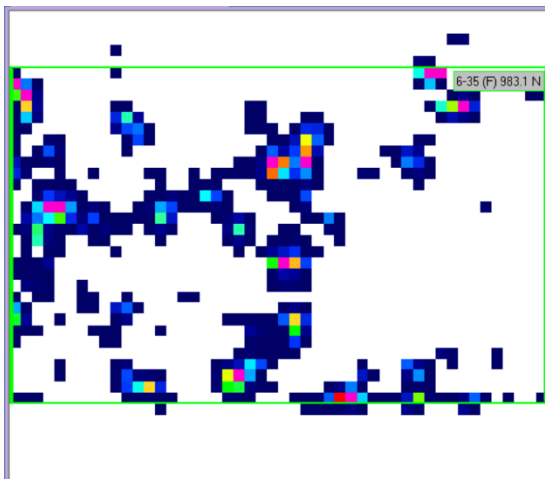


Měření 2: ZS6

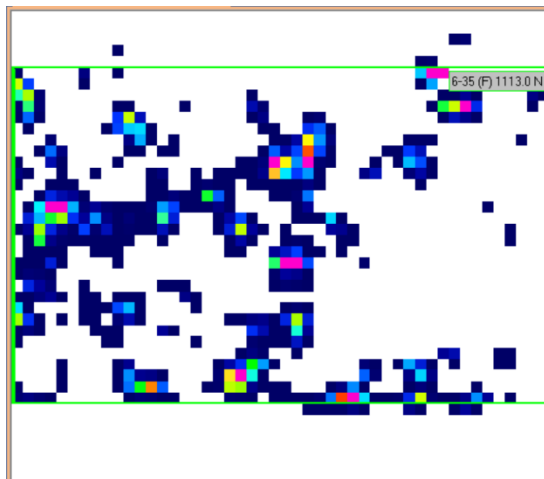


Kamenivo ostrohranné, pražec betonový, poloha 2

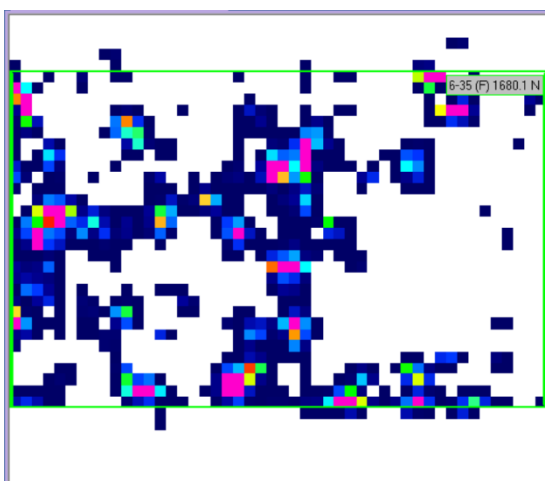
Měření 1: ZS1



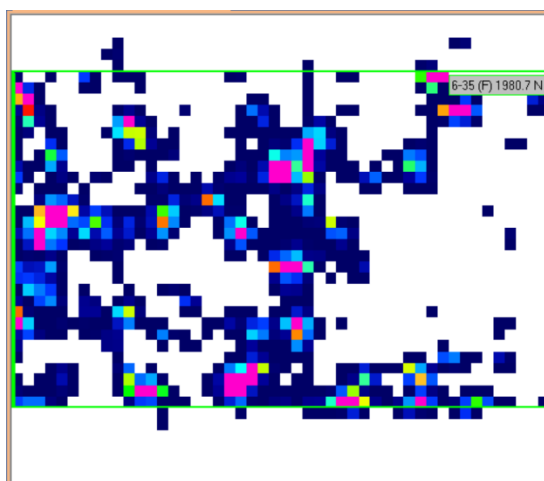
Měření 2: ZS1



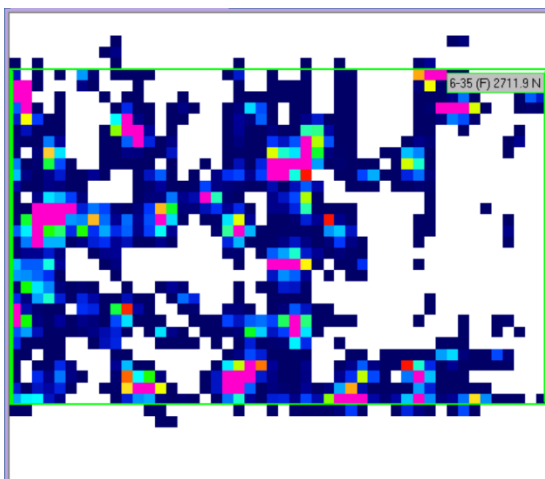
Měření 1: ZS3



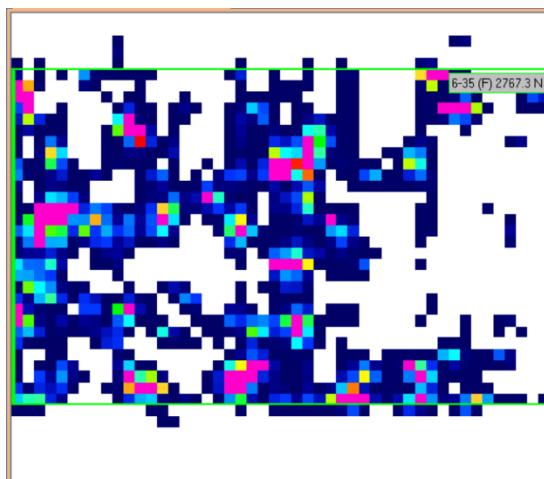
Měření 2: ZS3



Měření 1: ZS6

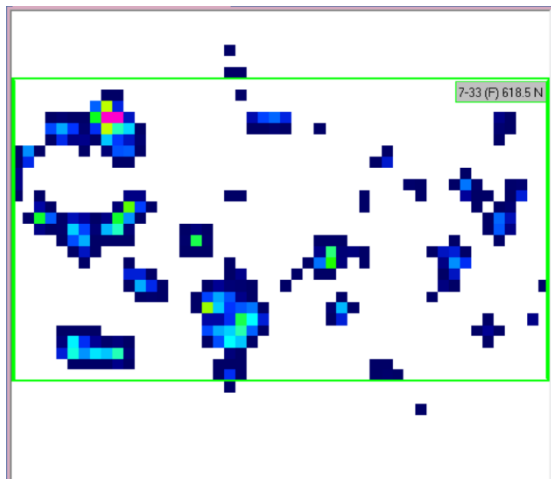


Měření 2: ZS6

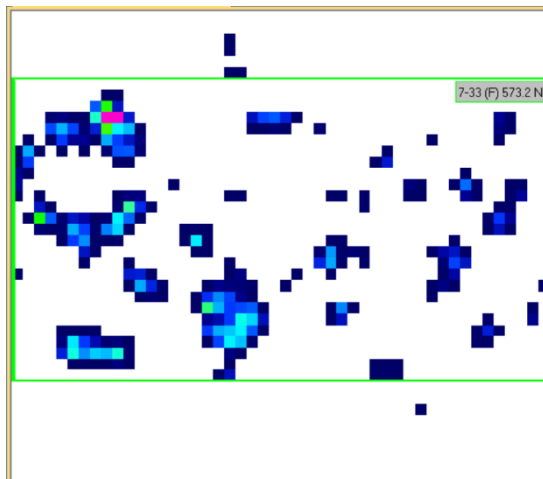


Kamenivo zaoblené, pražec dřevěný, poloha 1

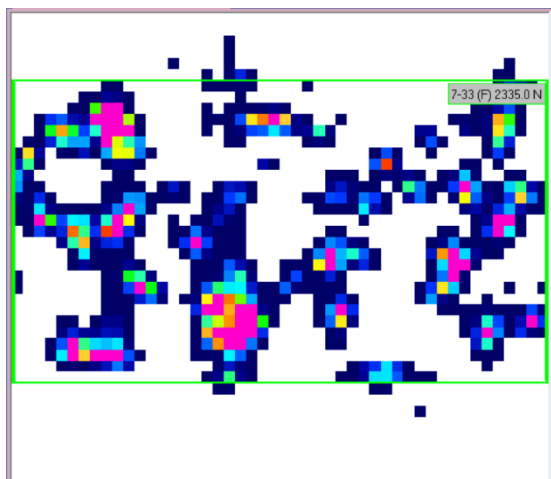
Měření 1: ZS1



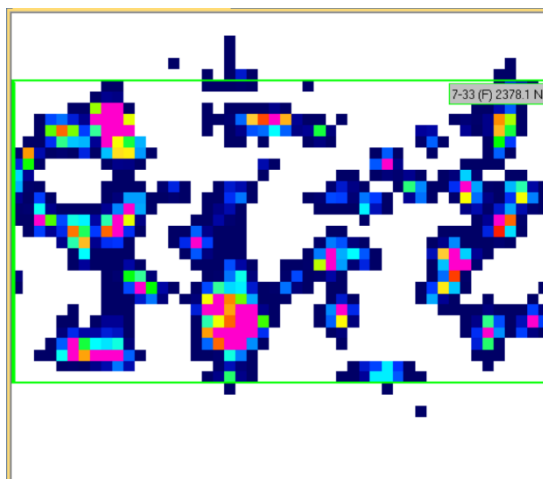
Měření 2: ZS1



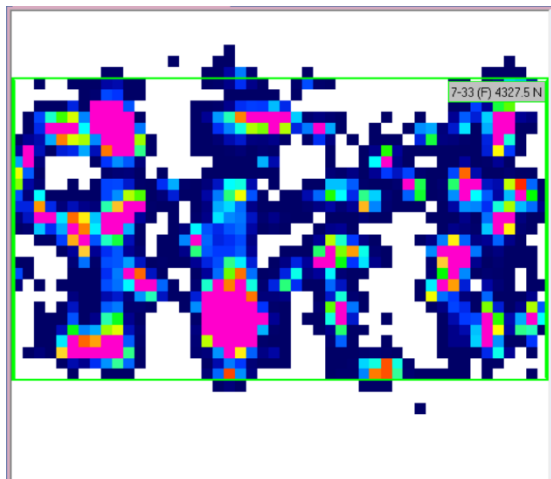
Měření 1: ZS3



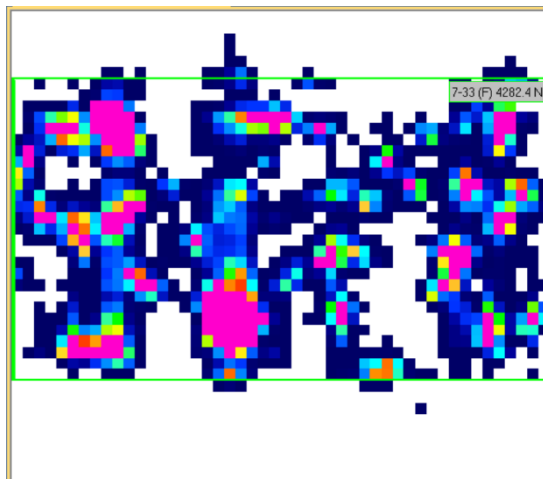
Měření 2: ZS3



Měření 1: ZS6

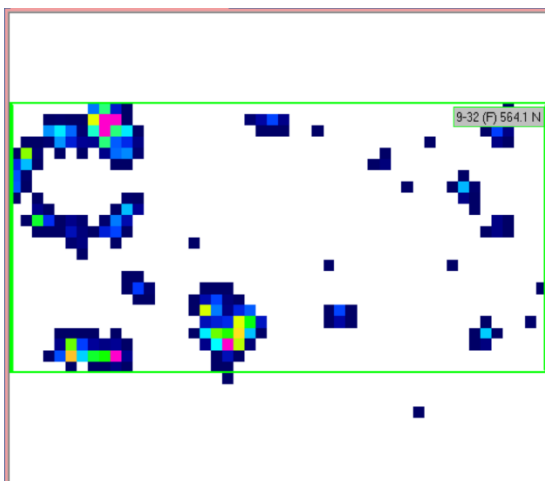


Měření 2: ZS6

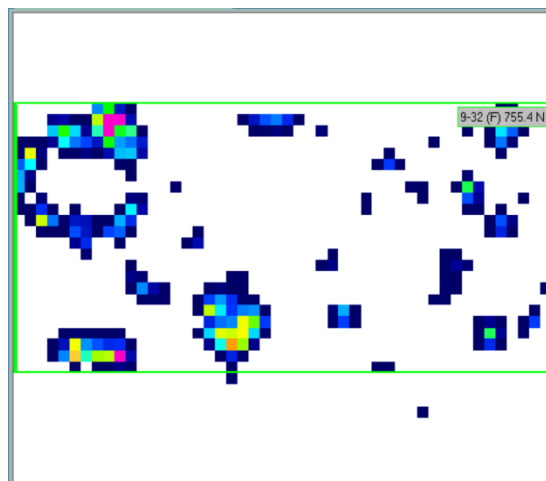


Kamenivo zaoblené, pražec plastový, poloha 1

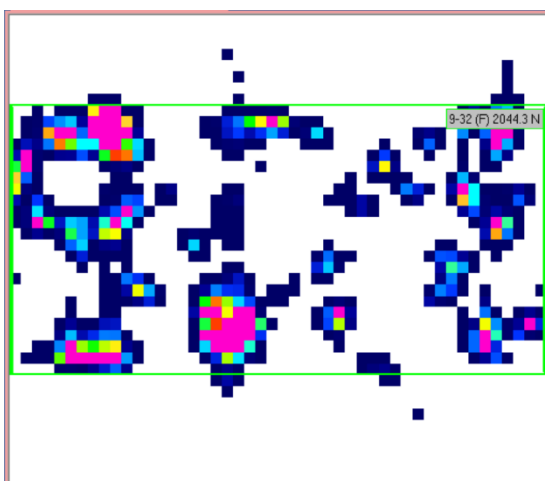
Měření 1: ZS1



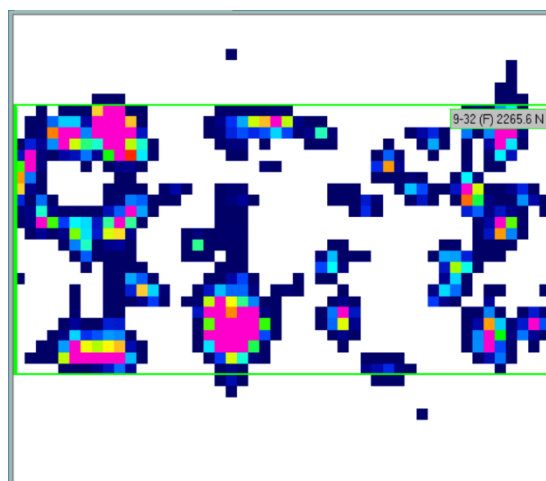
Měření 2: ZS1



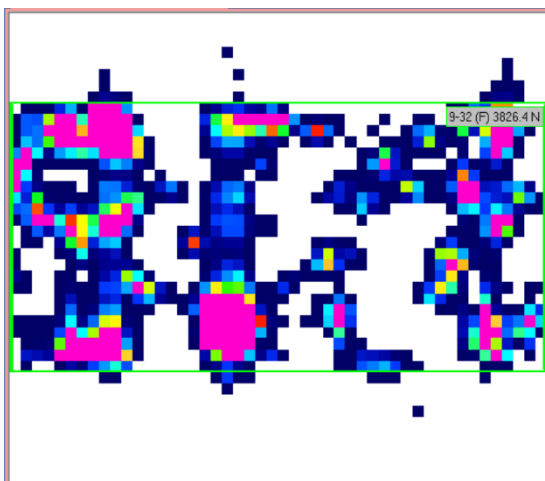
Měření 1: ZS3



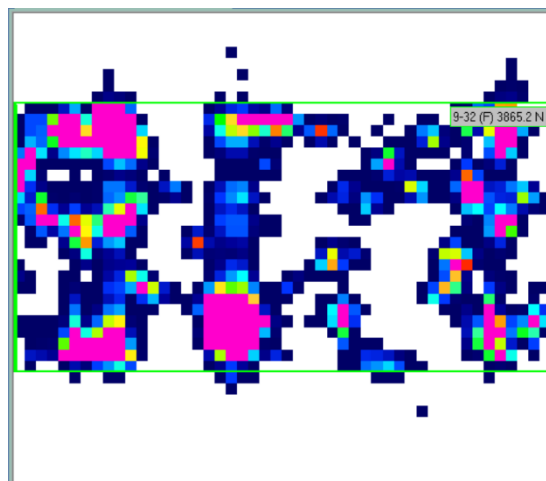
Měření 2: ZS3



Měření 1: ZS6

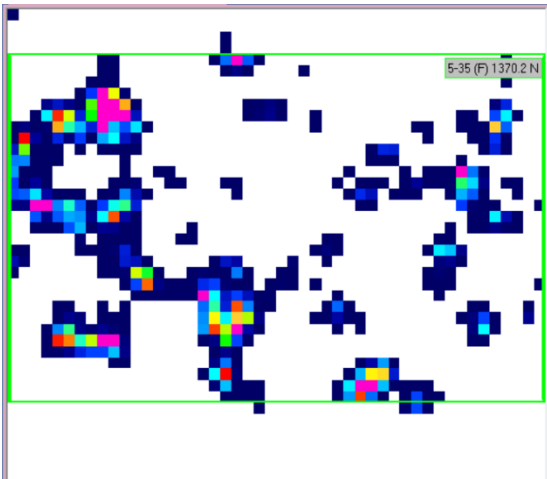


Měření 2: ZS6

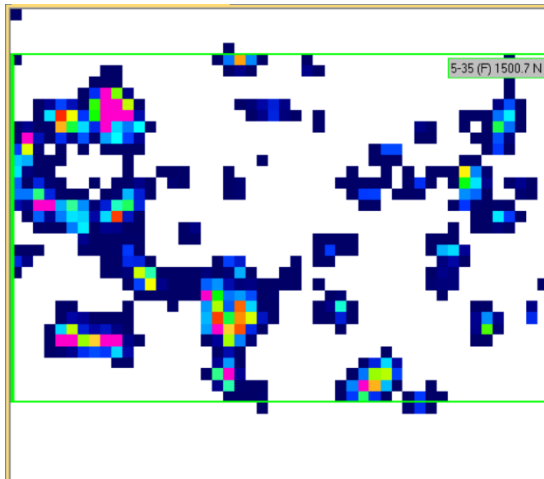


Kamenivo zaoblené, pražec betonový, poloha 1

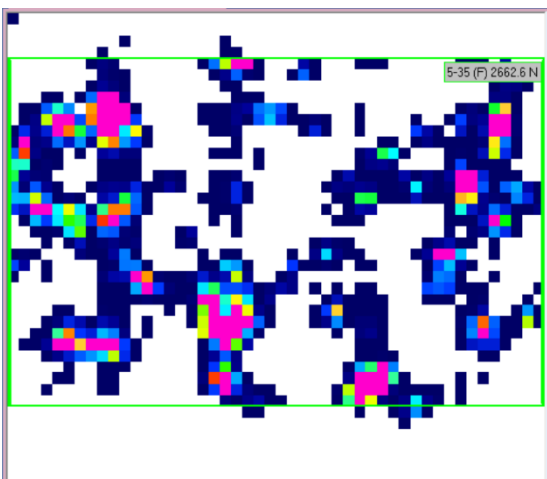
Měření 1: ZS1



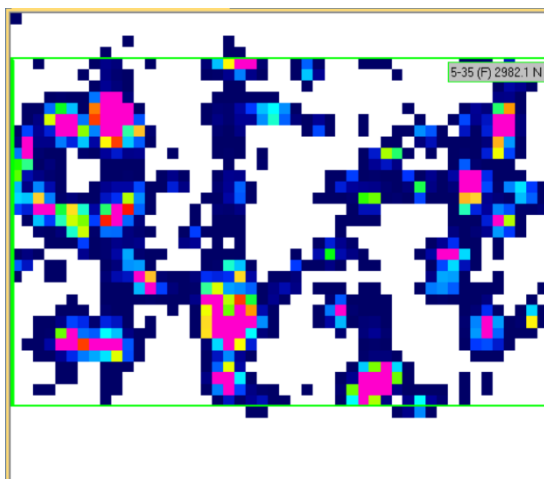
Měření 2: ZS1



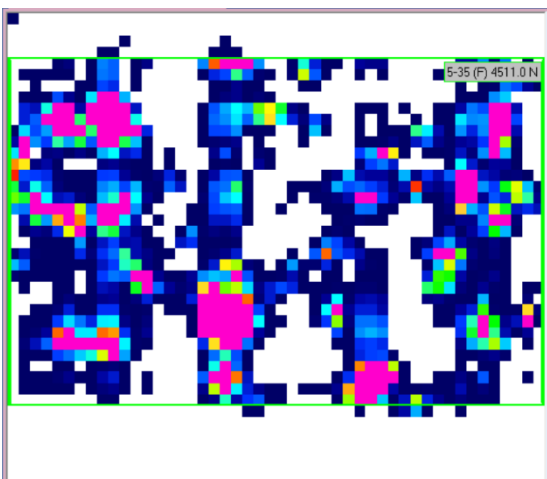
Měření 1: ZS3



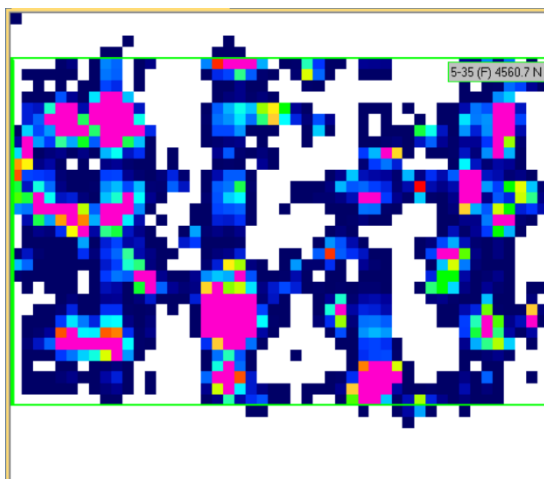
Měření 2: ZS3



Měření 1: ZS6

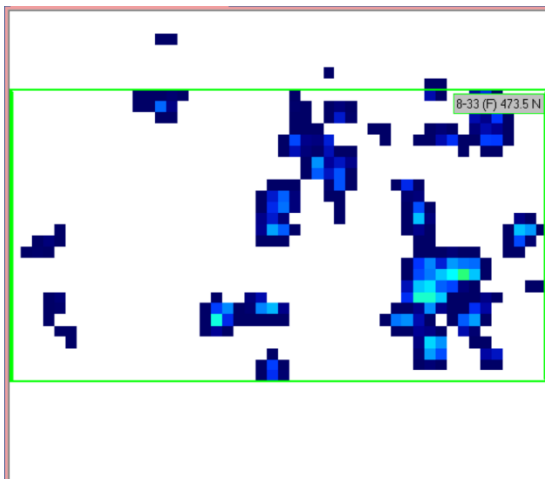


Měření 2: ZS6

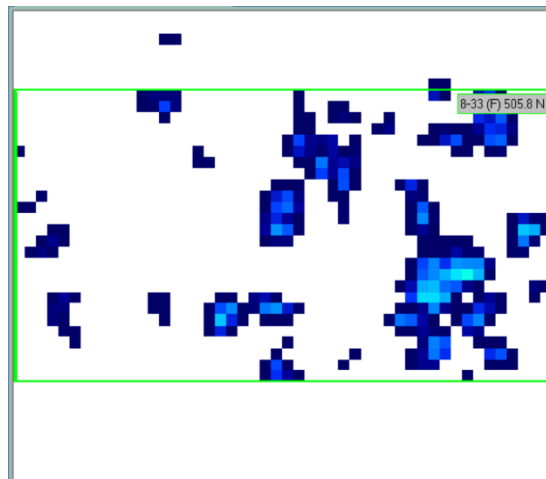


Kamenivo zaoblené, pražec dřevěný, poloha 2

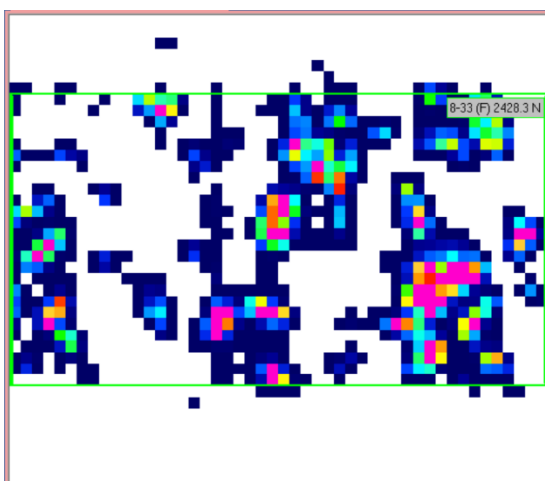
Měření 1: ZS1



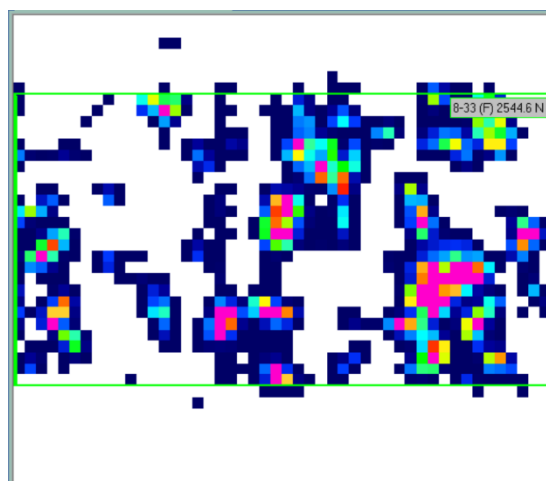
Měření 2: ZS1



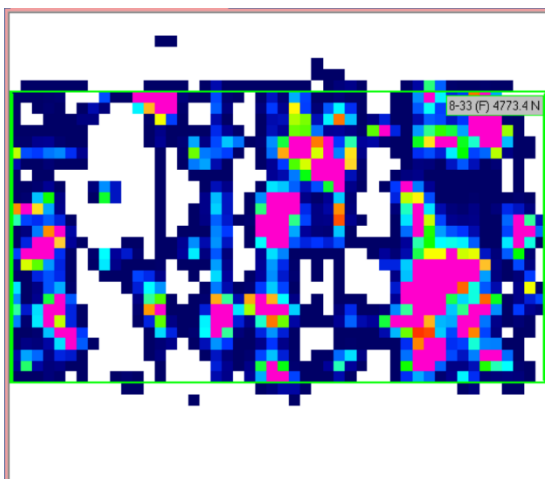
Měření 1: ZS3



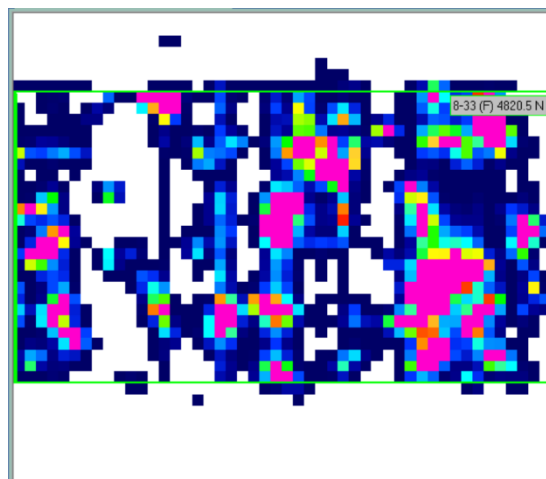
Měření 2: ZS3



Měření 1: ZS6

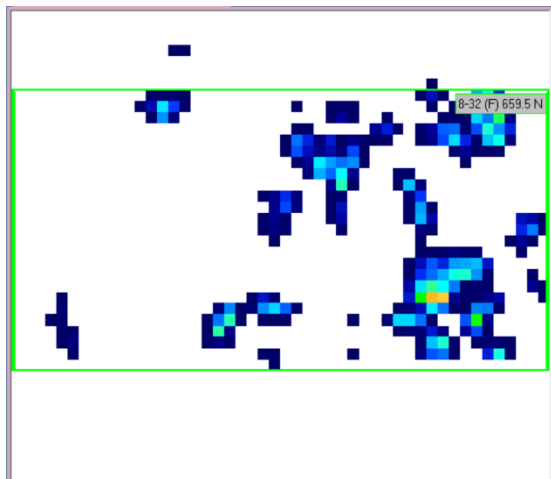


Měření 2: ZS6

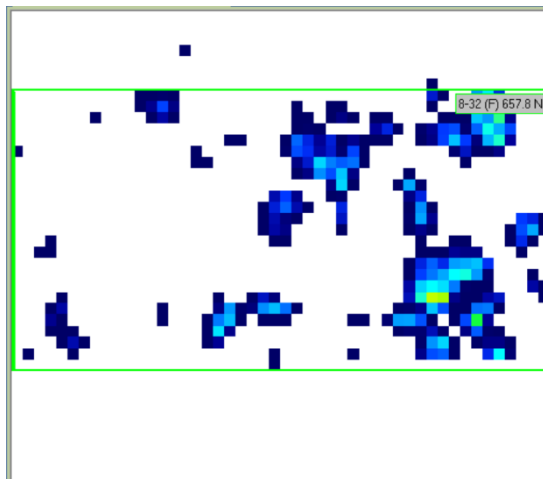


Kamenivo zaoblené, pražec plastový, poloha 2

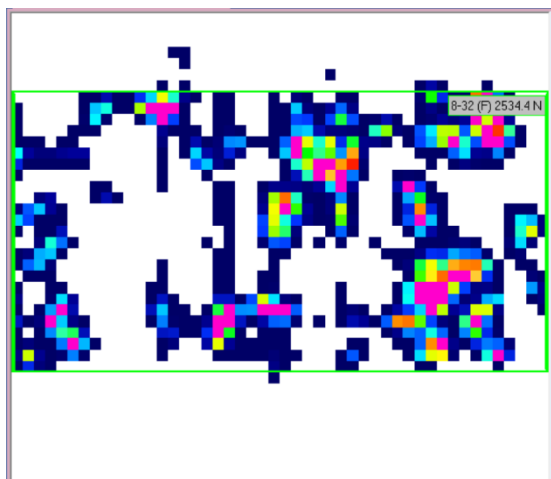
Měření 1: ZS1



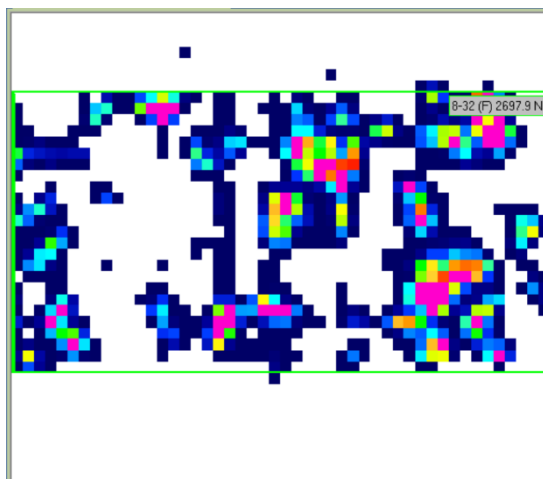
Měření 2: ZS1



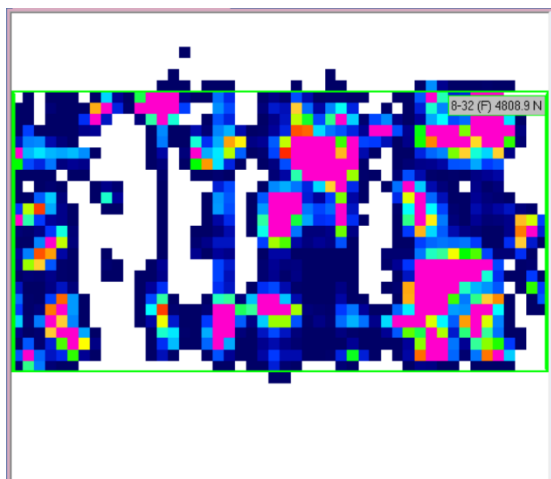
Měření 1: ZS3



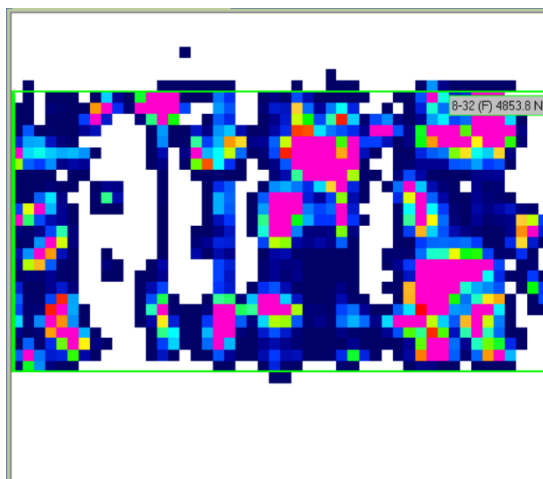
Měření 2: ZS3



Měření 1: ZS6

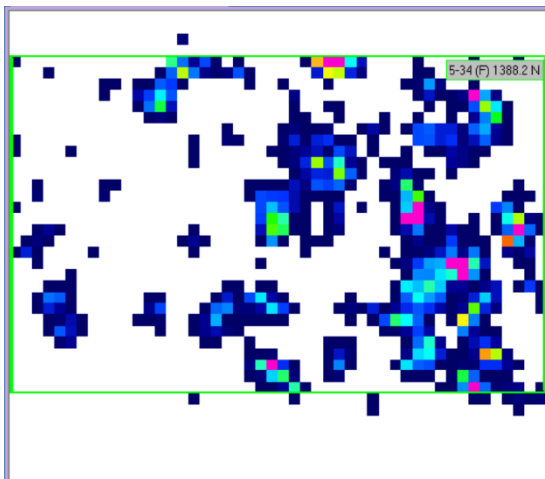


Měření 2: ZS6

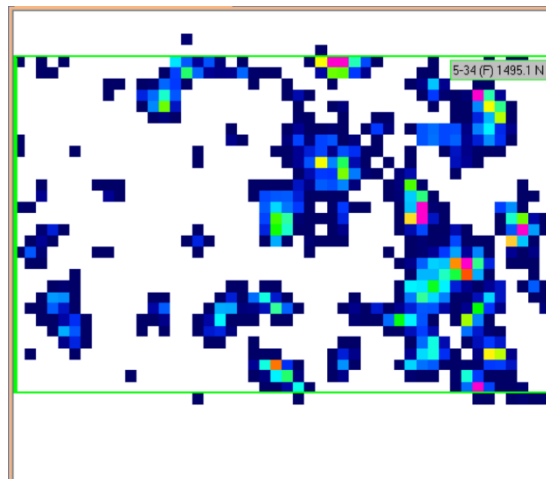


Kamenivo zaoblené, pražec betonový, poloha 2

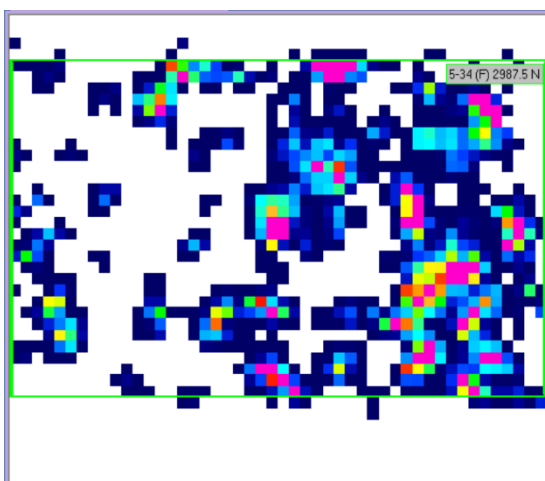
Měření 1: ZS1



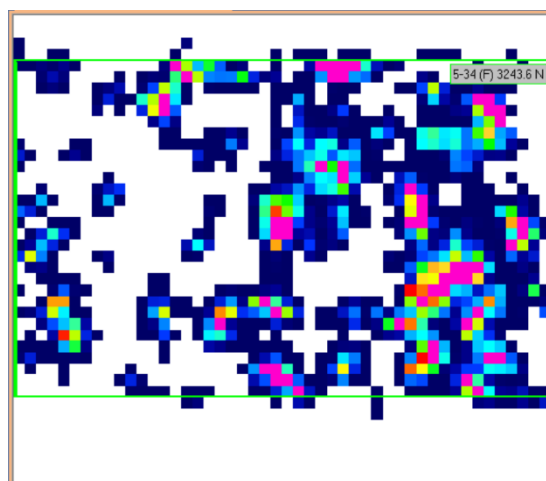
Měření 2: ZS1



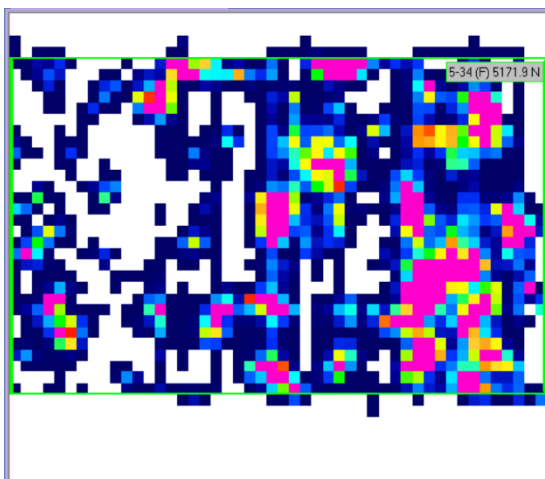
Měření 1: ZS3



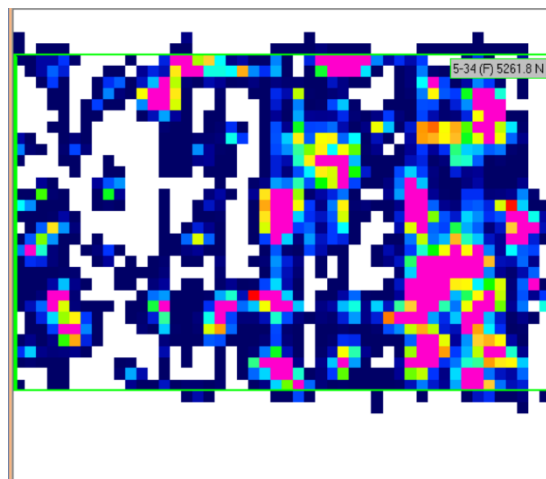
Měření 2: ZS3



Měření 1: ZS6

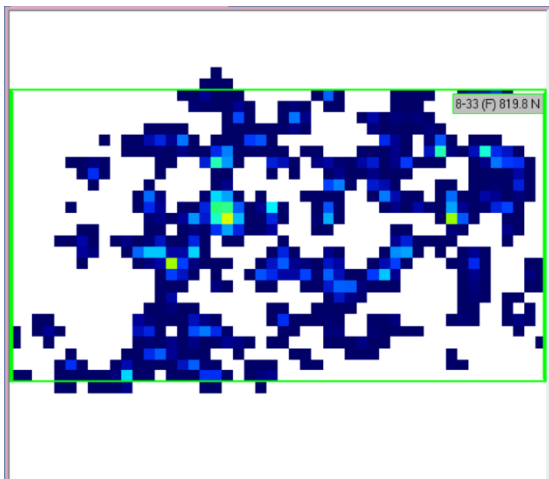


Měření 2: ZS6

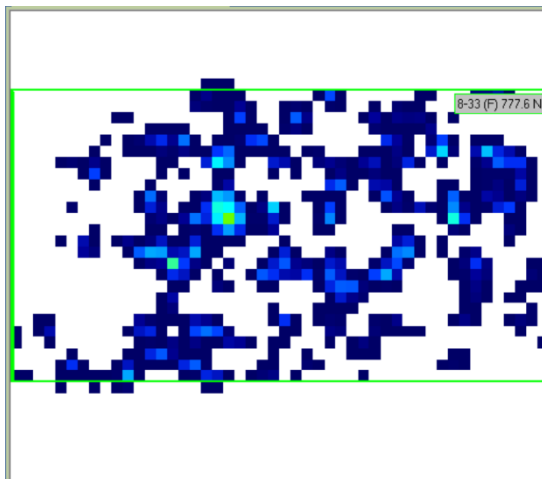


Kamenivo zaoblené znečištěné, pražec dřevěný, poloha 1

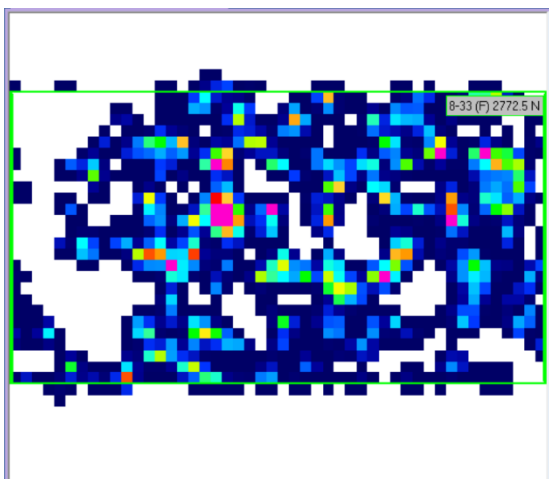
Měření 1: ZS1



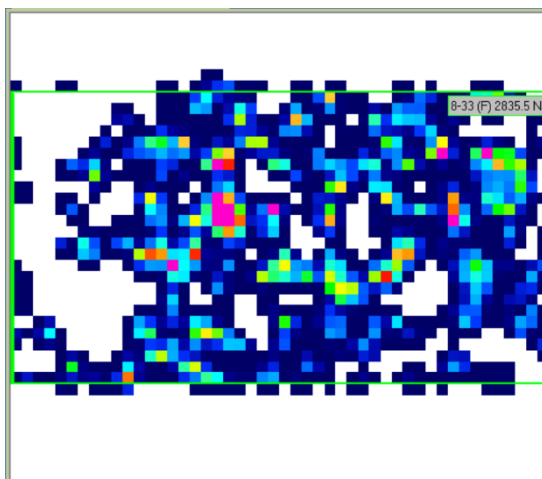
Měření 2: ZS1



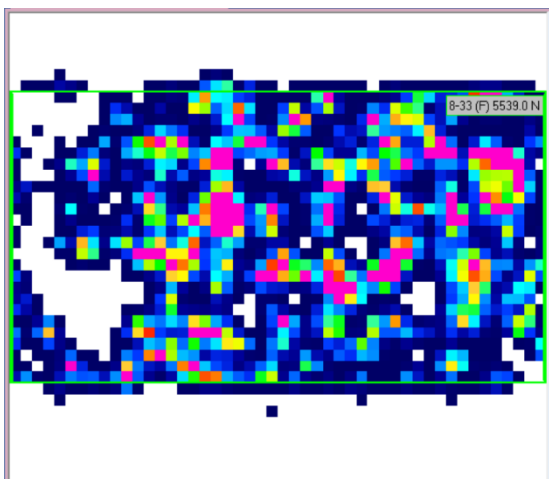
Měření 1: ZS3



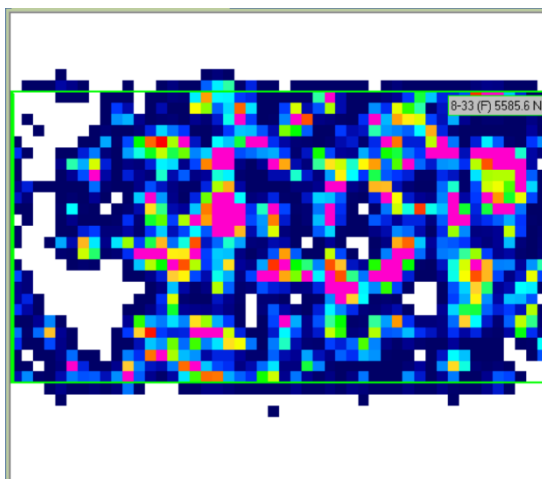
Měření 2: ZS3



Měření 1: ZS6

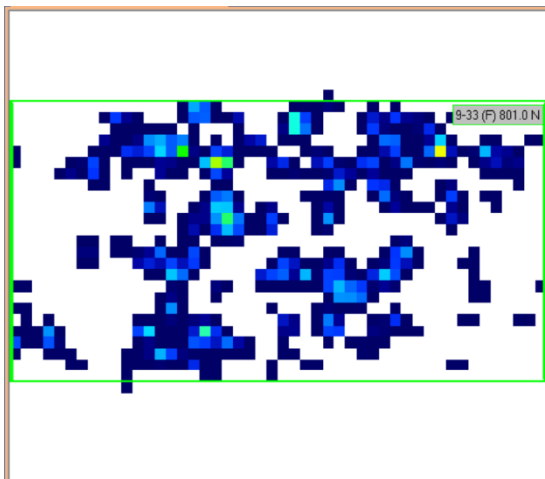


Měření 2: ZS6

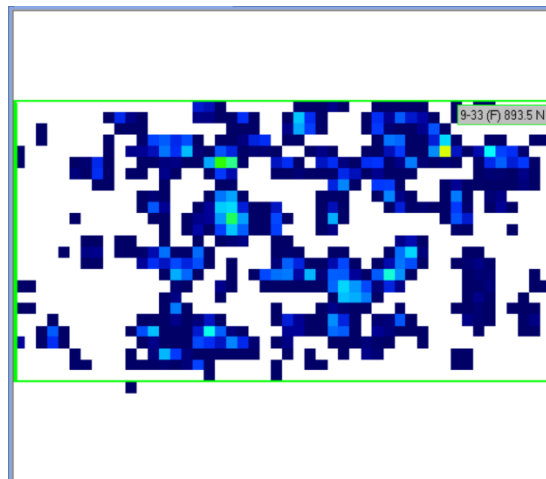


Kamenivo zaoblené znečištěné, pražec plastový, poloha 1

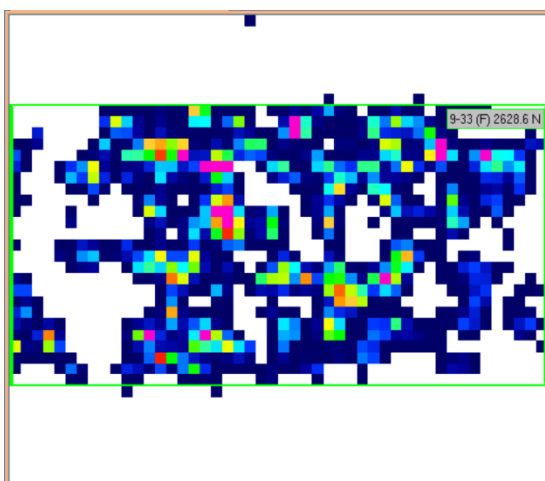
Měření 1: ZS1



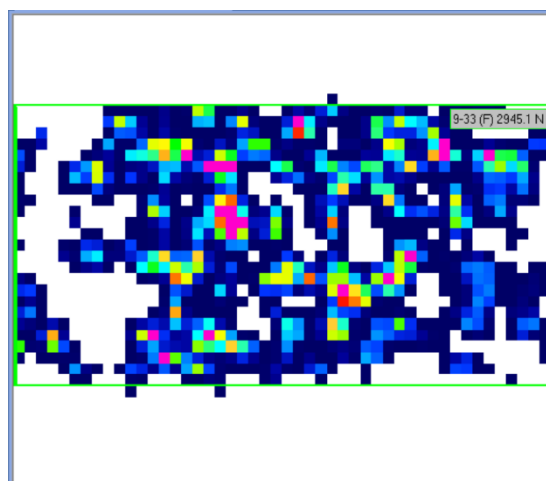
Měření 2: ZS1



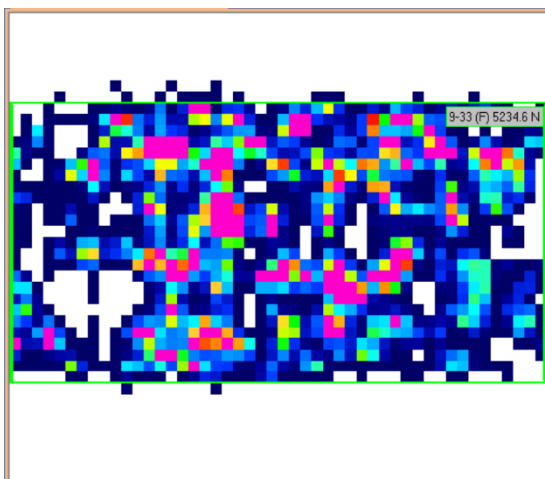
Měření 1: ZS3



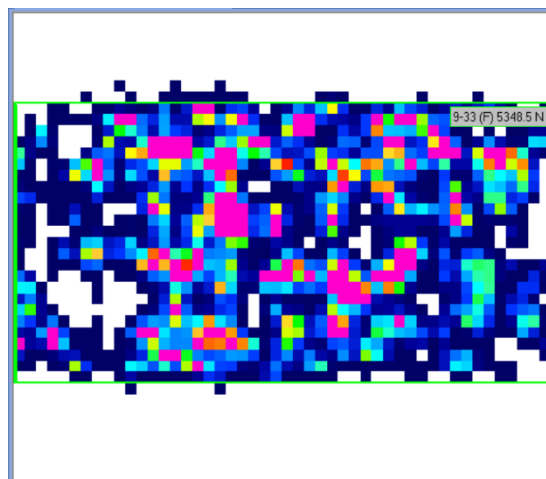
Měření 2: ZS3



Měření 1: ZS6

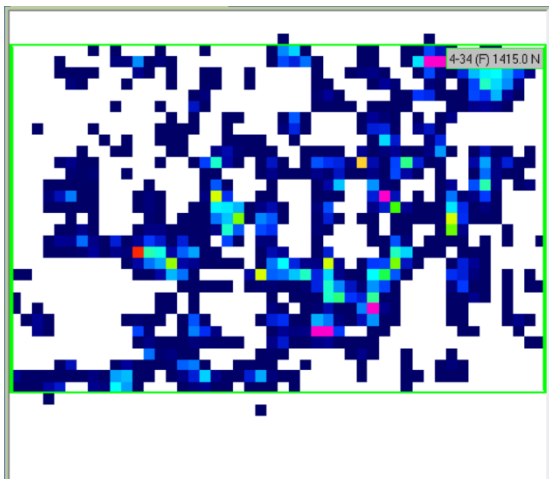


Měření 2: ZS6

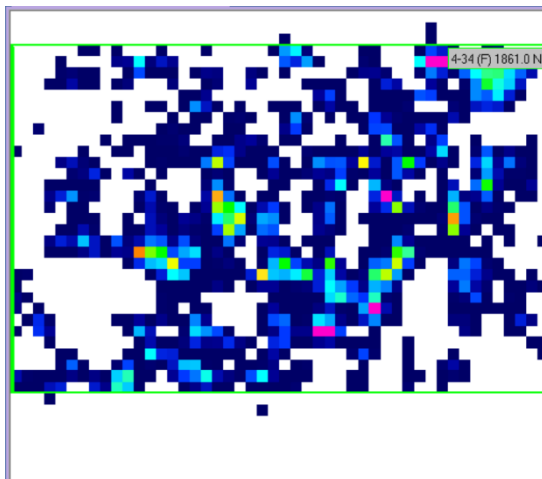


Kamenivo zaoblené znečištěné, pražec betonový, poloha 1

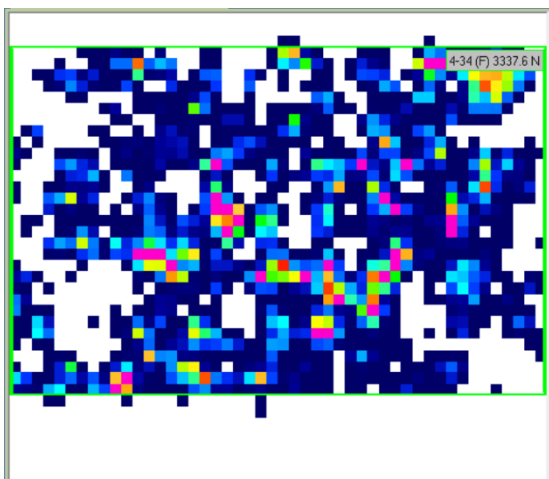
Měření 1: ZS1



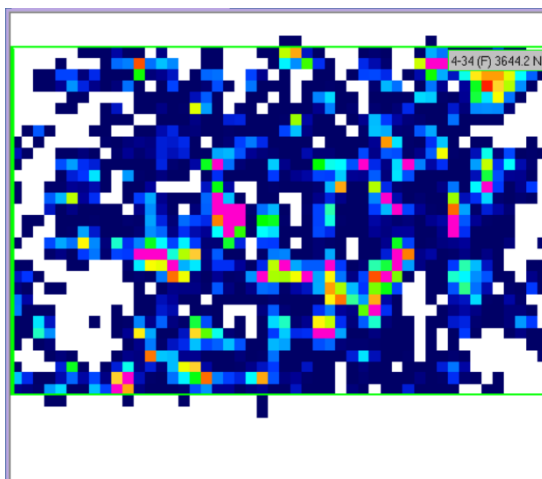
Měření 2: ZS1



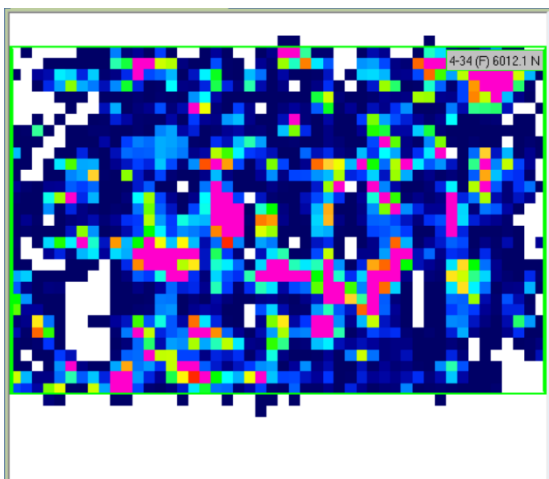
Měření 1: ZS3



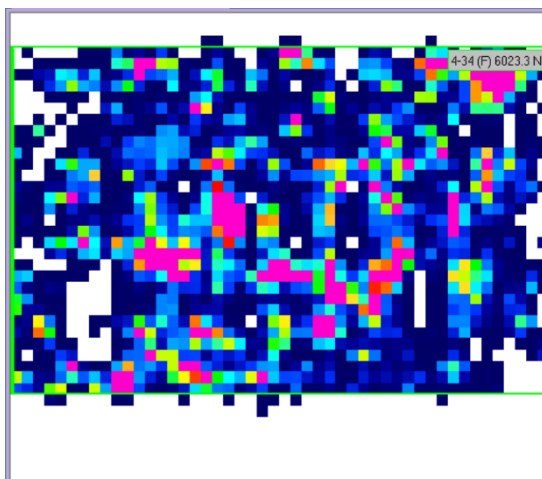
Měření 2: ZS3



Měření 1: ZS6

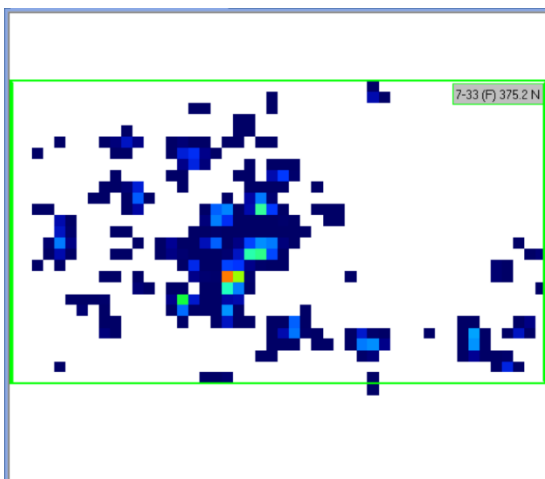


Měření 2: ZS6

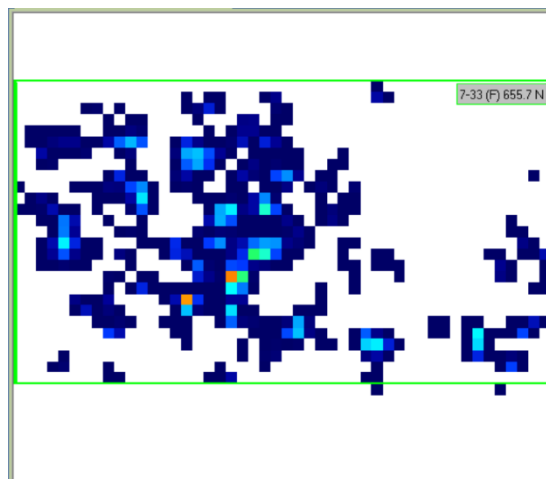


Kamenivo zaoblené znečištěné, prazec dřevěný, poloha 2

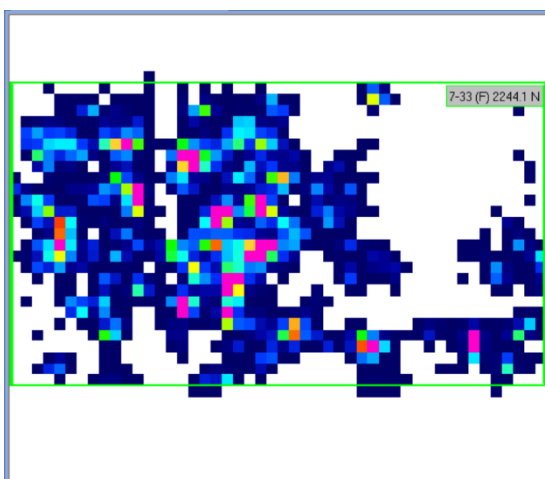
Měření 1: ZS1



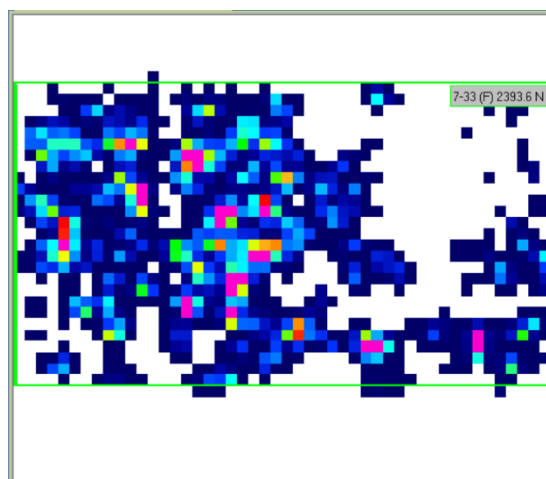
Měření 2: ZS1



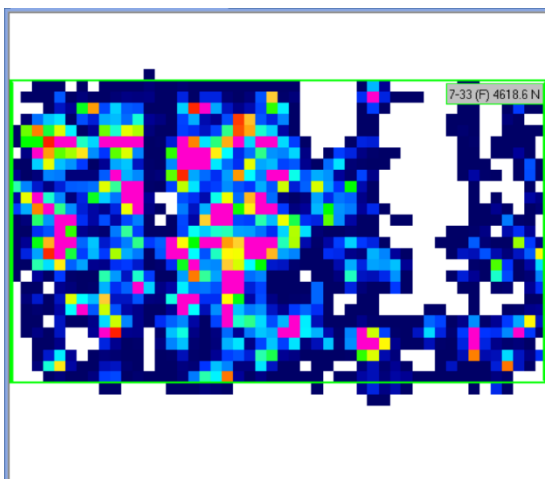
Měření 1: ZS3



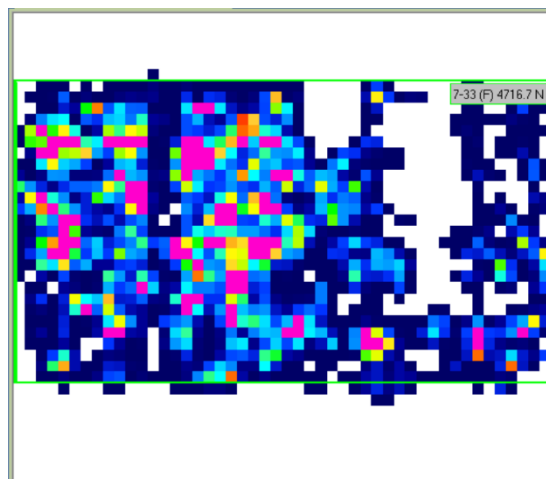
Měření 2: ZS3



Měření 1: ZS6

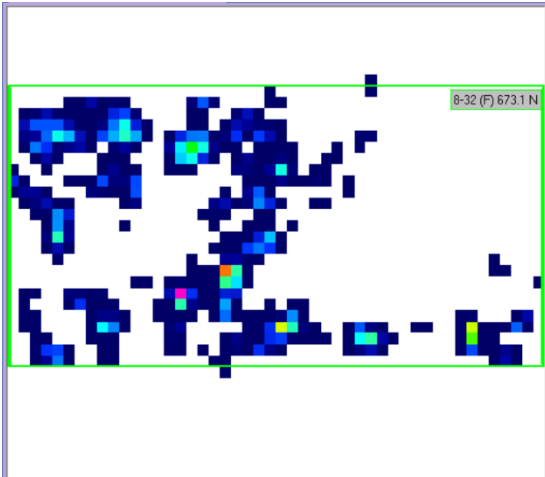


Měření 2: ZS6

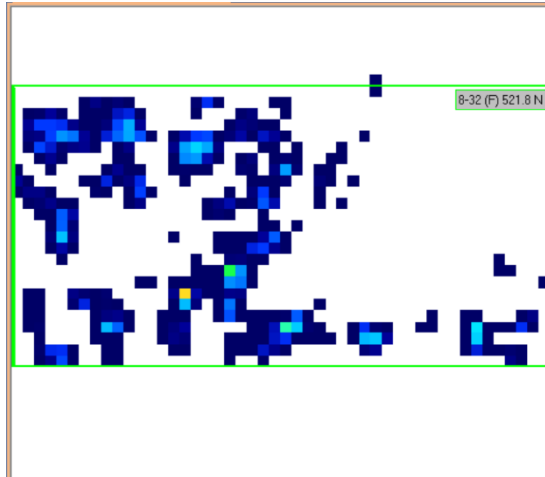


Kamenivo zaoblené znečištěné, pražec plastový, poloha 2

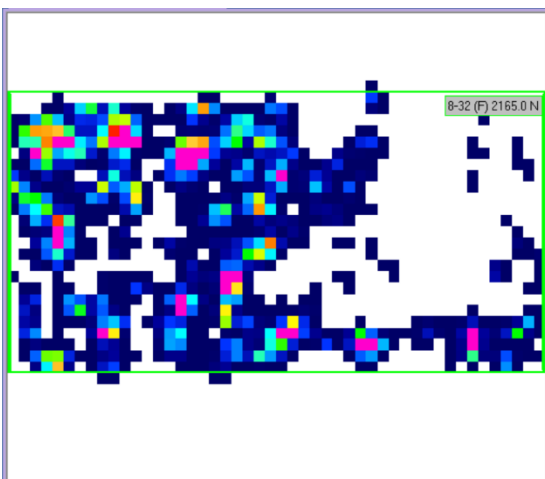
Měření 1: ZS1



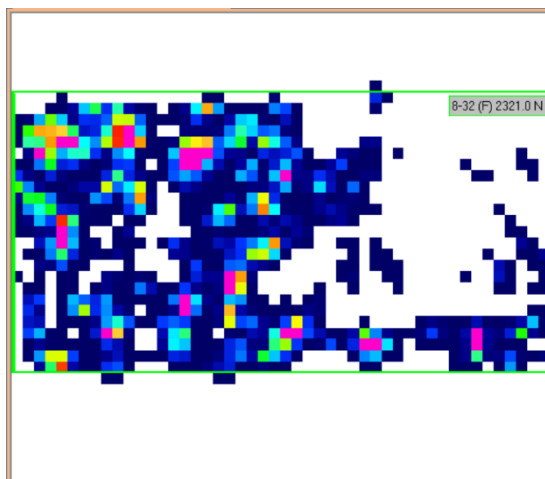
Měření 2: ZS1



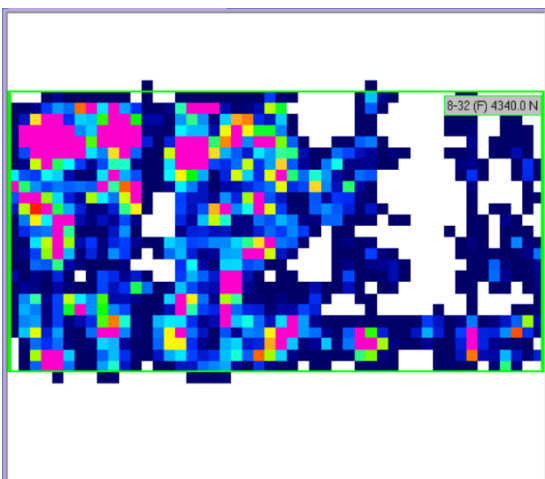
Měření 1: ZS3



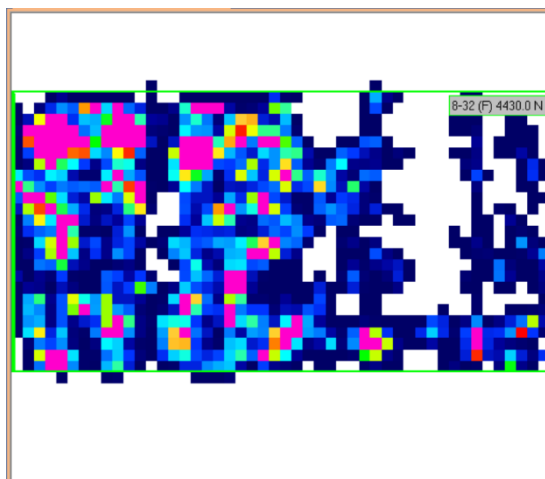
Měření 2: ZS3



Měření 1: ZS6

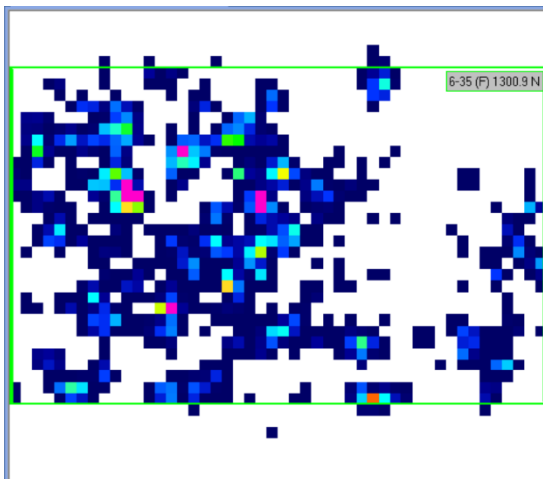


Měření 2: ZS6

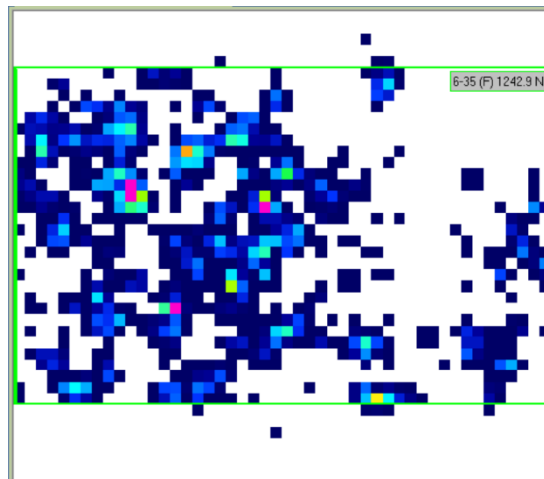


Kamenivo zaoblené znečištěné, pražec betonový, poloha 2

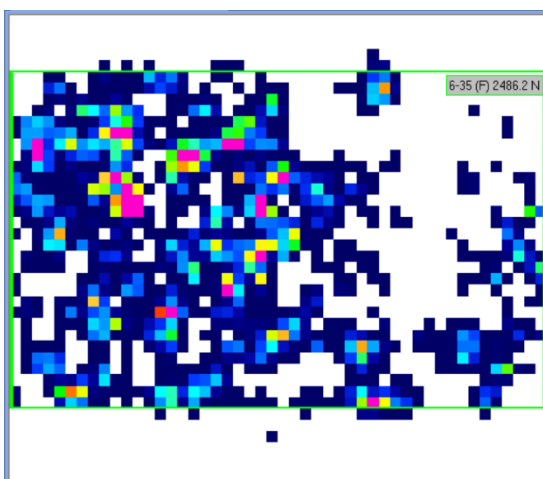
Měření 1: ZS1



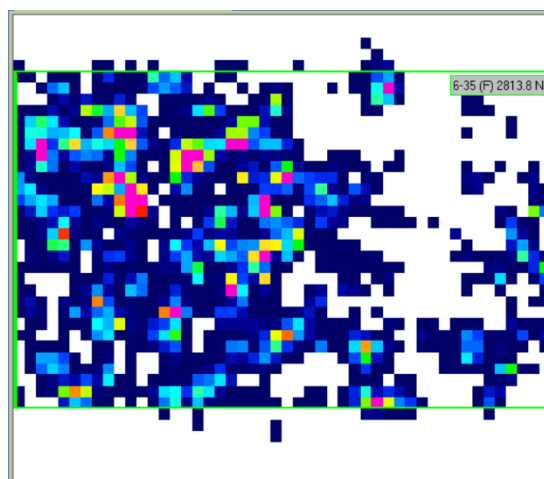
Měření 2: ZS1



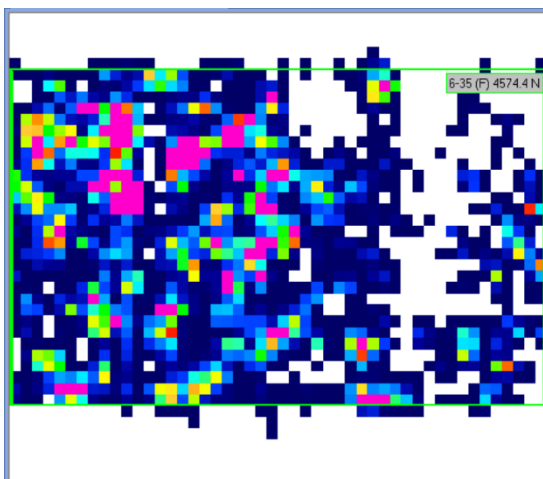
Měření 1: ZS3



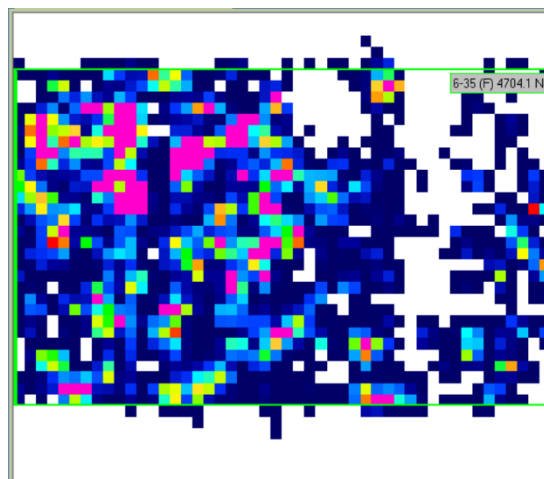
Měření 2: ZS3



Měření 1: ZS6



Měření 2: ZS6



Příloha 3: Výsledky měření

Seznam použitých symbolů

A	velikost kontaktní plochy
A_1	velikost kontaktní plochy v prvním měření
A_2	velikost kontaktní plochy ve druhém měření
A_{pr}	průměrná velikost kontaktní plochy
σ	velikost kontaktního napětí
s_x	směrodatná odchylka
v_x	variační koeficient

Výsledky měření s geometrickou šterkovou deskou

Dvě ochranné vrstvy

zatěžovací stav	Poloha A	Poloha B	Poloha C	Poloha D	Průměr	s_x	v_x
	A [cm ²]	A [cm ²]	A [cm ²]	A [cm ²]	A [cm ²]	[cm ²]	[%]
ZS1	313,00	318,00	326,00	309,00	316,50	6,34	2,00
ZS2	282,00	286,00	280,00	270,00	279,50	5,89	2,11
ZS3	231,00	245,00	229,00	213,00	229,50	11,35	4,94

zatěžovací stav	Poloha A	Poloha B	Poloha C	Poloha D	Průměr	s_x	v_x
	σ [kPa]	σ [kPa]	σ [kPa]	σ [kPa]	σ [kPa]	[kPa]	[%]
ZS1	78,37	83,47	64,99	93,02	79,96	10,12	12,65
ZS2	59,89	64,99	49,70	72,63	61,80	8,33	13,48
ZS3	44,60	47,15	36,95	54,16	45,72	6,15	13,46

Tři ochranné vrstvy

zatěžovací stav	Poloha A	Poloha B	Poloha C	Poloha D	Průměr	s_x	v_x
	A [cm ²]	A [cm ²]	A [cm ²]	A [cm ²]	A [cm ²]	[cm ²]	[%]
ZS1	352,00	377,00	362,00	388,00	369,75	13,79	3,73
ZS2	312,00	331,00	306,00	332,00	320,25	11,45	3,58
ZS3	242,00	243,00	254,00	251,00	247,50	5,12	2,07

zatěžovací stav	Poloha A	Poloha B	Poloha C	Poloha D	Průměr	s_x	v_x
	σ [kPa]	σ [kPa]	σ [kPa]	σ [kPa]	σ [kPa]	[kPa]	[%]
ZS1	61,80	74,55	63,71	64,99	66,26	4,92	7,42
ZS2	47,15	57,98	45,87	47,15	49,54	4,90	9,90
ZS3	35,04	43,33	34,41	34,41	36,80	3,78	10,27

Čtyři ochranné vrstvy

zatěžovací stav	Poloha A	Poloha B	Poloha C	Poloha D	Průměr	s_x	v_x
	A [cm ²]	A [cm ²]	A [cm ²]	A [cm ²]	A [cm ²]	[cm ²]	[%]
ZS1	558,00	482,00	460,00	473,00	493,25	38,19	7,74
ZS2	473,00	405,00	375,00	412,00	416,25	35,59	8,55
ZS3	364,00	317,00	289,00	328,00	324,50	26,87	8,28

zatěžovací stav	Poloha A	Poloha B	Poloha C	Poloha D	Průměr	s_x	v_x
	σ [kPa]	σ [kPa]	σ [kPa]	σ [kPa]	σ [kPa]	[kPa]	[%]
ZS1	50,97	57,98	47,15	48,42	51,13	4,19	8,19
ZS2	37,59	47,15	35,68	36,95	39,34	4,56	11,59
ZS3	28,67	35,68	27,40	26,76	29,63	3,56	12,02

Výsledky měření se vzorkem kameniva ostrohranného (po ořezu dat)

Poloha 1, pražec dřevěný								
	A ₁ [cm ²]	A ₁ [%]	A ₂ [cm ²]	A ₂ [%]	A _{pr} [cm ²]	A _{pr} [%]	s _x [cm ²]	v _x [%]
ZS1	218	16,3%	254	19,0%	236	17,6%	18,06	7,66
ZS2	381	28,5%	423	31,6%	402	30,1%	21,16	5,26
ZS3	534	39,9%	582	43,5%	558	41,7%	24,26	4,35
ZS4	678	50,7%	718	53,7%	698	52,2%	20,13	2,88
ZS5	787	58,8%	845	63,2%	816	61,0%	29,42	3,61
ZS6	860	64,3%	872	65,2%	866	64,7%	6,19	0,72

Poloha 1, pražec plastový								
	A ₁ [cm ²]	A ₁ [%]	A ₂ [cm ²]	A ₂ [%]	A _{pr} [cm ²]	A _{pr} [%]	s _x [cm ²]	v _x [%]
ZS1	210	17,6%	255	21,4%	232	19,5%	22,71	9,78
ZS2	379	31,9%	419	35,2%	399	33,6%	20,13	5,05
ZS3	527	44,4%	598	50,3%	563	47,3%	35,10	6,24
ZS4	641	53,9%	671	56,4%	656	55,2%	14,97	2,28
ZS5	714	60,1%	735	61,8%	725	60,9%	10,32	1,42
ZS6	789	66,3%	789	66,3%	789	66,3%	0,00	0,00

Poloha 1, pražec betonový								
	A ₁ [cm ²]	A ₁ [%]	A ₂ [cm ²]	A ₂ [%]	A _{pr} [cm ²]	A _{pr} [%]	s _x [cm ²]	v _x [%]
ZS1	520	35,0%	519	34,9%	520	35,0%	0,52	0,10
ZS2	646	43,5%	690	46,4%	668	44,9%	21,68	3,25
ZS3	786	52,8%	820	55,1%	803	54,0%	17,03	2,12
ZS4	878	59,1%	918	61,7%	898	60,4%	19,61	2,18
ZS5	966	65,0%	1 000	67,3%	983	66,1%	17,03	1,73
ZS6	1 047	70,4%	1 055	71,0%	1 051	70,7%	4,13	0,39

Poloha 2, pražec dřevěný								
	A ₁ [cm ²]	A ₁ [%]	A ₂ [cm ²]	A ₂ [%]	A _{pr} [cm ²]	A _{pr} [%]	s _x [cm ²]	v _x [%]
ZS1	249	18,6%	311	23,2%	280	20,9%	30,97	11,07
ZS2	497	37,1%	513	38,3%	505	37,7%	8,26	1,64
ZS3	646	48,3%	684	51,2%	665	49,7%	19,10	2,87
ZS4	801	59,9%	834	62,3%	818	61,1%	16,52	2,02
ZS5	894	66,8%	923	69,0%	908	67,9%	14,45	1,59
ZS6	960	71,8%	977	73,0%	968	72,4%	8,26	0,85

Poloha 2, pražec plastový								
	A ₁ [cm ²]	A ₁ [%]	A ₂ [cm ²]	A ₂ [%]	A _{pr} [cm ²]	A _{pr} [%]	s _x [cm ²]	v _x [%]
ZS1	203	17,1%	260	21,9%	232	19,5%	28,39	12,25
ZS2	399	33,6%	444	37,3%	422	35,5%	22,19	5,26
ZS3	509	42,8%	570	47,9%	539	45,4%	30,45	5,65
ZS4	610	51,3%	646	54,3%	628	52,8%	18,06	2,88
ZS5	681	57,3%	700	58,9%	691	58,1%	9,29	1,35
ZS6	731	61,5%	750	63,1%	741	62,3%	9,81	1,32

Poloha 2, pražec betonový								
	A ₁ [cm ²]	A ₁ [%]	A ₂ [cm ²]	A ₂ [%]	A _{pr} [cm ²]	A _{pr} [%]	s _x [cm ²]	v _x [%]
ZS1	427	28,8%	481	32,4%	454	30,6%	26,84	5,91
ZS2	530	35,6%	608	40,9%	569	38,3%	39,23	6,90
ZS3	607	40,8%	696	46,8%	651	43,8%	44,39	6,81
ZS4	707	47,6%	754	50,7%	730	49,1%	23,23	3,18
ZS5	783	52,7%	817	54,9%	800	53,8%	16,52	2,06
ZS6	849	57,1%	854	57,4%	851	57,3%	2,58	0,30

Výsledky měření se vzorkem kameniva zaobleného (po ořezu dat)

Poloha 1, pražec dřevěný								
	A ₁ [cm ²]	A ₁ [%]	A ₂ [cm ²]	A ₂ [%]	A _{pr} [cm ²]	A _{pr} [%]	s _x [cm ²]	v _x [%]
ZS1	279	20,8%	280	20,9%	279	20,9%	0,52	0,18
ZS2	476	35,6%	485	36,3%	481	35,9%	4,65	0,97
ZS3	643	48,1%	637	47,6%	640	47,8%	3,10	0,48
ZS4	774	57,9%	787	58,8%	780	58,3%	6,19	0,79
ZS5	890	66,5%	892	66,7%	891	66,6%	1,03	0,12
ZS6	967	72,3%	962	71,9%	965	72,1%	2,58	0,27

Poloha 1, pražec plastový								
	A ₁ [cm ²]	A ₁ [%]	A ₂ [cm ²]	A ₂ [%]	A _{pr} [cm ²]	A _{pr} [%]	s _x [cm ²]	v _x [%]
ZS1	206	17,4%	268	22,6%	237	20,0%	30,97	13,04
ZS2	390	32,8%	425	35,8%	408	34,3%	17,55	4,30
ZS3	536	45,1%	574	48,3%	555	46,7%	19,10	3,44
ZS4	634	53,3%	662	55,6%	648	54,5%	13,94	2,15
ZS5	715	60,2%	741	62,3%	728	61,2%	12,90	1,77
ZS6	774	65,1%	786	66,1%	780	65,6%	5,68	0,73

Poloha 1, pražec betonový								
	A ₁ [cm ²]	A ₁ [%]	A ₂ [cm ²]	A ₂ [%]	A _{pr} [cm ²]	A _{pr} [%]	s _x [cm ²]	v _x [%]
ZS1	478	31,1%	509	33,1%	493	32,1%	15,48	3,14
ZS2	611	39,8%	707	46,0%	659	42,9%	48,00	7,28
ZS3	763	49,7%	833	54,2%	798	51,9%	35,10	4,40
ZS4	866	56,4%	930	60,6%	898	58,5%	32,00	3,56
ZS5	977	63,6%	1 005	65,5%	991	64,5%	14,45	1,46
ZS6	1 048	68,2%	1 064	69,3%	1 056	68,8%	8,26	0,78

Poloha 2, pražec dřevěný								
	A ₁ [cm ²]	A ₁ [%]	A ₂ [cm ²]	A ₂ [%]	A _{pr} [cm ²]	A _{pr} [%]	s _x [cm ²]	v _x [%]
ZS1	269	20,9%	303	23,6%	286	22,2%	17,03	5,95
ZS2	508	39,4%	529	41,0%	518	40,2%	10,32	1,99
ZS3	675	52,4%	689	53,4%	682	52,9%	6,71	0,98
ZS4	807	62,7%	819	63,5%	813	63,1%	5,68	0,70
ZS5	898	69,7%	908	70,5%	903	70,1%	5,16	0,57
ZS6	990	76,8%	994	77,2%	992	77,0%	2,06	0,21

Poloha 2, pražec plastový								
	A ₁ [cm ²]	A ₁ [%]	A ₂ [cm ²]	A ₂ [%]	A _{pr} [cm ²]	A _{pr} [%]	s _x [cm ²]	v _x [%]
ZS1	280	22,6%	303	24,5%	292	23,5%	11,87	4,07
ZS2	490	39,6%	510	41,2%	500	40,4%	9,81	1,96
ZS3	660	53,3%	692	55,8%	676	54,5%	16,00	2,37
ZS4	793	64,0%	811	65,5%	802	64,8%	9,29	1,16
ZS5	891	71,9%	893	72,1%	892	72,0%	1,03	0,12
ZS6	941	76,0%	948	76,5%	945	76,3%	3,10	0,33

Poloha 2, pražec betonový								
	A ₁ [cm ²]	A ₁ [%]	A ₂ [cm ²]	A ₂ [%]	A _{pr} [cm ²]	A _{pr} [%]	s _x [cm ²]	v _x [%]
ZS1	557	37,5%	576	38,8%	567	38,1%	9,29	1,64
ZS2	694	46,7%	753	50,6%	723	48,6%	29,42	4,07
ZS3	827	55,6%	877	59,0%	852	57,3%	25,29	2,97
ZS4	937	63,1%	990	66,6%	964	64,8%	26,32	2,73
ZS5	1 031	69,4%	1 068	71,9%	1 050	70,6%	18,58	1,77
ZS6	1 106	74,4%	1 123	75,6%	1 114	75,0%	8,77	0,79

Výsledky měření se vzorkem kameniva zaobleného znečištěného (po ořezu dat)

Poloha 1, pražec dřevěný								
	A ₁ [cm ²]	A ₁ [%]	A ₂ [cm ²]	A ₂ [%]	A _{pr} [cm ²]	A _{pr} [%]	s _x [cm ²]	v _x [%]
ZS1	581	45,1%	563	43,7%	572	44,4%	9,29	1,62
ZS2	768	59,6%	795	61,7%	781	60,7%	13,42	1,72
ZS3	962	74,7%	966	75,0%	964	74,8%	2,06	0,21
ZS4	1 039	80,7%	1 057	82,1%	1 048	81,4%	8,77	0,84
ZS5	1 098	85,3%	1 111	86,2%	1 105	85,7%	6,19	0,56
ZS6	1 142	88,6%	1 145	88,9%	1 143	88,7%	1,55	0,14
Poloha 1, pražec plastový								
	A ₁ [cm ²]	A ₁ [%]	A ₂ [cm ²]	A ₂ [%]	A _{pr} [cm ²]	A _{pr} [%]	s _x [cm ²]	v _x [%]
ZS1	512	41,3%	558	45,1%	535	43,2%	23,23	4,34
ZS2	711	57,4%	749	60,5%	730	59,0%	19,10	2,61
ZS3	840	67,8%	910	73,5%	875	70,7%	35,10	4,01
ZS4	947	76,4%	985	79,5%	966	78,0%	19,10	1,98
ZS5	1 020	82,3%	1 050	84,8%	1 035	83,5%	14,97	1,45
ZS6	1 082	87,3%	1 102	89,0%	1 092	88,2%	10,32	0,95
Poloha 1, pražec betonový								
	A ₁ [cm ²]	A ₁ [%]	A ₂ [cm ²]	A ₂ [%]	A _{pr} [cm ²]	A _{pr} [%]	s _x [cm ²]	v _x [%]
ZS1	756	49,2%	889	57,9%	822	53,5%	66,58	8,10
ZS2	964	62,8%	1 038	67,6%	1 001	65,2%	37,16	3,71
ZS3	1 122	73,1%	1 198	78,0%	1 160	75,5%	38,19	3,29
ZS4	1 231	80,2%	1 279	83,3%	1 255	81,7%	23,74	1,89
ZS5	1 337	87,0%	1 347	87,7%	1 342	87,4%	5,16	0,38
ZS6	1 385	90,2%	1 394	90,7%	1 389	90,5%	4,13	0,30
Poloha 2, pražec dřevěný								
	A ₁ [cm ²]	A ₁ [%]	A ₂ [cm ²]	A ₂ [%]	A _{pr} [cm ²]	A _{pr} [%]	s _x [cm ²]	v _x [%]
ZS1	275	20,5%	466	34,8%	370	27,7%	95,48	25,80
ZS2	625	46,7%	697	52,1%	661	49,4%	36,13	5,47
ZS3	792	59,2%	837	62,6%	814	60,9%	22,71	2,79
ZS4	923	69,0%	970	72,5%	947	70,8%	23,74	2,51
ZS5	1 021	76,3%	1 045	78,1%	1 033	77,2%	11,87	1,15
ZS6	1 079	80,6%	1 091	81,6%	1 085	81,1%	6,19	0,57
Poloha 2, pražec plastový								
	A ₁ [cm ²]	A ₁ [%]	A ₂ [cm ²]	A ₂ [%]	A _{pr} [cm ²]	A _{pr} [%]	s _x [cm ²]	v _x [%]
ZS1	399	32,3%	371	29,9%	385	31,1%	14,45	3,75
ZS2	556	44,9%	604	48,8%	580	46,8%	23,74	4,09
ZS3	721	58,2%	750	60,6%	735	59,4%	14,97	2,04
ZS4	827	66,8%	862	69,6%	844	68,2%	17,55	2,08
ZS5	903	72,9%	925	74,7%	914	73,8%	10,84	1,19
ZS6	969	78,3%	983	79,3%	976	78,8%	6,71	0,69
Poloha 2, pražec betonový								
	A ₁ [cm ²]	A ₁ [%]	A ₂ [cm ²]	A ₂ [%]	A _{pr} [cm ²]	A _{pr} [%]	s _x [cm ²]	v _x [%]
ZS1	670	45,1%	681	45,8%	676	45,5%	5,68	0,84
ZS2	770	51,8%	849	57,1%	809	54,4%	39,23	4,85
ZS3	904	60,8%	993	66,8%	949	63,8%	44,39	4,68
ZS4	1 014	68,2%	1 069	71,9%	1 042	70,1%	27,87	2,68
ZS5	1 098	73,9%	1 138	76,5%	1 118	75,2%	19,61	1,75
ZS6	1 167	78,5%	1 189	80,0%	1 178	79,3%	10,84	0,92