

Měření velikosti pórů v pečivu

Filip Křemen

Bakalářská práce
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlí
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav technologie a mikrobiologie potravin

akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Filip KŘEMEN**

Osobní číslo: **T09021**

Studijní program: **B 2901 Chemie a technologie potravin**

Studijní obor: **Chemie a technologie potravin**

Téma práce: **Měření velikosti pórů v pečivu**

Zásady pro vypracování:

I. Teoretická část

1. Provést literární rešerši o měření velikosti pórů v pórovitých materiálech.
2. Provést literární rešerši o pórovitosti pečiva.

II. Praktická část

1. Vyvinout experimentální metodu pro měření velikosti pórů na rovinném řezu strukturou.
2. Změřit sérii vzorků připravených různými postupy.
3. Provést analýzu vlivu podmínek přípravy na vlastnosti vzorků.



Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- [1] Underwood, E. (1970). Quantitative Stereology. New York, Addison-Wesley
- [2] Russ J.C., Dehoff, R.T. (1986): Practical Stereology, Springer
- [3] Figoni P.I.: How Baking Works: Exploring the Fundamentals of Baking Science

Vedoucí bakalářské práce:

doc. RNDr. Petr Ponížil, Ph.D.

Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

1. února 2012

Termín odevzdání bakalářské práce:

21. května 2012

Ve Zlíně dne 10. února 2012


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: Křemen Filip

Obor: Chemie a technologie potravin

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 11. 5. 2012


.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) *Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být teč nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.*

(3) *Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.*

²⁾ *zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:*

(3) *Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).*

³⁾ *zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní díla:*

(1) *Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpirá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.*

(2) *Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.*

(3) *Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jim dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.*

ABSTRAKT

Práce se zabývá měření velikosti pórů ve vzorcích připraveného pečiva - chleba. K odhadu velikosti pórů a její distribuci je použita metoda fotografování nasvíceného řezu, který je následně počítačově zpracován za využití Euklidovské distanční mapy a Voronoiovy teselace. Na základě navržené sítě řezů je v konečné fázi zrekonstruována reálná struktura pórů. Výhodou metody je, že nezískáme pouze střední hodnotu velikosti pórů, ale distribuci jejich velikostí. Navrženou metodu lze aplikovat nejen na jiné druhy pečiva, ale i obecně na pěny, např. polymerní. Ve srovnání s počítačovou tomografií se jedná o velmi jednoduchou a levnou metodu. Druhá ze zkoušených metod byla založena na znalosti délky tětiv protínající tyto póry, z nichž se poté vypočítal samotný objem pórů.

Klíčová slova: Distribuce velikosti pórů, Hustota, Pečivo, Voronoiova teselace, Tětivy

ABSTRACT

The work deals with measuring pore sizes in samples of prepared pastry – bread. For the estimation of pore sizes and the distribution of pore sizes, a method of photographing illuminated-cuts was employed. Consequently, the pictures were computationally processed using Euclidean distance map and Voronoi Tessellation. On the basis of proposed network of pores sections the real structure of spherical pores is reconstructed in the final step. The advantage of the method is obtaining not only the mean value of pore size but also the size distribution. The developed method can be applied also on the others types of pastry or in general on foams (e.g. polymeric foams). In comparison with computer tomography the method is quite simple and cheap. The second of tested methods was based on the knowledge of length of the chords intersecting the pore cuts. The pore volumes calculating was direct.

Keywords: Pore size distribution, Density, Pastry, Voronoi Tessellation, Chords

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. RNDr. Petru Ponížilovi, Ph.D. za odborné vedení a připomínky k této práci. Také bych rád poděkoval Ing. Tomáši Matouškovi za cenné rady a čas, který věnoval mé bakalářské práci. Rovněž bych rád poděkoval Mgr. Ivě Burešové, Ph.D. a Ing. Petře Dvořákové za poskytnutí vzorků pečiva.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 PEČIVO	12
1.1 DEFINICE NĚKTERÝCH DRUHŮ PEKAŘSKÝCH VÝROBKŮ	12
1.2 VÝROBA PEČIVA.....	12
1.2.1 Suroviny pro výrobu pečiva	13
1.2.2 Příprava pšeničného těsta.....	13
1.2.2.1 Nepřímé vedení pšeničného těsta.....	13
1.2.2.2 Přímé vedení pšeničného těsta	13
1.2.3 Příprava těsta se žitnou moukou	14
1.2.4 Hnětení těst.....	14
1.2.4.1 Výroba kvasných předstupňů.....	14
1.2.5 Zrání, kynutí, dělení a tvarování těsta	14
1.2.6 Pečení, chladnutí a expedice	15
2 OBRAZOVÁ ANALÝZA	16
2.1 PRINCIP OBRAZOVÉ ANALÝZY	16
2.2 EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ OBRAZOVÉ ANALÝZY	16
2.3 APLIKACE OBRAZOVÉ ANALÝZY.....	17
2.4 MATEMATICKÁ MORFOLOGIE.....	17
2.5 STEREOLOGIE	17
2.5.1 Stereologické rovnice.....	18
2.6 TESELACE.....	19
2.6.1 Voronoiovy teselace.....	20
2.6.1.1 Poissonova-Voronoiova teselace	21
II PRAKTICKÁ ČÁST	22
3 VZORKY	23
3.1 PEČIVO.....	23
3.2 ZKUŠEBNÍ VZORKY	23
3.3 STANOVENÍ HUSTOTY VZORKŮ.....	24
4 ZPRACOVANÉ OBRÁZKY	26
4.1 TESELACE.....	27
4.2 TĚTIVY	29
4.3 VÝSLEDKY	30
4.3.1 Teselace.....	30
4.3.1.1 Série ZF.....	30
4.3.1.2 Série FS	36
4.3.1.3 Série ZF 2.....	40
4.3.1.4 Série ZS.....	45
4.3.2 Tětiny	48
ZÁVĚR	51
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	52
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	55

SEZNAM OBRÁZKŮ	57
SEZNAM TABULEK.....	60

ÚVOD

V odborném výzkumu se často setkáváme s pozorováním a charakterizací pórovitých materiálů, tedy materiálů, kdy matrice tvořená pevnou látkou, je prostoupena celami (póry) vyplněnými vzduchem. Tuto skupinu materiálů, se kterými přicházíme denně do styku lze jednoduše nazvat jako *pěny*. Mezi ty bezesporu nejpoužívanější patří pěny na bázi polymerních látek, jako např. polystyrenové, polypropylenové, případně nejrozšířenější polyuretanové pěny vhodné pro zvukově-tepelné izolace nebo jako materiál pro čalounictví. Sledování a popis struktury je v současnosti populárním tématem, protože je často dáván do souvislosti s vlastnostmi pěny a tedy možností její aplikace.

Tento klasický pohled na „paletu“ pěn může však být podstatně rozšířený, uvědomíme-li si, že pěny můžeme najít i mezi potravinami. Tou asi největší skupinou jedlých pěn je pečivo. Zde souvisí velikost pórů zejména sensorickými vlastnostmi pečiva, což je důležité jak pro výrobce pečiva, tak jeho konzumenty.

Práce navrhuje metodu pro odhad velikosti pórů v bílém pečivu. Posuzování sensorických vlastností v souvislosti se strukturou pečiva leží mimo rozsah této práce.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 PEČIVO

Pečivo neboli pekařské výrobky jsou produkty získané tepelnou úpravou těst nebo hmot, jejichž sušina je v převažujícím podílu tvořena mlýnskými obilnými výrobky s výjimkou šlehaných hmot a sněhového pečiva [1].

1.1 Definice některých druhů pekařských výrobků

Chleba je pekařský výrobek kypřený kvasem, popřípadě droždím, o hmotnosti nejméně 400 g s výjimkou krájeného, ve tvaru vky, bochníku, nebo formovaného.

Běžné pečivo se rozumí tvarovaný pekařský výrobek, vyrobený z pšeničné nebo žitné mouky, přísad a přídatných látek, který obsahuje méně než 8,2 % bezvodého tuku a méně než 5 % cukru, vztaženo na celkovou hmotnost mlýnských obilných výrobků.

Jemné pečivo je pekařský výrobek získaný tepelnou úpravou těst nebo hmot s recepturním přídatkem nejméně 8,2 % bezvodého tuku nebo 5 % cukru na celkovou hmotnost použitých mlýnských výrobků, popřípadě plněné různými náplněmi před pečením nebo po upečení marmeládou, džemem nebo povidly, nebo povrchově upravené sypáním, polevou nebo glazurou.

Pšeničný chleba nebo pšeničné pečivo je pekařský výrobek, obsahující nejméně 90 % podíl mlýnských výrobků z pšenice z celkové hmotnosti mlýnských výrobků.

Žitný chleba nebo žitné pečivo je pekařský výrobek, obsahující nejméně 90 % podíl mlýnských výrobků ze žita z celkové hmotnosti mlýnských výrobků.

Žitno-pšeničný chleba nebo žitno-pšeničné pečivo je pekařský výrobek, v jehož těstě musí být podíl žitných mlýnských výrobků vyšší než 50 % a pšeničných mlýnských výrobků vyšší než 10 % z celkové hmotnosti, tento požadavek v obráceném poměru platí pro pšenično-žitné pečivo a chleba [1].

1.2 Výroba pečiva

Hlavní charakteristikou výroby tradičního pečiva je postup nakypření těsta s účelem vytvoření struktury charakteru tuhé pěny, umožňující požitelnost výrobků, které by jinak byly kompaktní a obtížně kousatelné. K nakypření těsta se užívá tří způsobů: biologického (fermentace vyvolaná kvasinkami *Saccharomyces cerevisiae*), chemického (uvolňování plynů kypřícími prášky) a mechanického (šlehání, expandování z vysokého přetlaku) [2].

1.2.1 Suroviny pro výrobu pečiva

Základní surovinou pro pekárenskou výrobu je mouka. Nejčastěji se používá pšeničná nebo žitná mouka a jejich kombinace v různém poměru.

Dalšími hlavními složkami jsou voda, sůl a droždí (kvasinky *Saccharomyces cerevisiae*). Droždí se dodává čerstvé lisované s dobou trvanlivosti několik dní, nebo sušené s podstatně delší trvanlivostí. Pro správný průběh zrání a kynutí těsta je důležitá aktivita kvasinek. Ta se sleduje zjištěním uvolněného objemu CO₂ nebo z nárůstu objemu těsta.

Další složky pro výrobu těsta nejsou nezbytné, ale slouží především pro zlepšení jeho struktury, sensorických vlastností a zpomalují stárnutí. Mezi tyto suroviny se počítá cukr, tuk, mléčné produkty, vejce a chemická kypřidla. Někdy se také používají emulgátory, ochucovadla, aromatizující a barvicí látky [2].

1.2.2 Příprava pšeničného těsta

Příprava těsta je jednou z nejdůležitějších technologických operací. Při ní se vytvářejí základní předpoklady pro získání jakostního výrobku. Příprava pšeničného těsta může probíhat nepřímým nebo přímým vedením [2].

1.2.2.1 Nepřímé vedení pšeničného těsta

Nepřímým vedením těsta se rozumí příprava předstupně na rozkvašení přidávaného droždí a teprve poté přidání ostatních surovin. Kvasný předstupeň neboli omládek se připravuje z části vody, mouky a celého množství droždí. Z těchto surovin se vymíchává směs, která se nechá rozkvasit. Po 1 – 2 hodinách zrání se k omládku přidává zbytek vody, mouky a dalších recepturních surovin (sůl, cukr aj.) a vymísí se těsto. Takovéto těsto se nechá zrát 2 – 2,5 hodiny. V současnosti se tento postup již nepoužívá a přechází se na přímé vedení těsta, které je jednodušší [3].

1.2.2.2 Přímé vedení pšeničného těsta

Principem této metody, která se někdy taky nazývá „na záraz“ je smíchání všech surovin najednou, bez vytvoření kvasných předstupňů. Při tomto způsobu je potřebná dostatečná aktivita a standardní plynotvorná kapacita droždí. Tento způsob vedení těsta vyžaduje delší dobu pro zrání těsta [4].

1.2.3 Příprava těsta se žitnou moukou

Výroba pšenično-žitného a žitno-pšeničného chleba představuje značný podíl průmyslové výroby v České Republice. Pro všechny skupiny žitných a směsných těst je větší částí používán tradiční technologický postup přípravy těsta kypřeného žitným kvasem. Menší část je vyráběna na záraz a kypřena droždím. Žitná mouka není schopná vytvořit souvislou lepkovou strukturu, což má za následek, že těsto má charakter vysoce viskózní kapaliny s menší pružností. Toto je způsobeno přítomností většího množství pentosanů z podobalových vrstev žitného zrna [4].

1.2.4 Hnětení těst

Principem je rozmíchání všech surovin pro výrobu pečiva a vytvoření spojitého gelu. Na začátku hnětení se voda dostává do kontaktu jen s povrchem moučného zrna. Dalším mechanickým promícháváním se rozpouštějí a nabobtnávají složky moučných zrn, čímž se zvyšuje koncentrace gelu a roztoku. Viskozita gelu se postupně zvyšuje a v důsledku toho se současně zvyšuje pružnost a odpor těsta vůči napínání. Tento proces až do dosažení maxima odporu těsta se nazývá vývin těsta [2].

1.2.4.1 Výroba kvasných předstupňů

Pro výrobu pšeničného pečiva se jen minimálně připravují kvasné předstupně, ty se připravují vsádkově v mísícím nebo šlehacím stroji. Kvasné předstupně jsou i přirozené žitné kvasy. Ty lze získat spontánním rozkvašením těsta ze žitné mouky. V pekárnách se takto vyzrálý kvas přechovává a opakovaně pomnožuje pro další výrobu [2].

1.2.5 Zrání, kynutí, dělení a tvarování těsta

Ihned po vyhnětení těsta začínají probíhat procesy alkoholového kvašení. Kvasinky spotřebovávají zkvasitelné cukry a produkují především CO₂ a ethanol. Vedlejšími produkty alkoholového kvašení jsou pak kyselina octová a mléčná, aldehydy a ketony. Tyto látky jsou původci typické chuti. U zrání je důležitá teplota. Při vyšší teplotě je podporováno spíše mléčné kvašení a tvorba kyselin a za nižší teploty (25 – 35 °C) je podporováno alkoholové kvašení a tvorba kypřícího plynu CO₂ [2].

Mechanizované linky na výrobu chleba navazují na zrací zařízení kontinuální výroby žitných i pšeničných těst. Ve strojích a zařízeních probíhá dělení, tvarování, kynutí a pečení těsta. První operací této fáze výroby je dělení těsta na klonky o požadovaném objemu.

Oddělené kusy jsou dále tvarovány na bochánky, které se následně vkládají do forem – košíků (výroba chleba). Nebo se těsto válcuje a následně roluje do válečků (výroba vecky). Vytvarované těsto je pomocí pásového dopravníku dále přemístěno do automatické kynárny, ze které se vykynuté kusy předávají rovnou do pece [5].

1.2.6 Pečení, chladnutí a expedice

Pečení je závěrečnou fází výroby pečiva. Nejdříve probíhá zapékání (teplota 240 – 280 °C), při kterém dochází k velkému nárůstu teploty a k povrchu výrobku vstřikováním vodní páry do pece. Teplota v peci se poté snižuje a probíhá vypékání (teplota 200 °C) [6].

Ihned při začátku pečení se rychle zvětšuje celý objem výrobku vlivem zrychlení metabolismu kvasinek. Při teplotě 50 °C se tento nárůst objemu zastaví usmrčením těchto mikroorganismů. Po dalším zvýšení teploty probíhá na povrchu pečiva denaturace moučných bílkovin a škrobu což má za následek vytvoření kůrky, která zabrání odpaření vody z vnitřku výrobku. Toto je důležité pro vytvoření kvalitní a měkké střídky pečiva [6].

V průběhu pečení probíhají v těstě chemické změny. Při teplotách nad 60 °C dochází k denuraci bílkovin, čímž se z nich uvolňuje voda. Současně dochází k mazovatění škrobu, který uvolněnou vodu přebírá. Tato voda zajistí vláčnou střídku výrobku. Vytvoření kůrky výrobku je zajištěno zvlažováním jeho povrchu vodním sprejem nebo vodní parou, která se vstříkuje do prostor pece. Přítomnost velkého množství vody způsobí rychlé mazovatění škrobu. Při jeho vysušování vlivem zvýšení teploty v další fázi pečení rychle ztvrdne a zabraňuje odpaření vody z vnitřku výrobku [2].

Při vypékání je již vytvořena pevná kůrka pečiva a proto není potřeba nadále zvlhčovat prostředí v peci. Teplota pozvolna klesá a probíhá pouze dotvoření střídky pečiva [6].

Chladnutí výrobku probíhá přímo v pecích nebo na chladících roštích. V průběhu chladnutí nesmí být poškozena kůrka, v opačném případě by došlo k uniknutí vlhkosti ze střídky a tím k rychlému ztvrdnutí výrobku. Teplé pečivo nesmí být baleno do neprodyšných obalů, mohlo by tím dojít k zapaření výrobku [2].

2 OBRAZOVÁ ANALÝZA

Obrazová analýza se zabývá získáváním kvantitativních informací o různých geometrických parametrech mikro- i makrostruktury materiálů (např. údajů o počtu, ploše resp. velikostních parametrech částic, o jejich celkovém podílu v matici aj.). Těchto informací lze použít jednak přímo pro hodnocení struktury materiálu, jednak jako podkladu pro stereologickou analýzu. Kvantitativní hodnocení charakteristických parametrů zkoumané struktury případně vypracování stereologického modelu a matematicko-statistická analýza dosažených výsledků je důležitou součástí posuzování vztahů mezi strukturou a vlastnostmi či mezi mírou změn struktury a vnějšími faktory [7].

2.1 Princip obrazové analýzy

Podstatou obrazové analýzy je digitalizace obrazu a zpracování vzniklého souboru v počítači. Nejprve se musí obraz zaznamenat (digitálním fotoaparátem, kamerou), převést obrazový signál na digitální data a nakonec zpracovat pomocí programového vybavení určeného k obrazové analýze. Obraz je možné hodnotit jako celek nebo jen jeho vybrané (charakteristické) části. Nepracuje se přitom s jednotlivými pixely, ale s celým obrázkem či oblastí najednou. Využívá se přitom lineárních (integrálních) transformací dat, kterým se přiřazují pomocí definované báze jiná data (tzv. spektrum). V těchto spektrech jednotlivé pixely zdůrazňují různé vlastnosti (definované bází) celého původního obrazu [8].

2.2 Experimentální zařízení obrazové analýzy

K záznamu obrazů se používají výhradně zařízení obsahující CCD prvek (např. soustava mikroskop – digitální fotoaparát). V současné době lze pořídit tato zařízení s dostatečnou plošnou rozlišovací schopností (určenou počtem pixelů obrazového senzoru) a barevnou hloubkou (určenou počtem kvantovacích kroků převodníku analogového signálu vygenerovaného světlem na digitální data). Na druhé straně mohou vzniknout v průběhu záznamu a převodu obrazu na digitální data chyby, které je nutno odstranit (např. nehomogenita osvětlení obrazu, nelineární přenos jasů – tzv. gamma korekce a teplotní šum) [9].

Používání skenerů je velmi jednoduché a poměrně levné snímání obrazu. Pracují na principu, kdy je objekt (např. fotografie) na rovném povrchu snímán, a pomocí zařízení obsahující CCD prvek vytvořena digitální data. Další možností pořizování digitálních fotografií je pomocí videokamer, tento způsob je rovněž velmi jednoduchý a poměrně levný.

Pro vědecké účely se používají monochromatické kamery, které jsou oproti barevným fotoaparátům levnější a poskytují vyšší rozlišení, citlivost i kontrast. [10].

2.3 Aplikace obrazové analýzy

Použití výpočetní techniky je při provádění obrazové analýzy do velké míry nezbytné. V návaznosti na současný rychlý rozvoj hardwarových a softwarových prostředků i laboratorní techniky se rozvíjí metody obrazové analýzy. Mimo jiné se digitální zpracování obrazu využívá v širokém spektru aplikací ve fyzice, biologii, lékařství a téměř všech aplikacích s obrazy [7], [11].

2.4 Matematická morfologie

Matematická morfologie se zabývá analýzou a zpracováním geometrických struktur. Původně se používala k analýze snímků biologických a geologických vzorků. Skládá se z mnoha nelineárních operátorů, teoretický pojmů a algoritmů, které jsou určeny k získávání geometrických objektů z obrazu, informující o jejich tvaru a velikosti. Zakládá se na teorii množin (množiny v obraze představují objekty) a stochastické integrální geometrii. Matematická morfologie v dnešní době poskytuje mnoho teoretických a algoritmických nástrojů a tím inspiruje nové směry ve výzkumu v oblastech zpracování obrazu, počítačového vidění, zpracování signálu a rozpoznávání obrazu [12], [13].

Matematická morfologie nabízí řadu nástrojů k uskutečnění různých jednoduchých i náročnějších úkolů, jako je například segmentace, tvarová analýza, redukce šumu, detekce hran, atd. [14].

Metody matematické morfologie jsou schopné studia prostorového rozložení objektů v obraze, pro analýzu systémů skládajících se z malých, pravidelných objektů [15].

2.5 Stereologie

Stereologie je matematická disciplína zabývající se odhadem geometrických charakteristik trojrozměrných struktur na základě pozorování sond nižší dimenze (rovin řezu, projekcí).

Používá se v řadě vědních oborů jako je biomedicína, geologie, materiálový výzkum, ke kvantitativnímu hodnocení trojrozměrných struktur. Aplikace statistiky ve stereologii jsou významné například v materiálových vědách. Typickou ukázkou je zkoumání mikro-

skopických trhlin v kovech, které lze pozorovat pouze pomocí řezů materiálu, takzvaných profilů. Ve stereologii se rozlišuje klasický a modelový přístup. V prvním z nich je struktura považována za deterministickou a pouze sondy jsou náhodné, v druhém přístupu se již struktura modeluje náhodným procesem [16], [17].

2.5.1 Stereologické rovnice

Pro analýzu rovinných řezů se používají tři základní stereologické rovnice. Průměrný objem pórů E_V můžeme vypočítat podle rovnice (1) ze znalosti střední plochy $E_{V'}$ a střední šířky cel E_W , nebo také pomocí středního povrchu E_S a průměrné délky tětív $E_{V''}$ cel. Vztah mezi počtem profilů jednotkové plochy roviny řezu vzorku N_A a počtem pórů v objemové jednotce vzorku N_V ukazuje rovnice (2). Vztah mezi počtem profilů jednotkové plochy vzorku v rovině řezu N_A a počtem profilů zachycených jednotkovou délkou přímky N_L stejného řezu uvádí rovnice (4) a také vztah mezi počtem profilů zachycených jednotkovou délkou přímky N_L v rovině řezu a počtem pórů v objemové jednotce vzorku N_V [14].

Pro odhad počtu pórů v objemu vzorku jsou důležité následující charakteristiky [19]:

Skutečná struktura pórů (3D teselace)

- střední objem pórů E_V
- střední povrch pórů E_S
- střední šířka pórů (klešťový průměr) E_W

Plošná indukovaná teselace – 2D (řez 3D struktury rovinou)

- střední plocha profilu (řezu póru rovinou) $E_{V'}$

Lineární indukovaná teselace – 1D (řez 3D strukturou přímkou)

- střední délka tětivy (řezu póru přímkou) $E_{V''}$

E_{\bullet} je střední hodnota veličiny \bullet . Veličiny N_V , N_A , N_L jsou reciproké veličiny k veličinám v , v' , v'' v tomtéž pořadí. Pomocí $E_{V'}$ a $E_{V''}$, jejichž hodnoty se získají měřením, se může odhadnout objemová charakteristika dané struktury E_V . Po zjištění údajů o délce tětív a ploše profilů se mohou odhadnout variační koeficienty ploch $[CV_{v'}]$ v' a tětív $[CV_{v''}]$ v'' [18], [19].

Stereologickými rovnicemi, které vyjadřují vztahy mezi jednotlivými proměnnými, jsou dány spojitosti mezi charakteristikami 3D teselací a indukovaných 2D a 1D teselací [18], [19]:

$$E\nu = E_w \cdot E\nu' = E_s \cdot E\nu'/4 \quad (1)$$

Za použití reciprokových veličin se mohou tyto rovnice přepsat takto:

$$EN_v = c'(EN_v)^{3/2} \quad (2)$$

$$EN_v = c''(EN_L)^3 \quad (3)$$

$$EN_A = c(EN_L)^2 \quad (4)$$

kde c' , c'' a c jsou pro danou strukturu bezrozměrné konstanty zavedené vztahy:

$$c' = \sqrt{\frac{E\nu}{(E_w)^3}}, \quad c'' = \frac{(E\nu)^2}{E_s/4^3}, \quad c = \frac{E_w E\nu}{(E_s/4)^2} = \left(\frac{c''}{c}\right)^{2/3} \quad (5)$$

Problém odhadu velikosti pórů je vlastně redukován na nalezení vhodných hodnot parametrů c' , c'' a c . Tyto parametry závisí na střední šířce a povrchu pórů, vztažených na jednotkový střední objem, tedy na jejich tvaru a nezávisí na středním objemu pórů. Závisí však na distribuci velikostí pórů [19], [20].

Důležité je také uvést, že stereologické rovnice (2), (3) a (4) normy ve skutečnosti neuvádí, ale tyto rovnice jsou skryty v jejich tabulkách. U různých norem se tyto stereologické rovnice liší různými koeficienty c , c' , c'' . Při užití počítačové databáze (počítačové simulace) se tyto koeficienty určí individuálně pro každou strukturu z hodnot koeficientu c , hodnot variačních koeficientů $CV_{v'}$ nebo $CV_{v''}$ a w - s diagramu z počítačové databáze [18], [19], [20].

2.6 Teselace

V přírodních i společenských vědách existuje mnoho oborů, které řeší problém členění prostoru na oblasti. Ve všech oblastech existuje konečná množina center, jimž je přiřazena jistá část prostoru. Výsledkem je rozdělení prostoru na systém oblastí - buněk či cel, vesměs téměř nebo úplně vyplňujících prostor a majících společné nejvýše své hranice. V tomto druhém případě dělení nazýváme teselací. Nejjednodušší přirozené dělení je založeno na vzdálenostech bodů prostoru od center. Vnitřek buňky je pak vytvořen těmi body prostoru, které mají k danému centru blíže než k centrům jiným; hranice buňky jsou tvořeny body, které jsou stejně vzdáleny od více center [20], [21].

Rozložení center v prostoru se nazve bodovým procesem. Centra mohou být rozmístěna homogenně, tzn. navzájem nezávisle v d -rozměrném (d = počet dimenzí) prostoru nebo heterogenně, kdy jsou tato centra rozmístěna nepravidelně, nebo tvoří různé shluky, působí

na ně různé odpudivé a přitažlivé síly. Pro tato centra platí $BP = \{x_1, \dots, x_n\}$, kde BP je konečná množina bodů v omezené oblasti. Shluk buněk (cel) tvoří teselaci a případ teselace v rovině se nazývá mozaika [18], [22].

V zásadě lze teselace rozdělit na náhodné a pravidelné. Buňky náhodné teselace jsou rozměrně i tvarově velmi rozdílné. V reálných podmínkách se vyskytují častěji. Tento typ teselací může vzniknout přímou konstrukcí stěn podle zadaného pravidla – neboli teselace s přímo generovanými stěnami, jejichž zástupci jsou např. Delaunayova teselace nebo Poissonova teselace, mohou také vznikat z center tzv. generátorů. Typickými zástupci tohoto typu jsou Voronoiovy a Johnson-Mehlovy teselace.

Prostor rozdělený do naprosto stejných cel představují pravidelné teselace. Kubické a čtvercové teselace jsou typickým příkladem, v přírodě se však téměř nevyskytují neboť je zde velkou plochou ohraničený malý objem buňky. Optimální rozdělení objemu a povrchu představuje koule, proto má většina navržených pravidelných teselací tvar buňky přibližující se tomuto tělesu např. čtrnáctistěn [22].

2.6.1 Voronoiovy teselace

Formální definice cely V_i Voronoiovy teselace generované konečným či spočetným bodovým systémem $BP = \{x_1, x_n\}$ d -rozměrného ($d =$ počet dimenzí) eukleidovského prostoru, $2 \leq n < \infty$, $x_i \neq x_j$, $i \neq j$, $1 \leq i, j \leq n$ je

$$V_i = \{x \in \mathbf{R}^d, \|x - x_i\| \leq \|x - x_j\|, \text{pro } j \neq i\} \quad (6)$$

Kde $\|x\|$ je eukleidovská norma.

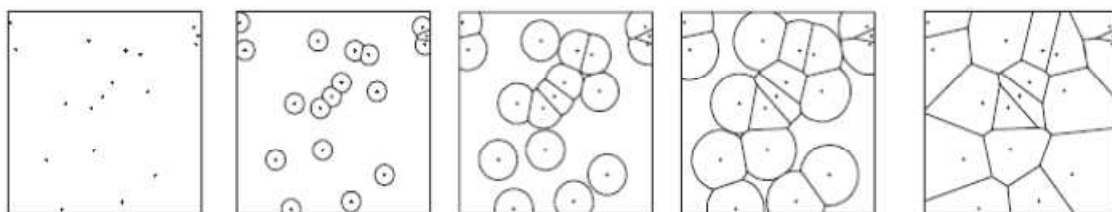
Sjednocení všech cel V_i je obyčejná Voronoiova teselace a BP je množina generátorů. Takto definovaná Voronoiova cela je uzavřená množina, kde je její vnitřek definován stejnou rovnicí s ostrým znaménkem nerovnosti.

Voronoiova teselace lze vytvořit rovněž takto: označme $E_+^d(x_i, x_j)$ poloprostor ohraničený nad rovinou symetrie bodů x_i, x_j obsahující bod x_i . Potom průnik všech těchto poloprostorů obsahujících bod x_i je cela Voronoiovy teselace:

$$V_i = \bigcap_{j \neq i} E_+^d(x_i, x_j). \quad (7)$$

Další způsob vytvoření Voronoiovy teselace z daného bodového systému je tzv. růstový model: předpokládá se, že v čase $t = 0$ začnou ze zárodků x_i růst zrna konstantní izotropní rychlostí v . Růst zrna se lokálně zastaví v každém bodě, v němž se dotkne zrna

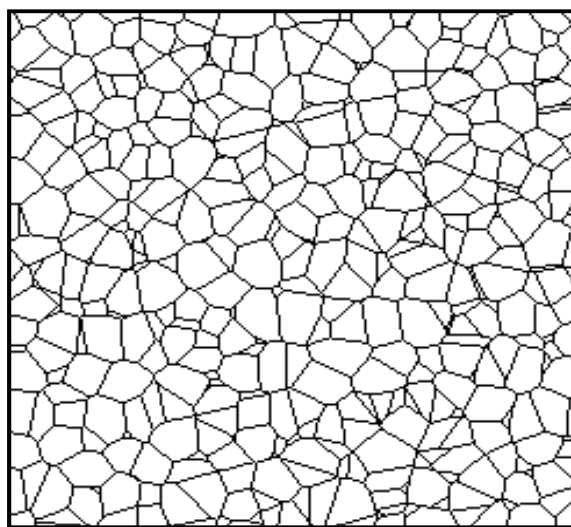
sousedního. Takto vzniklá zrna opět vytvoří Voronoiovu teselaci. Pokud by rychlost nebyla izotropní vznikla by zobecněná Voronoiova teselace [21].



Obr. 8 Růstový model. Čas t roste zleva doprava. Vlevo $t = 0$; vpravo $t = \infty$ [17]

2.6.1.1 Poissonova-Voronoiova teselace

Vlastnosti Poisson-Voronoiovy (PVT) teselace jsou standardem pro každou klasifikaci, hypotéza „analyzované teselace PVT“ je nulovou hypotézou každého statistického souboru. Některé vlastnosti PVT jsou známy, buď na základě teoretických odvození, nebo z rozsáhlých počítačových simulací. Generujícím bodovým procesem PVT je stacionární Poissonův bodový proces. Generující body jsou nezávisle náhodně rozmístěny v prostoru [23].



Obr. 9 Poissonova-Voronoiova teselace [19]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 VZORKY

Jednotlivé vzorky se skládaly z různého poměru různých druhů mouk. Vzorek ZF je složený z kukuřičné a pohankové mouky, vzorek FS se skládá z pohankové a žitné mouky a vzorek ZS se skládá z kukuřičné a žitné mouky. Číslo udává, z jakého množství jednotlivých druhů mouk se vzorek skládá. Například vzorek ZF 4060 se skládá ze 40 % kukuřičné mouky a 60 % mouky pohankové.

3.1 Pečivo

Vzorky pečiva byly připraveny podle normy ICC č. 131. Těsto bylo umícháno pomocí mixéru z mouky, vody, suchého droždí, soli, sacharózy a kyseliny askorbové. Malé kusy těsta se nechaly 30 minut zakryté kynout, poté byly umístěny do forem a znovu ponechány 50 minut ležet. Vzorky byly pečeny přesně 20 minut [24], [25].

3.2 Zkušební vzorky

Jednotlivé vzorky byly připraveny následujícím způsobem:

Z každého upečeného kusu pečiva byl uřezán reprezentativní vzorek, to znamená, že obsahoval průměrné zastoupení hmoty i pórů a jejich rozložení. Tento uřezaný kus byl 5 – 10 mm široký. Důležité především bylo, aby nebyl příliš tenký, čímž by mohlo docházet k průsvitu podkladového materiálu při pořizování snímků.

Každý tento vzorek byl vysušen, čím získal potřebnou tvrdost na následující srovnání ploch. Toto bylo prováděno klasickým smirkovým papírem tak aby povrch, ze kterého se následně pořizoval snímek, byl naprosto hladký, což bylo důležité pro správné rozložení světla na povrchu vzorku. Póry v pečivu však nesměly být zaplněné přebytečným osmirkovaným materiálem.

Jednotlivé vzorky byly následně postupně vkládány na čistě bílou podložku pro lepší kontrast světla a stínu. Vedle vzorku byl umístěn zdroj osvětlení, k čemuž dobře sloužila obyčejná žárovka, jejíž vlákno bylo přesně na úrovni výšky plochy vzorku, tak aby byl stín vrhán pouze do pórů pečiva a materiál byl zcela osvětlen. Vedle vzorku bylo položeno posuvné měřidlo pro zaznamenání plochy brané ke zpracování.

Takto připravený vzorek byl vyfocen digitálním fotoaparátem, který byl umístěn přímo kolmo nad vzorkem. Pořízený snímek by měl být naprosto zaostřený, a měl by na něm jít vidět rozdíl mezi světlým materiálem a tmavými póry (obr. 1).



Obr. 1 – Snímek pořízený fotoaparátem

3.3 Stanovení hustoty vzorků

Před samotnou obrazovou analýzou bylo provedeno měření hustoty vzorků. Nejdříve byla změřena plocha vzorku, což bylo provedeno v softwaru pro úpravy obrazu (GIMP). Poté byla pomocí digitálního mikrometru změřena tloušťka vzorku a jednotlivé kusy byly následně zváženy na laboratorních vahách. Hustota byla vypočítána ze znalosti hmotnosti a objemu vzorku.

Tab. 1 – Hustoty vzorků FS

Vzorek	FS 1090	FS 2080	FS 4060	FS 5050	FS 6040	FS 7030	FS 9010	F100
Pohanka/žito [%]	10/90	20/80	40/60	50/50	60/40	70/30	90/10	100/0
Hustota [g/cm^3]	0,73	0,80	0,78	0,83	0,85	0,78	0,84	0,82

Tab. 2 – Hustota vzorků ZF

Vzorek	ZF 1090	ZF 2080	ZF 3070	ZF 4060	ZF 5050	ZF 6040	ZF 7030	ZF 8020	ZF 9010
Kukuřice/pohanka [%]	10/90	20/80	30/70	40/60	50/50	60/40	70/30	50/20	90/10
Hustota [g/cm^3]	0,86	0,89	0,79	0,75	0,74	0,75	0,72	0,71	0,72

Tab. 3 – Hustoty vzorků ZF 2

Vzorek	ZF 2 1090	ZF 2 2080	ZF 2 3070	ZF 2 4060	ZF 2 5050	ZF 2 6040	ZF 2 7030	ZF 2 9010	Z 2 100
Kukuřice/pohanka [%]	10/90	20/80	30/70	40/60	50/50	60/40	70/30	90/10	100/0
Hustota [g/cm ³]	1,01	0,93	1,00	0,87	0,91	1,02	0,96	0,81	0,88

Tab. 4 – Hustoty vzorků ZS

Vzorek	Z 100	ZS 5050	ZS 7030	ZS 8020	ZS 9010
Kukuřice/žito [%]	100/0	50/50	70/30	80/20	90/10
Hustota [g/cm ³]	0,88	0,76	0,87	0,82	0,78

U vzorků obsahující žito (S) lze pozorovat nárůst hustoty se zvyšujícím se obsahem žitné mouky, což naznačuje, že póry se u těchto vzorků s nárůstem obsahu žita postupně zmenšovali. U vzorků obsahující kukuřici (Z) lze pozorovat pokles hustoty se zvyšujícím se obsahem kukuřičné mouky, což ukazuje, že póry se u těchto vzorků s nárůstem obsahu kukuřice zvětšovali.

4 ZPRACOVANÉ OBRÁZKY

Pořízené snímky vzorků byly následně zpracovány v programu pro práci s obrázky. (Zde byl použit program ImageJ verze 1.44). U obrázku byl nejdříve nastaven typ na 8 – bit. Pomocí funkce „úsečka“ byla na posuvném měřítku zaznačena délka přesně 10 mm. V programu v sekci Set Scale byly poté nastaveny použité měřítka na 10 mm. Tímto byl zjištěn počet pixelů je v 1 mm vzorku. Pomocí funkce „obdélník“ byl poté oříznut celý vzorek, tak aby se v obrázku již nenacházelo pravítko a přebytečné okolí vzorku. Z obrázku bylo poté úplně odečteno pozadí pomocí funkce „Subtract Background“, kde byla nastavená hodnota 30 pixelů. Binarizací obrázku jsme následně získali černobílý snímek, kde byly póry ukázány bílou barvou a materiál pečiva černou. Nakonec byl pomocí funkcí „Dilate“ a „Erode“ odstraněn šum obrázku (obr. 2), který by se při následujícím zpracování mohl jevit jako velmi malé klamné póry. Takto upravené obrazy byly následně zpracovány pomocí Teselací a Tětiv.



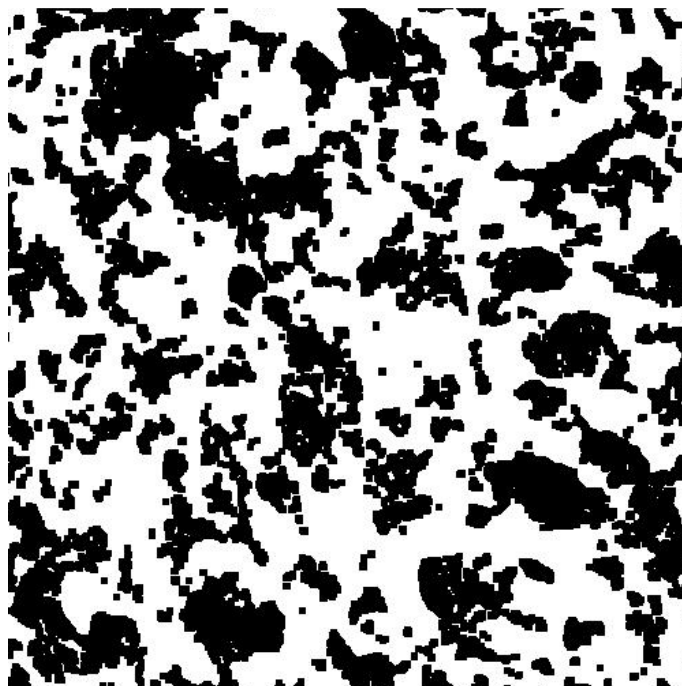
Obr. 2 – Ukázka Dilatace a Eroze (z leva: původní obrázek, dilatovaný a erodovaný)



Obr. 3 – Výsledný obrázek po zpracování v programu ImageJ

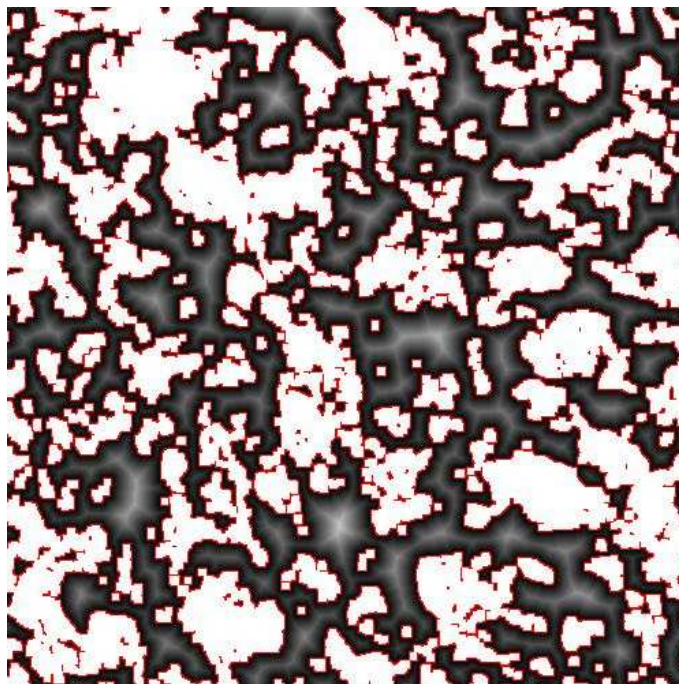
4.1 Teselace

Výsledný černobílý obraz byl následně oříznut na velikost 500 x 500 pixelů pro lepší manipulaci při dalším zpracování. Obraz musel být dále invertován, tak aby byly póry vyznačeny černou barvou a materiál bílou (obr. 4). Takto upravený vzorek byl otevřen v programu Tessellation a zpracován.



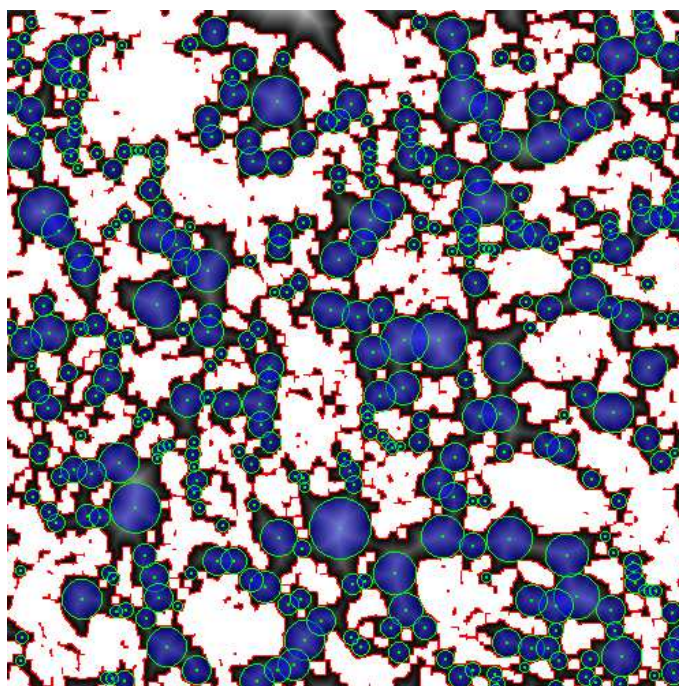
Obr. 4 – Oříznutý a Invertovaný vzorek

U funkce „Noise Reduction“ byla nastavena taková hodnota, aby zmizely bílé tečky působící jako šum obrázku. Takto upravené binární obrazy byly analyzovány za využití Euklidovské distanční mapy (EDM). Pomocí funkce „Black Boundary“ byl převeden obrázek tak, aby ukazoval červeně hranice materiálu a odstíny šedé znázorňovali vzdálenost bodů uvnitř pórů od nejbližšího materiálu. Tato pomůcka je založená na principu přiřazení číselné hodnoty každému černému bodu, který se nachází uvnitř póru na základě jeho vzdáleností od nejbližšího bílého bodu, patřícímu hranici póru. Lokální maxima EDM odpovídají středům pórů (obr. 5).



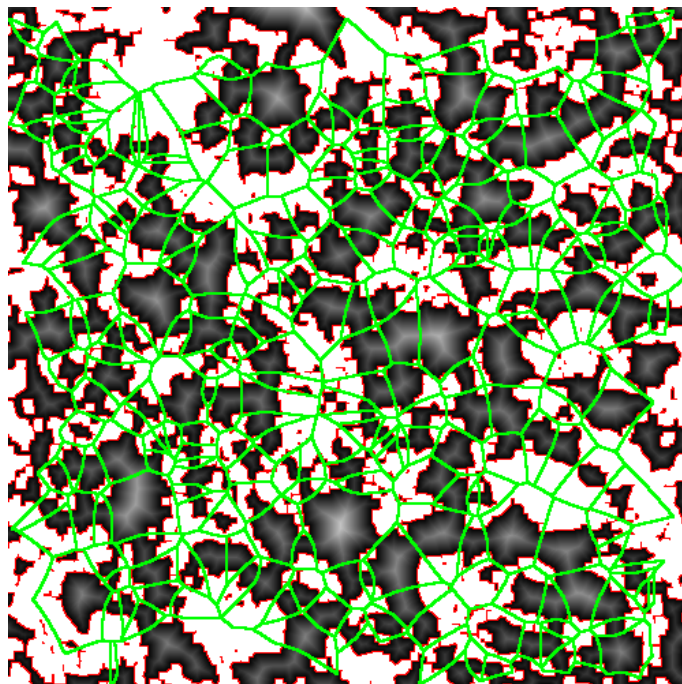
Obr. 5 – EDM zkonstruovaná na obrázku

Odhadnuté středy pórů znázorněny nejsvětlejší šedou barvou můžeme fitovat kružnicemi, jejichž středy leží právě v lokálních maximech EDM (obr. 6).



Obr. 6 – Kružnice vepsané do středu pórů

Pomocí funkce „Divide – EDM Image“ lze z lokálních maxim EDM bodů vypočítat Voronoiovu teselaci (obr. 7). Výsledkem je síť aproximující rovinný řez póry, kdy známe obsah každého póru.

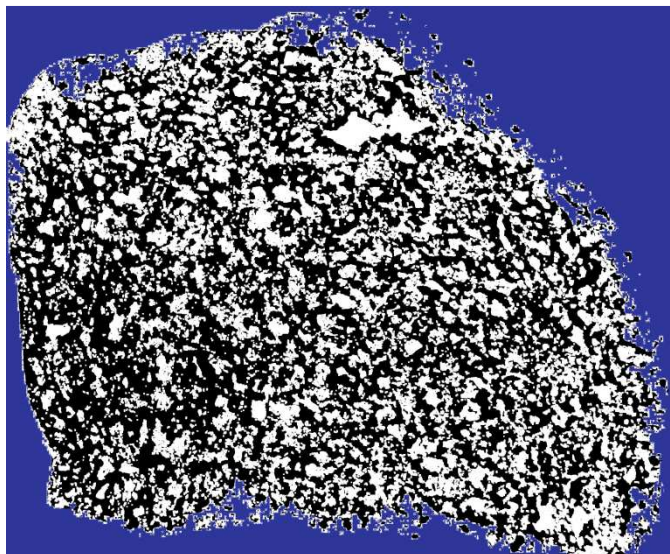


Obr. 7 – Síť aproximující rovinný řez póry

Následně byl exportován datový soubor, ve kterém byl obsažen počet pórů a jejich povrch.

4.2 Tětiny

U výsledného černobílého obrazu z původní úpravy bylo obarveno pozadí modrou barvou pro další zpracování pomocí programu na výpočet délky tětív. Díky této modré barvě program rozeznal, kde se nahází póry a kde okolí vzorku. Program byl napsán tak, aby vložil několik rovnoběžek ležících těsně vedle sebe. Poté vypočítal, jaká vzdálenost těchto tětív protíná bílé póry a tyto velikosti zapsal do vzniklého datového souboru. Po zprůměrování těchto hodnot jsme zjistili střední délku tětív, díky které jsme mohli pak vypočítat objem pórů.



Obr. 8 – Vzorek s modře zbarveným pozadím

4.3 Výsledky

4.3.1 Teselace

4.3.1.1 Série ZF

Tab. 5 – Objem pórů vzorků série ZF

Vzorek	EV_1 [mm ³]	EV_2 [mm ³]
ZF 1090	40,56	12,40
ZF 2080	214,43	62,31
ZF 3070	50,33	38,07
ZF 4060	44,32	47,18
ZF 5050	279,92	78,37
ZF 6040	216,31	31,75
ZF 7030	76,14	23,72
ZF 8020	61,12	35,20
ZF 9010	70,81	45,00

Pro tabulky 2 až 5 platí:

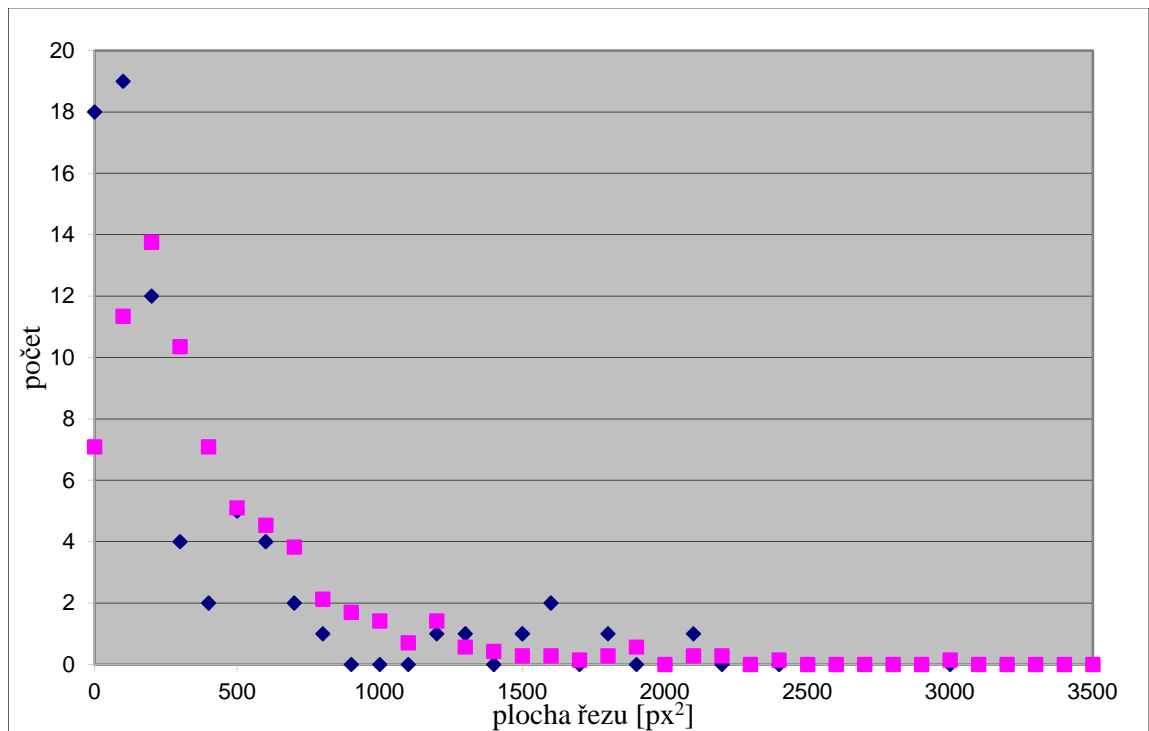
EV_1 je objem pórů spočítaný byl spočítaný ze znalosti ploch pórů, které byly dosazeny do rovnice (2). Hodnota C' byla vypočítána podle rovnice (8):

$$C' = \sqrt{\frac{6}{\pi}} = 1,382 \quad (8)$$

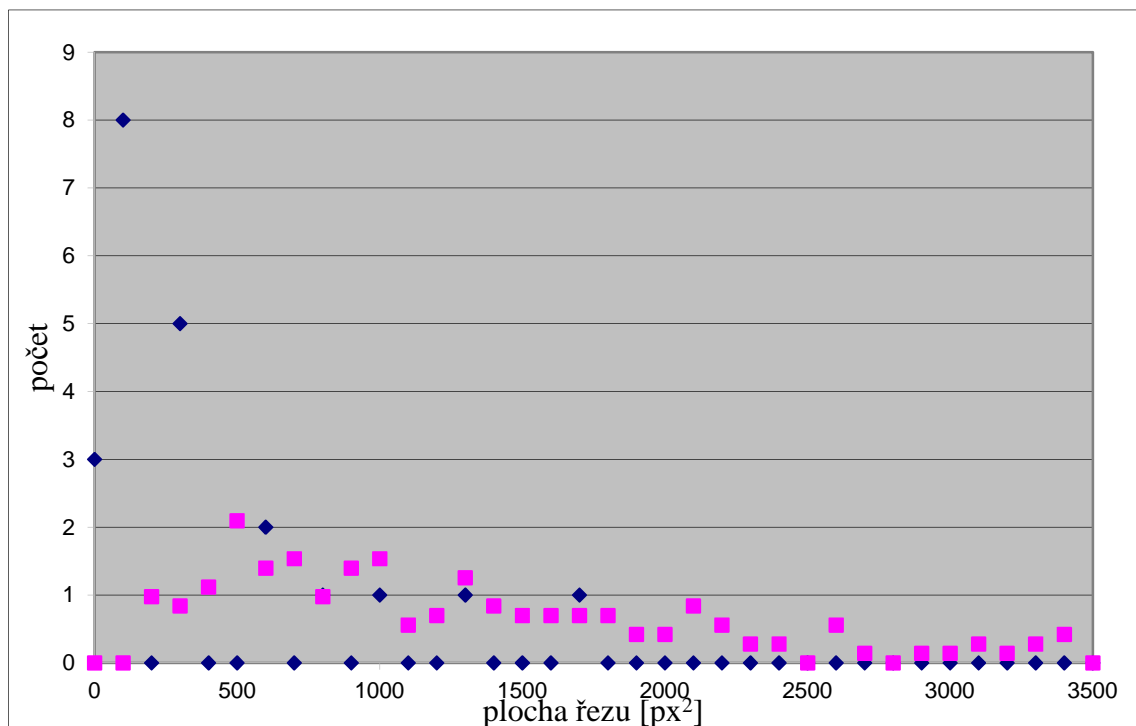
Tento vzorec se stejnou hodnotou C' je používám v ASTM pro standardní odhad velikosti zrna v kovech. To ukazuje, že vzorec není přesně omezen na koule a může být aplikován také pro nepravidelnější tvary.

EV_2 je objem pórů spočítaný dosazením poloměrů koulí (pórů) do rovnice (9) pro výpočet objemu koule:

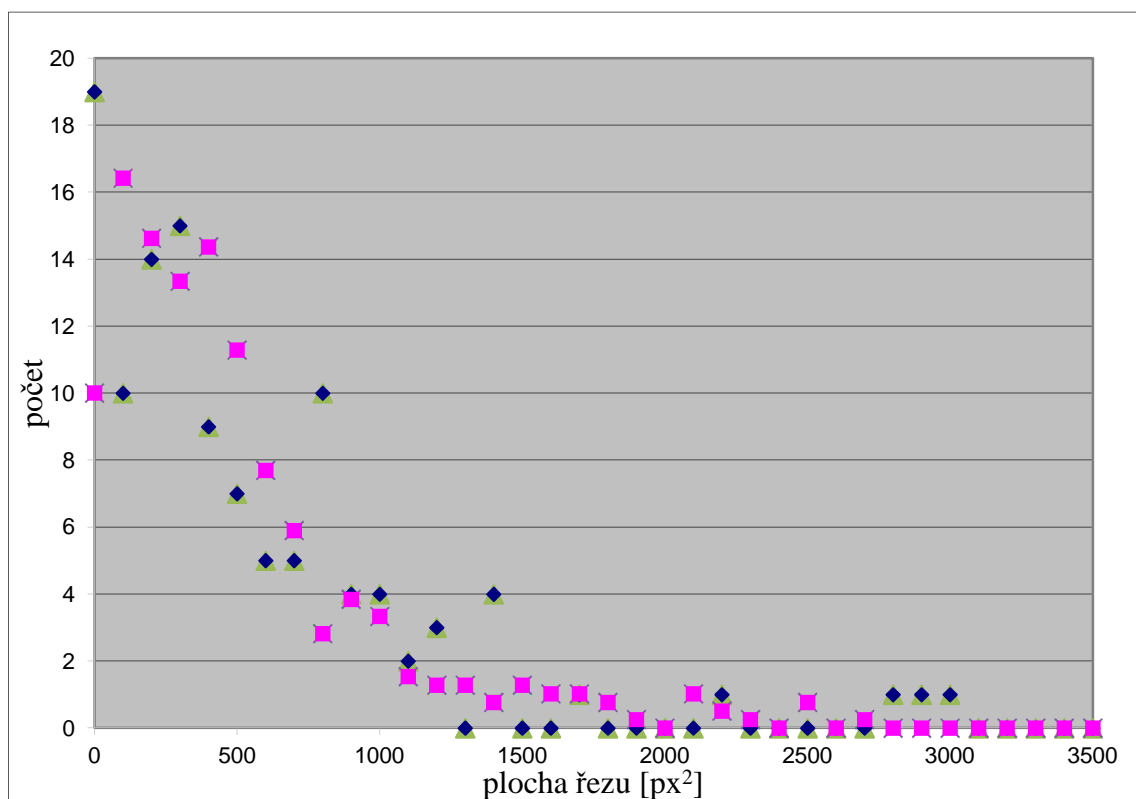
$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 \quad (9)$$



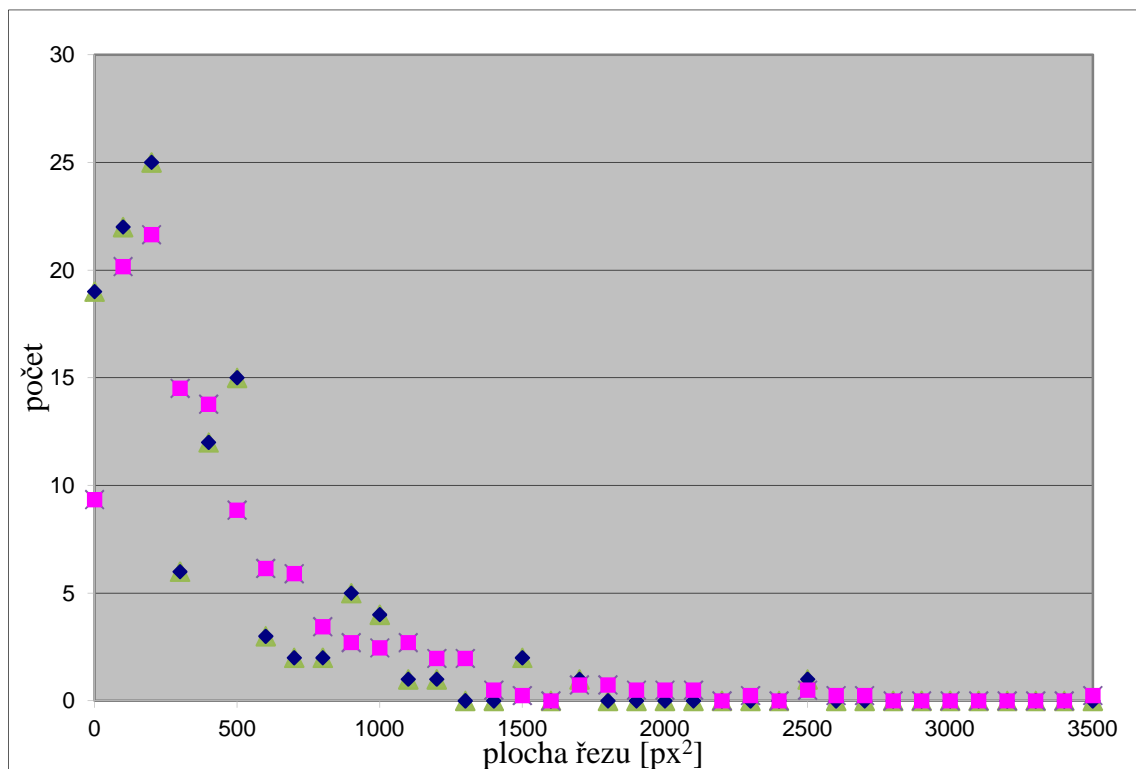
Obr. 9 – ZF 1090 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou



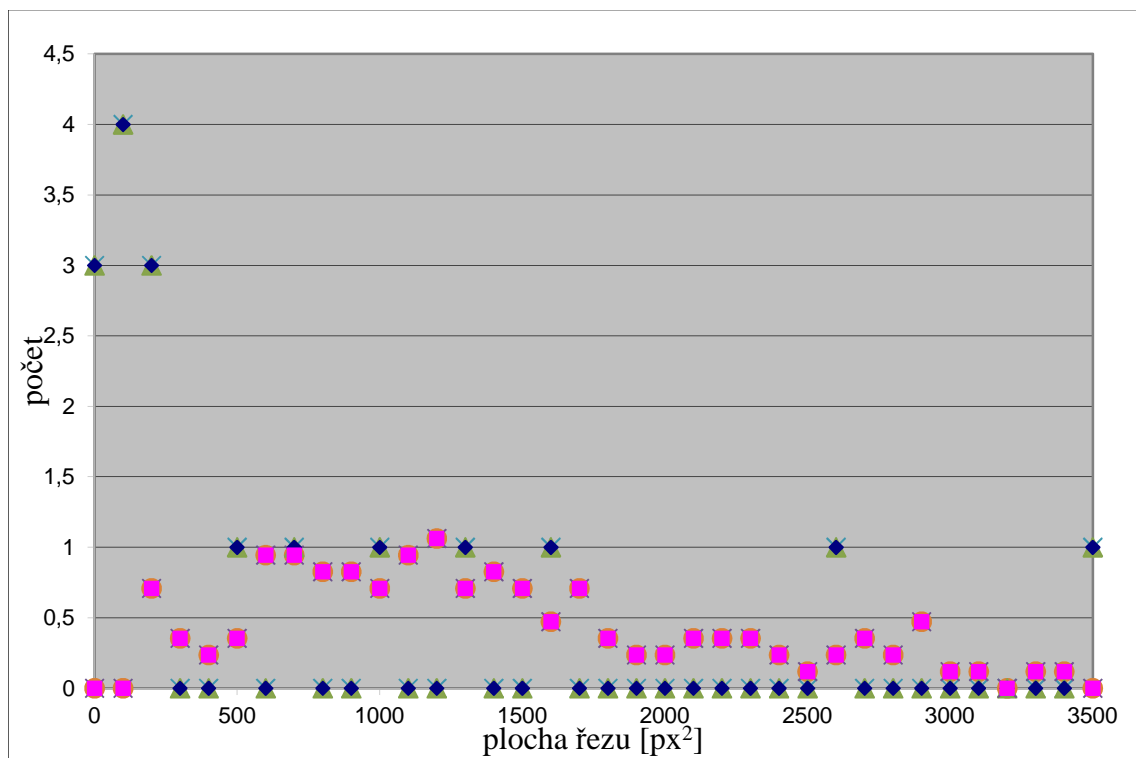
Obr. 10 – ZF 2080 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou



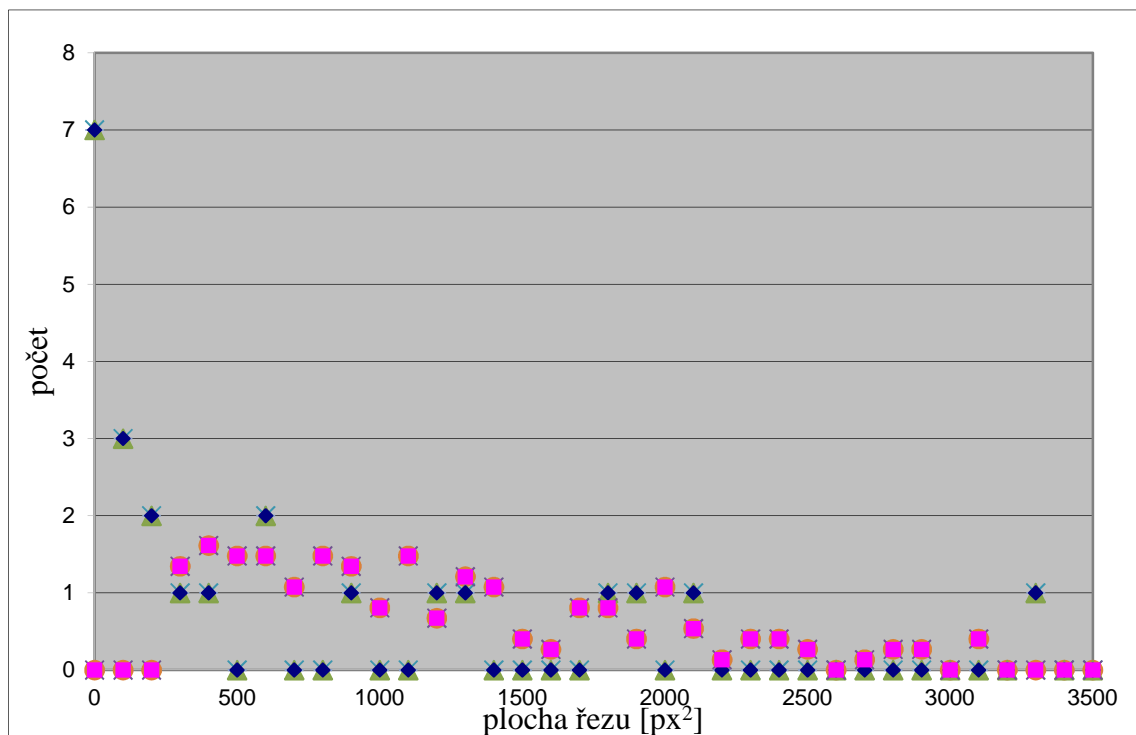
Obr. 11 – ZF 7030 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou



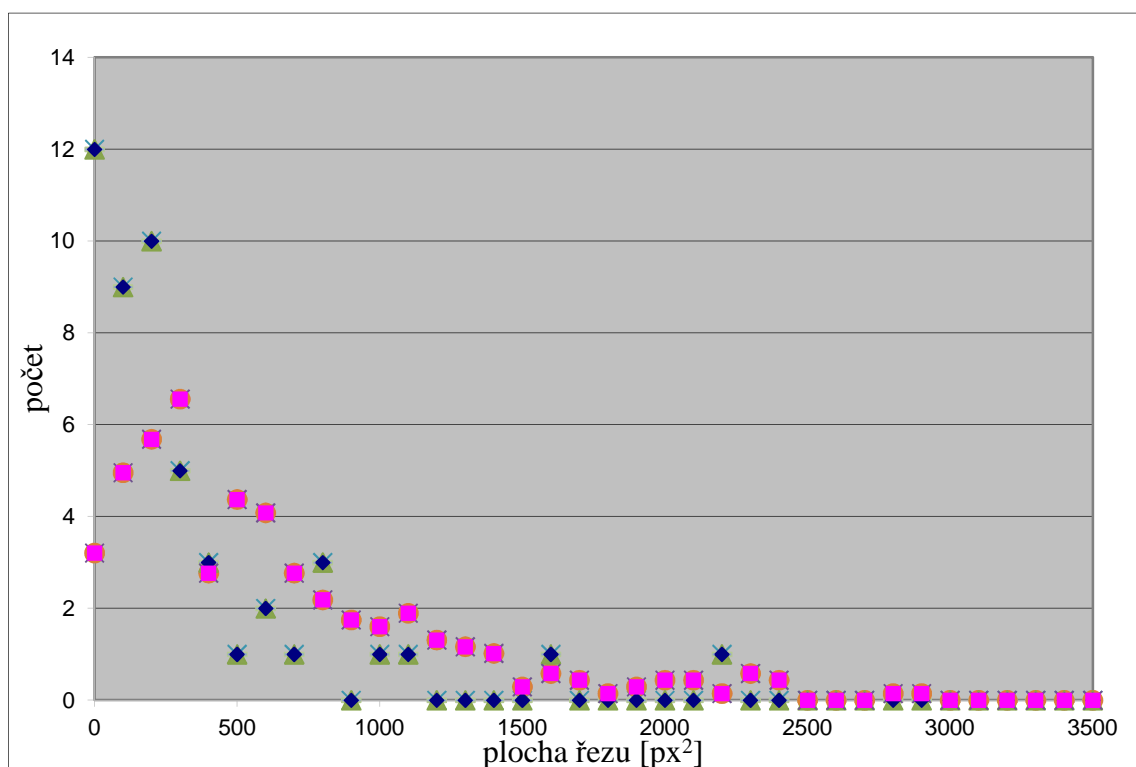
Obr. 12 – ZF 4060 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou



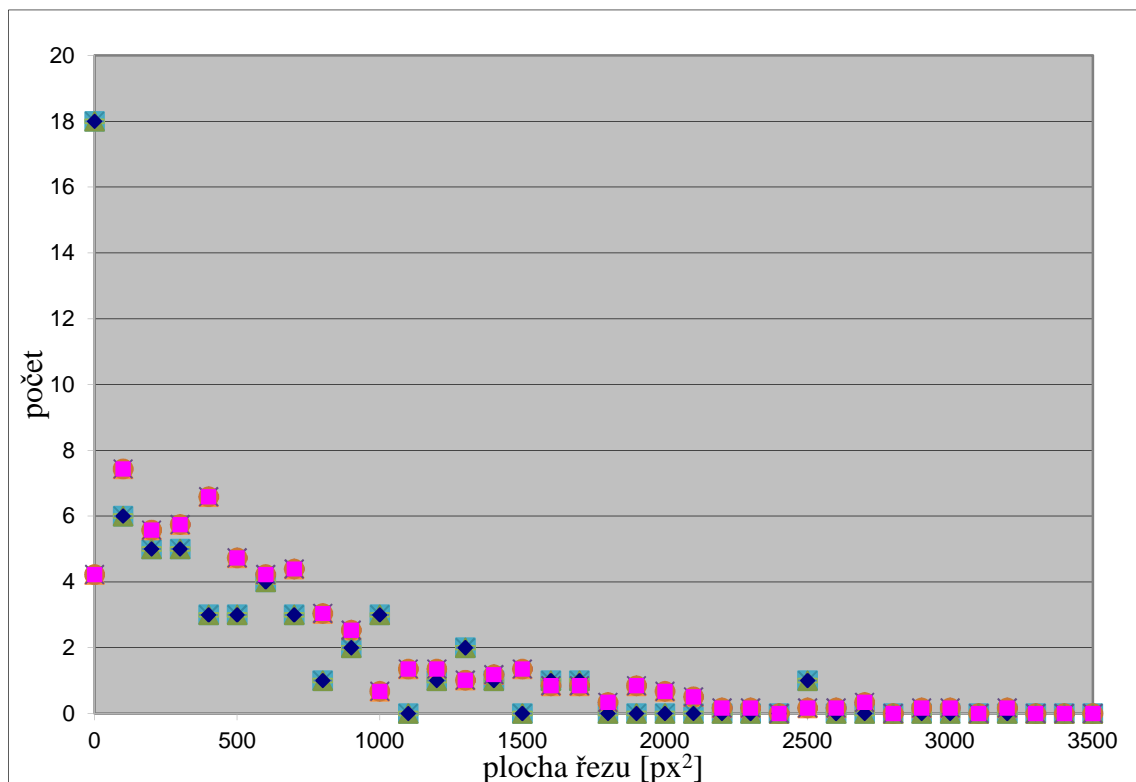
Obr. 13 – ZF 5050 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou



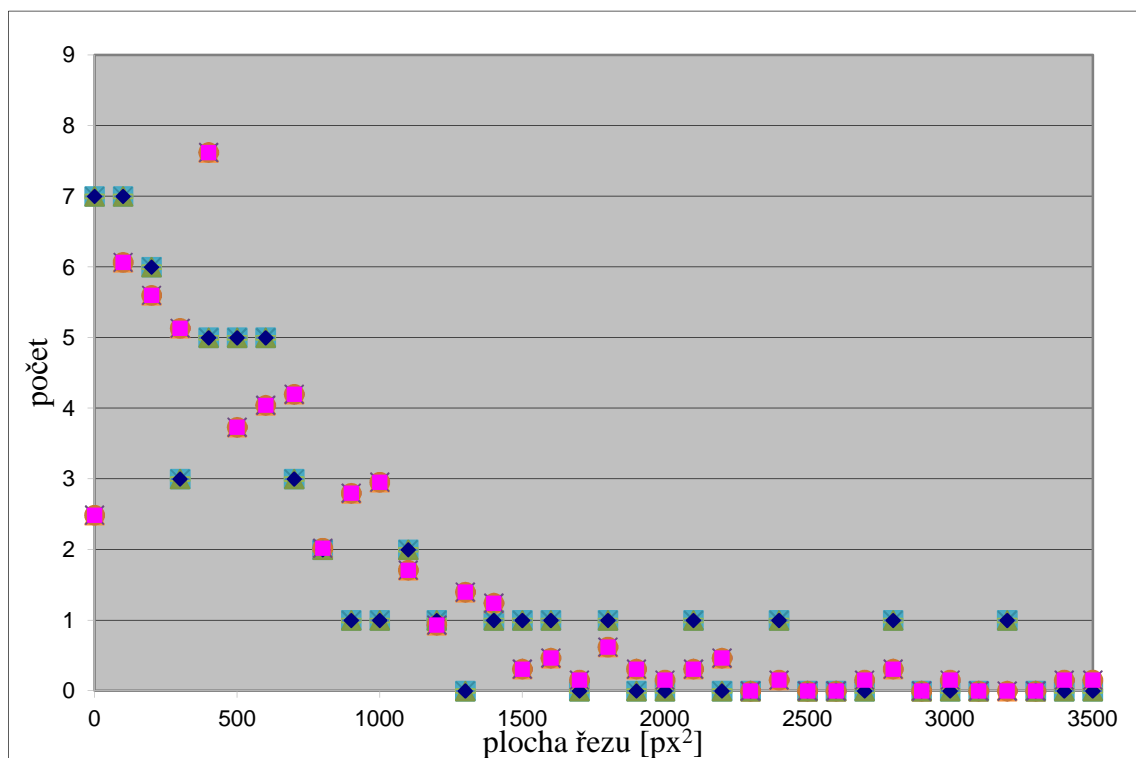
Obr. 14 – ZF 6040 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou



Obr. 15 – ZF 7030 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou



Obr. 16 – ZF 8020 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou

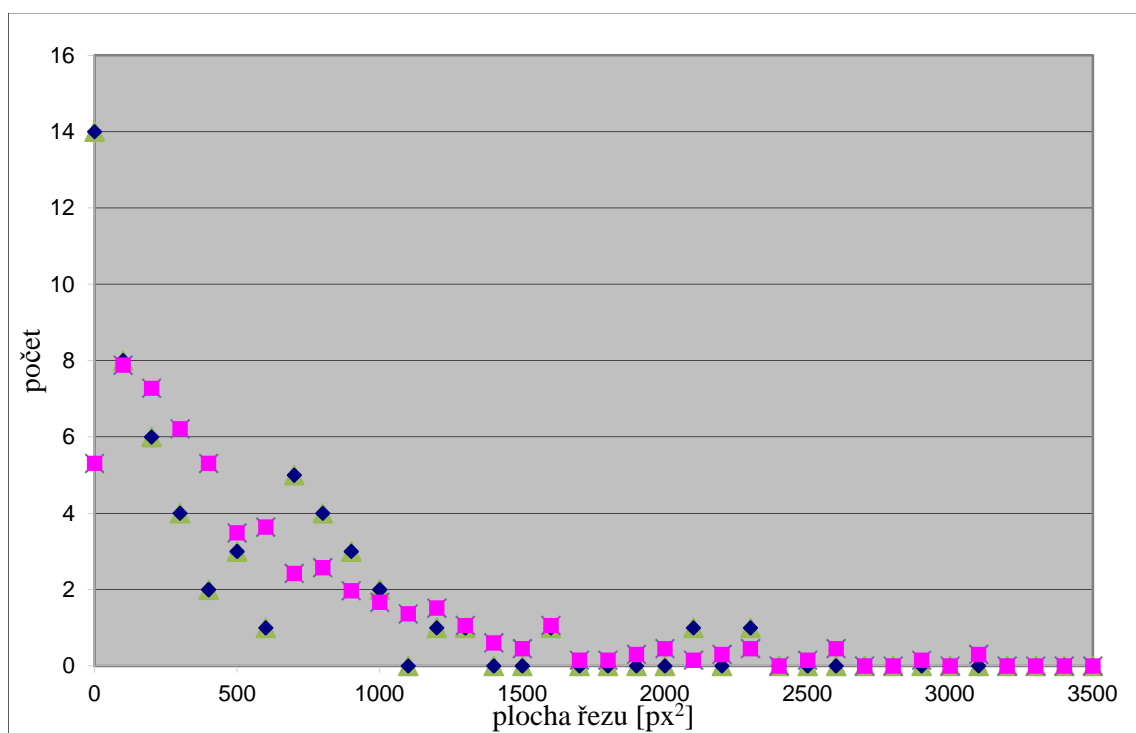


Obr. 17 – ZF 9010 Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou

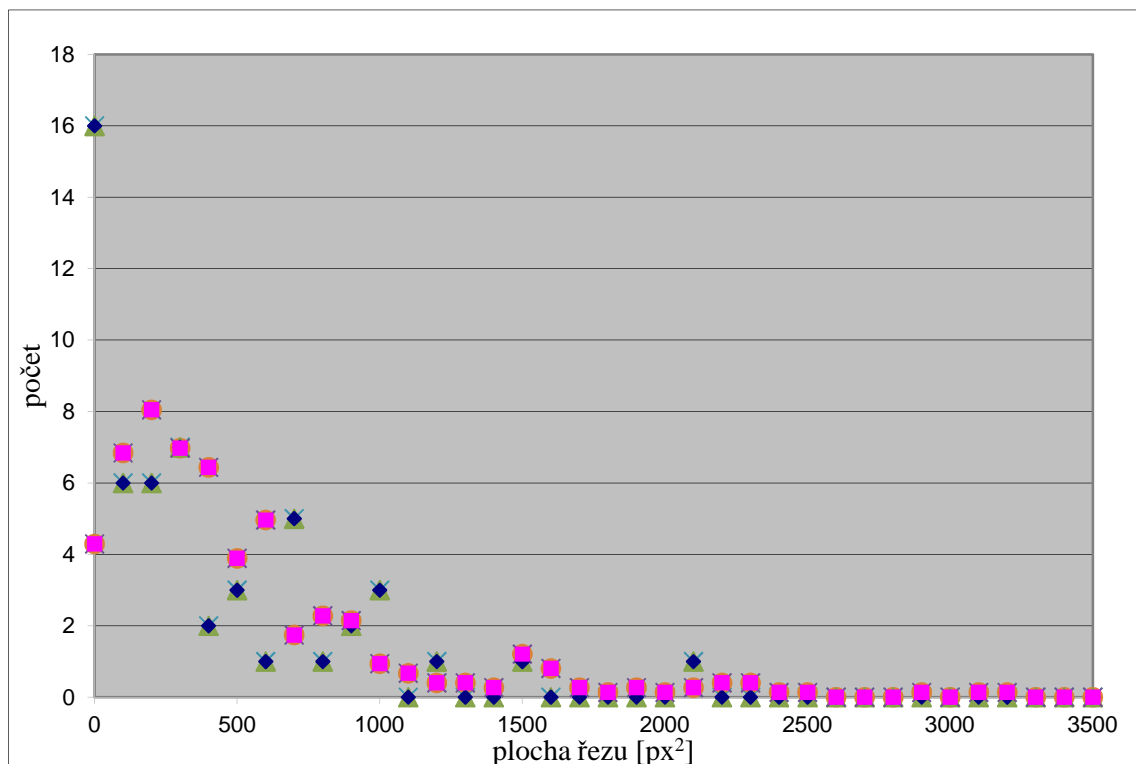
4.3.1.2 Série FS

Tab. 6 – Objem pórů vzorků série FS

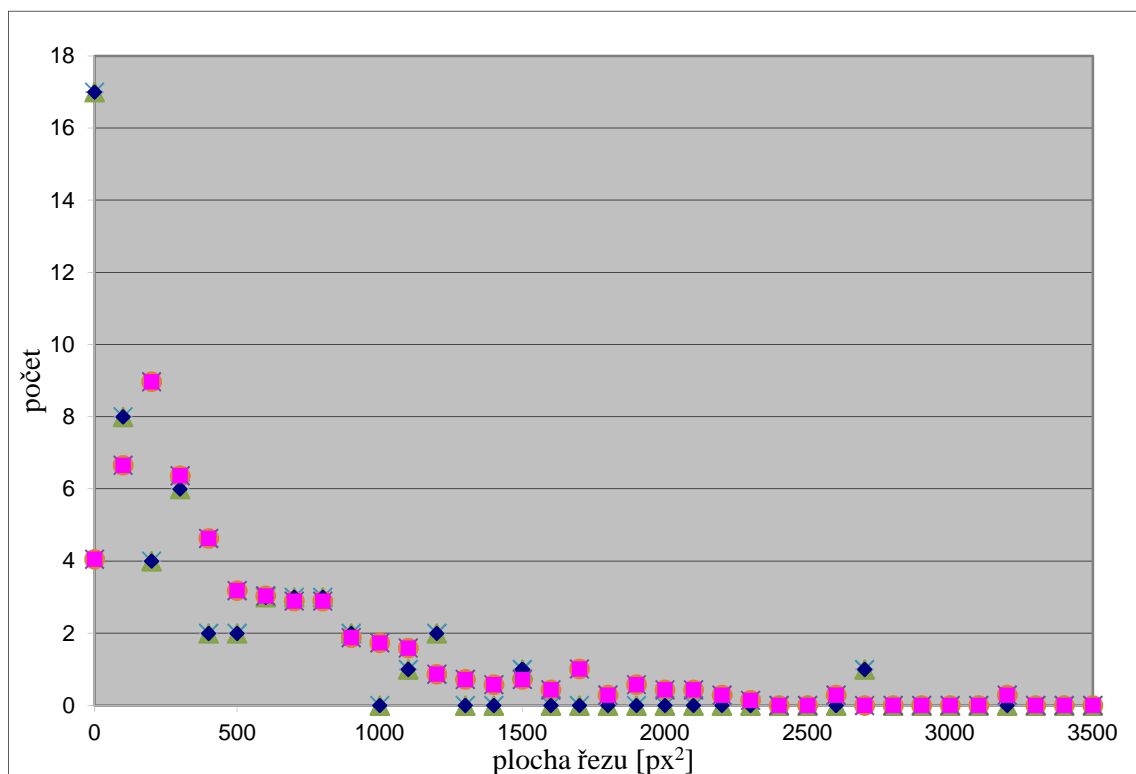
Vzorek	EV_1 [mm ³]	EV_2 [mm ³]
F 100	60,55	19,89
FS 1090	54,33	16,66
FS 2080	60,15	18,45
FS 4060	46,53	14,96
FS 5050	41,97	16,61
FS 6040	46,61	21,29
FS 7030	44,56	16,33
FS 9010	33,58	15,21



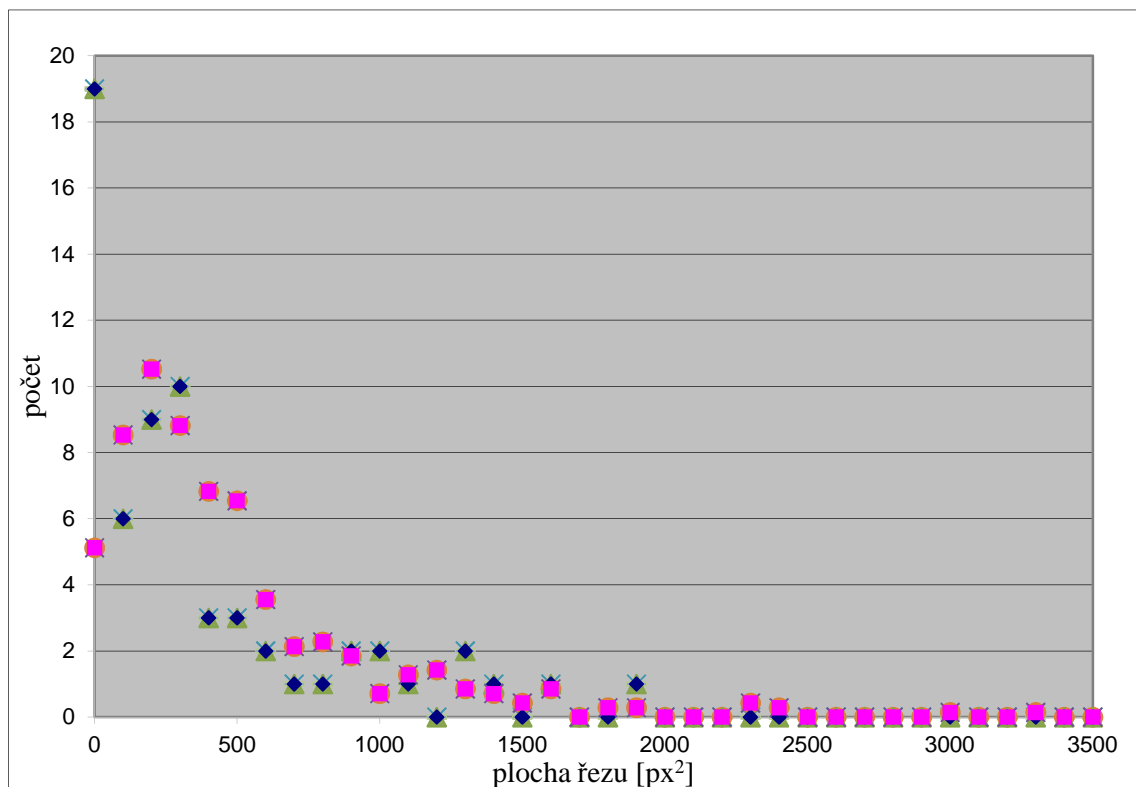
Obr. 18 – FS 100 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou



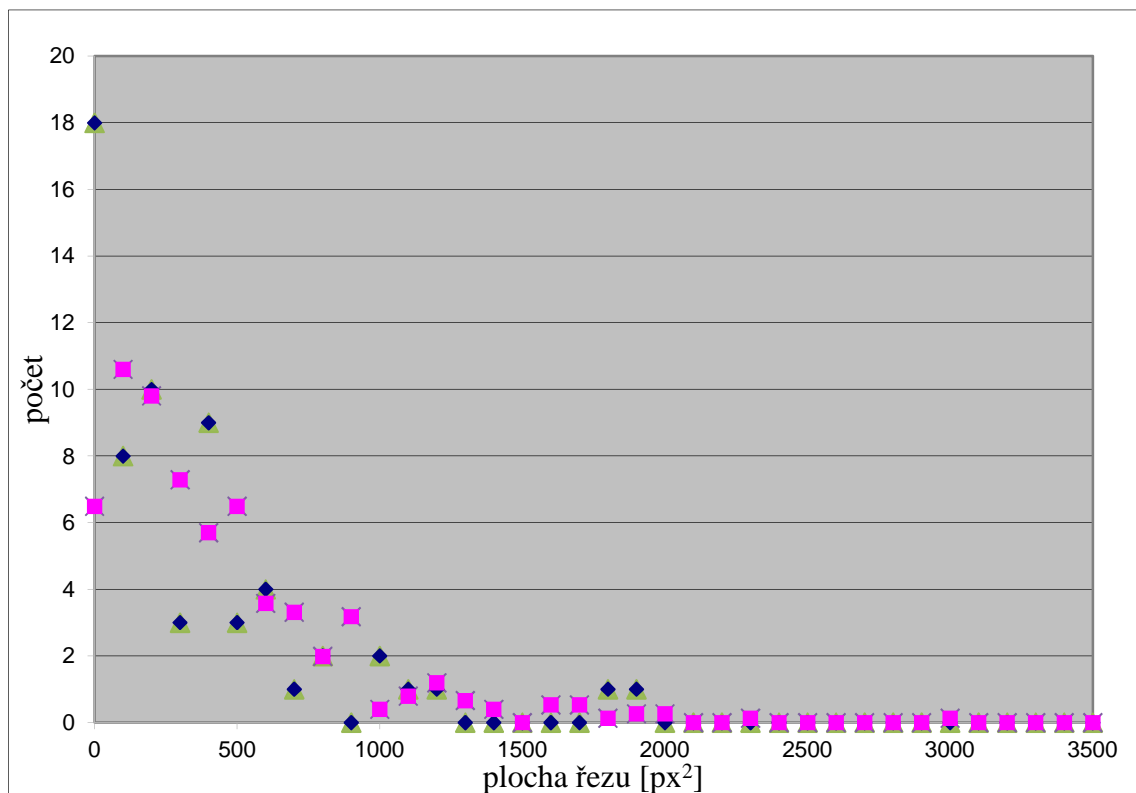
Obr. 19 – FS 1090 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou



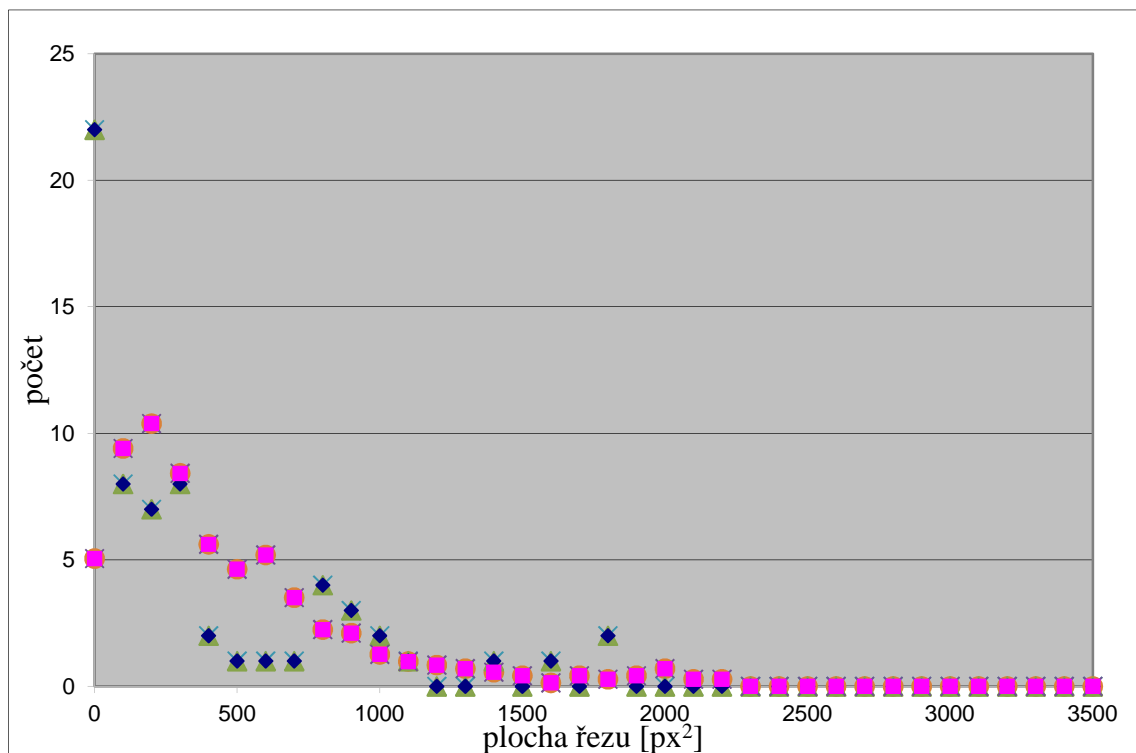
Obr. 20 – FS 2080 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou



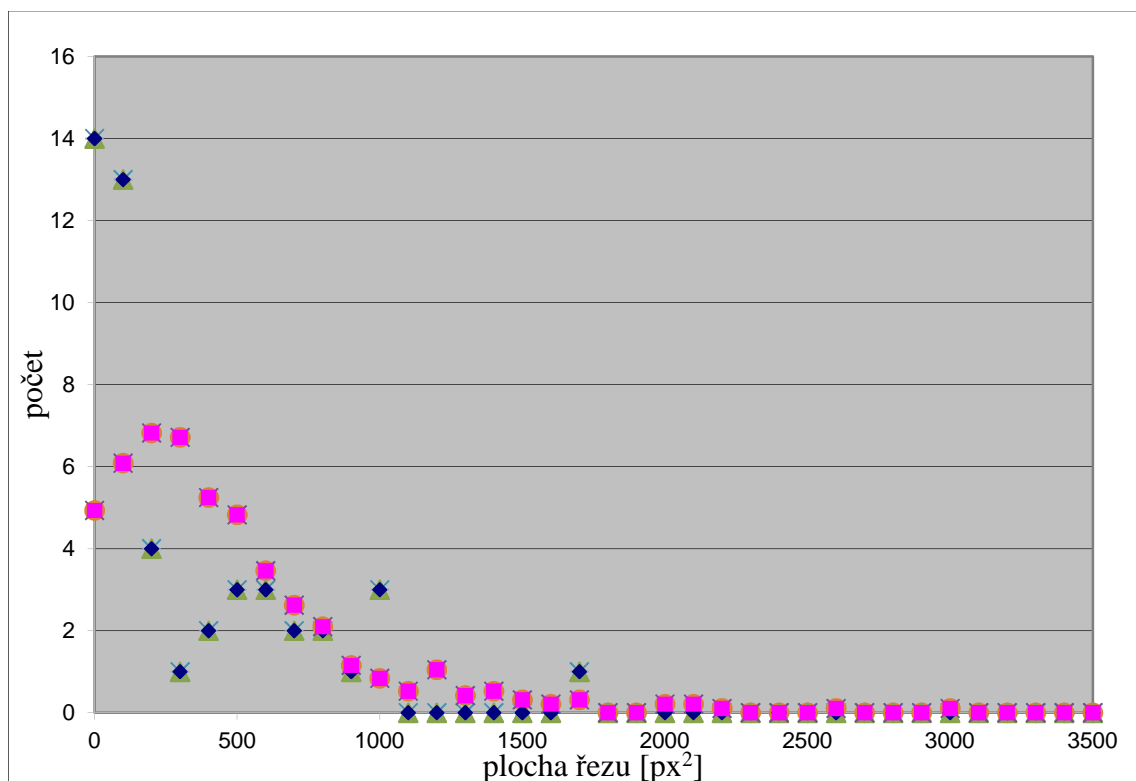
Obr. 21 – FS 4060 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou



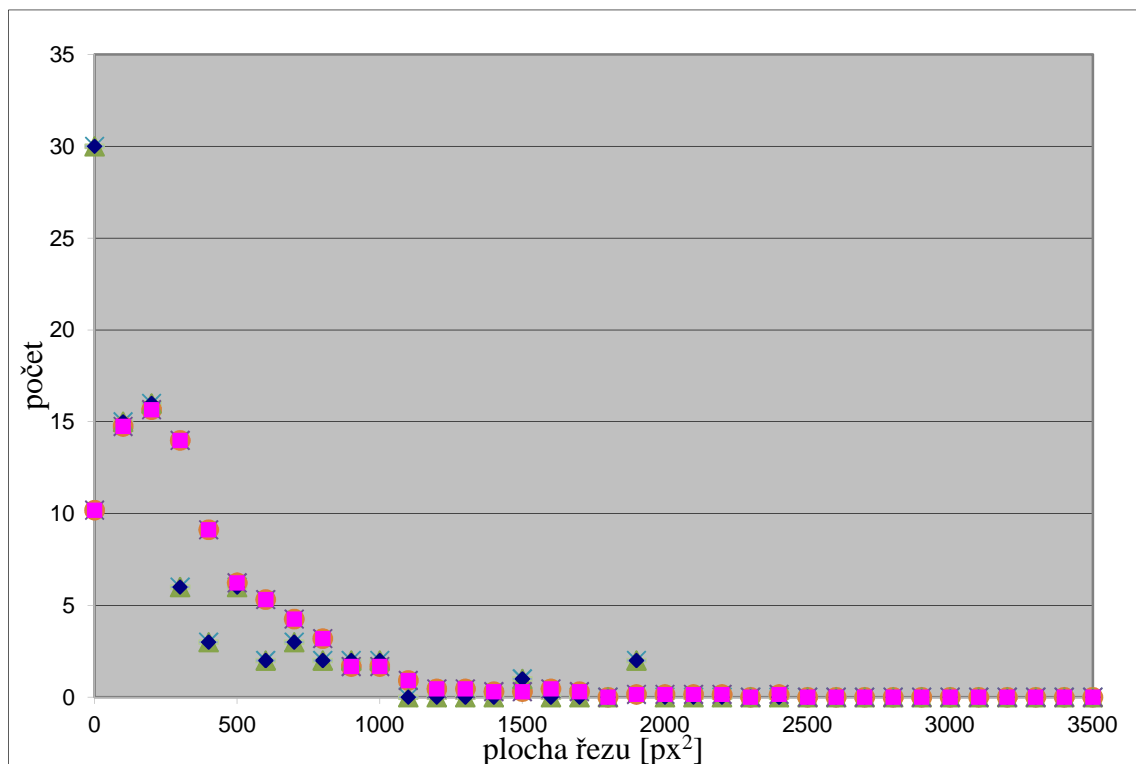
Obr. 22 – FS 5050 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou



Obr. 23 – FS 6040 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou



Obr. 24 – FS 7030 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou

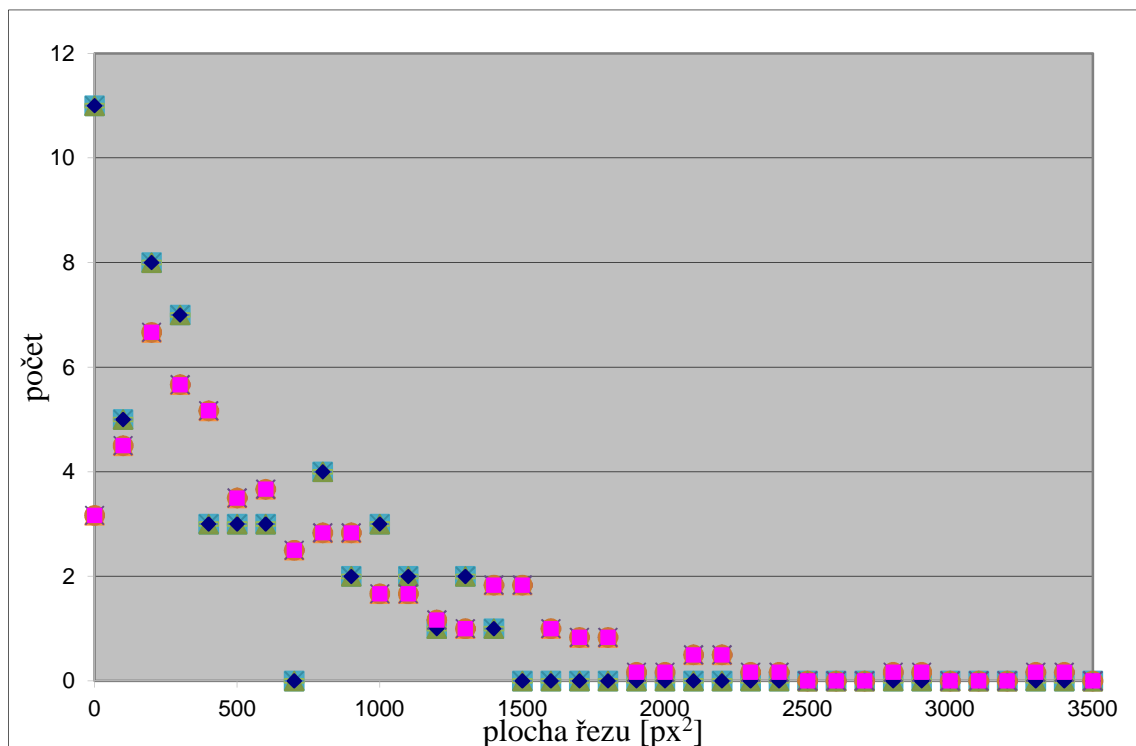


Obr. 25 – FS 9010 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou

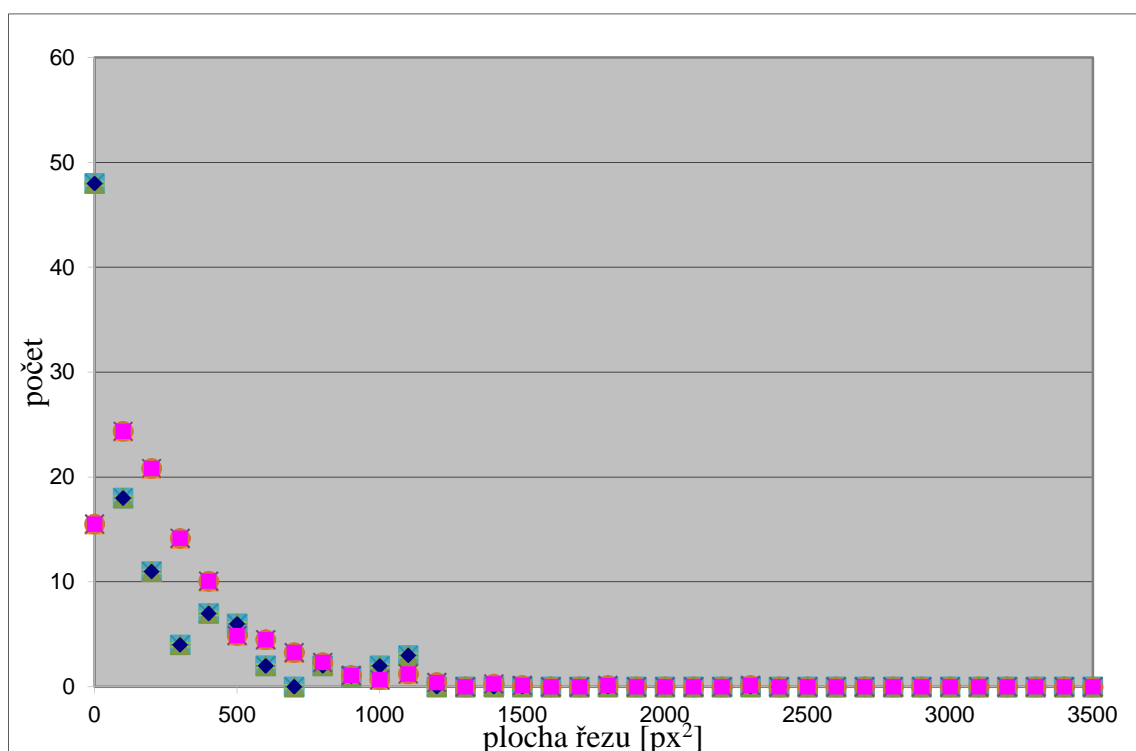
4.3.1.3 Série ZF 2

Tab. 7 – Objemy pórů vzorků série ZF 2

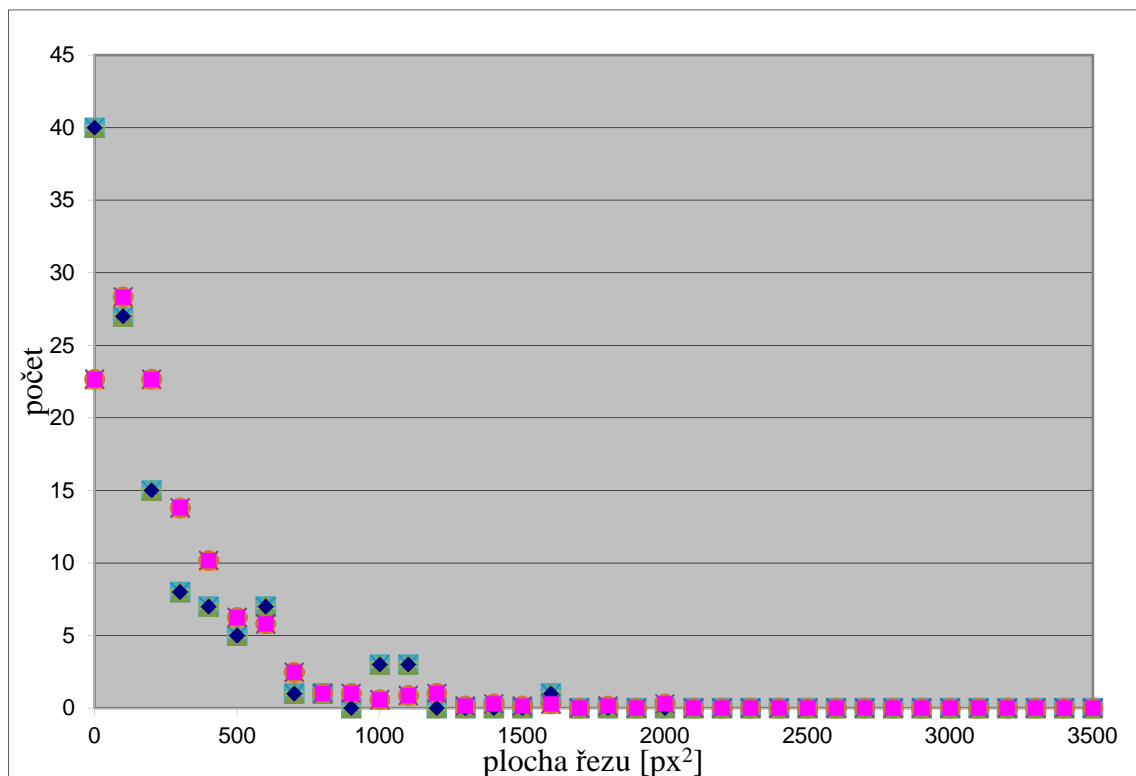
Vzorek	EV_1 [mm ³]	EV_2 [mm ³]
Z 2 100	80,69	19,81
ZF 2 1090	22,91	7,13
ZF 2 2080	20,90	9,60
ZF 2 3070	24,37	9,26
ZF 2 4060	30,02	15,16
ZF 2 5050	36,21	9,09
ZF 2 6040	22,68	10,59
ZF 2 7030	25,46	12,94
ZF 2 9010	37,60	13,46



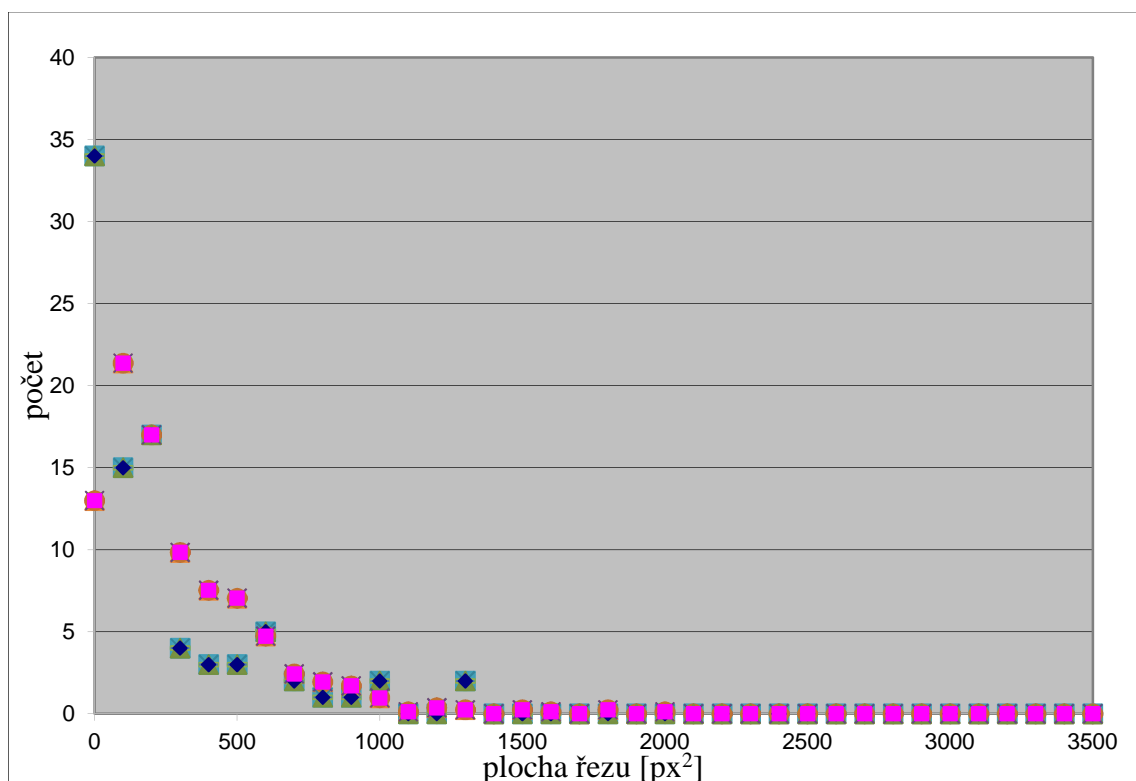
Obr. 26 – Z 2 100 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou



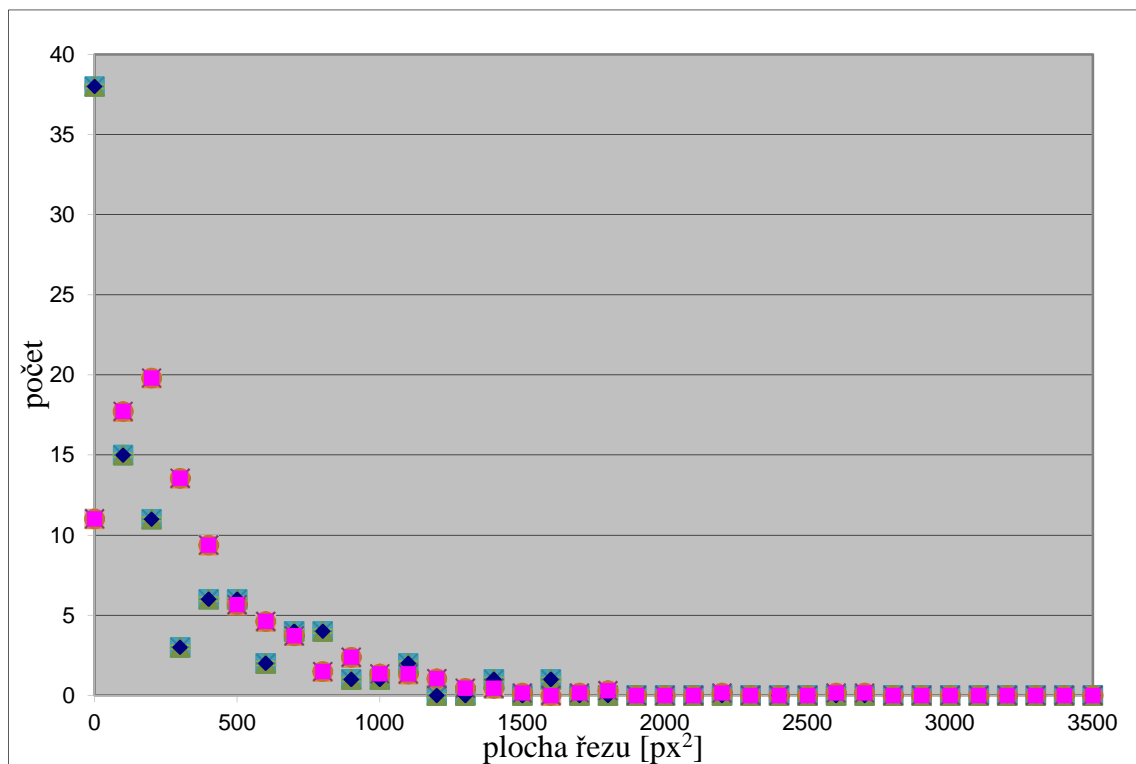
Obr. 27 – ZF 2 1090 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou



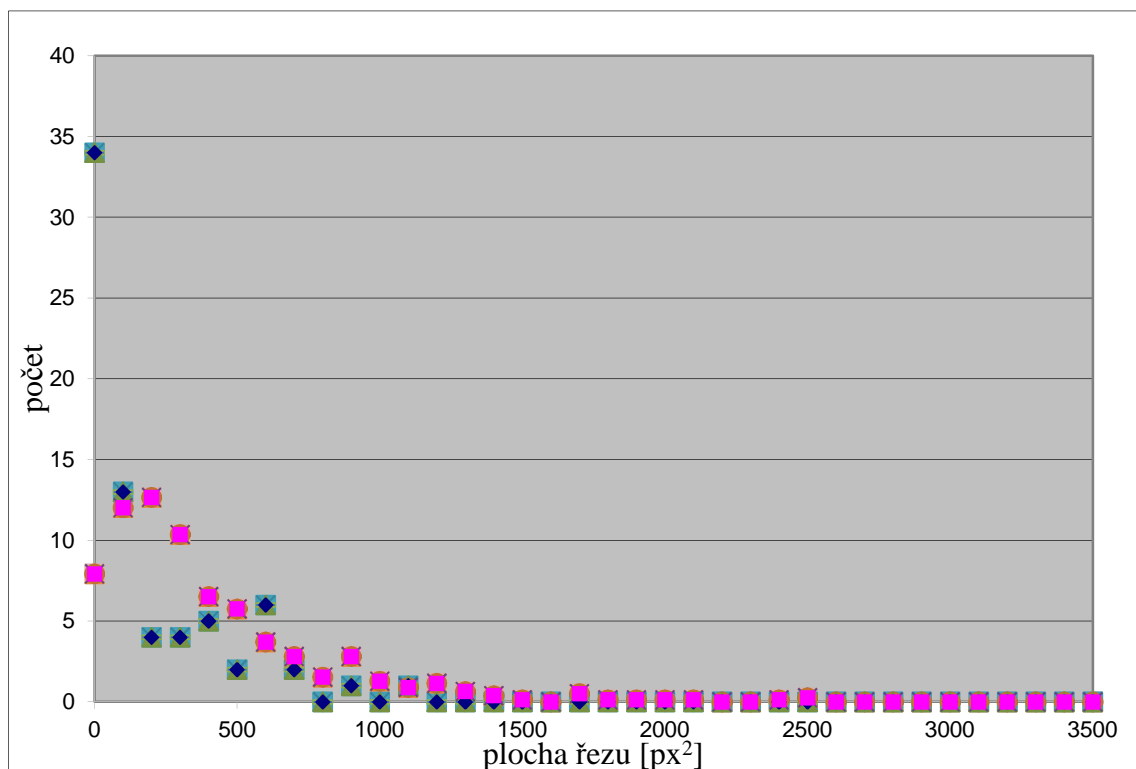
Obr. 28 – ZF 2 2080 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou



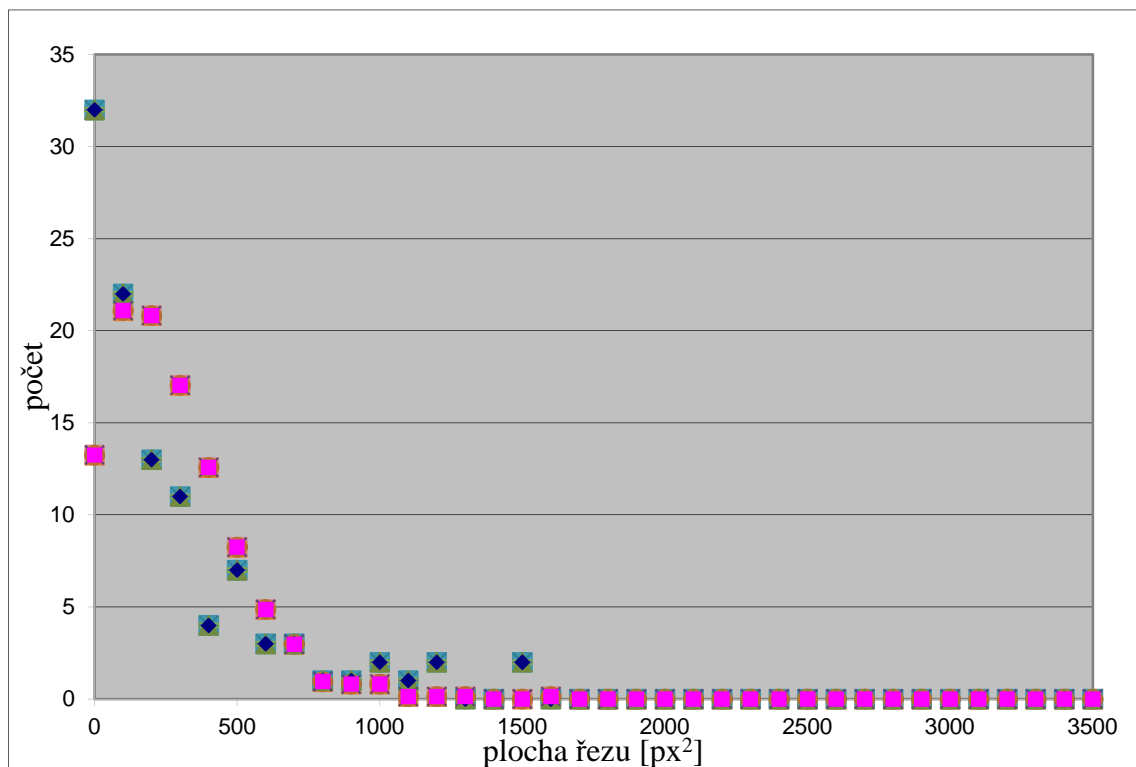
Obr. 29 – ZF 2 3070 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou



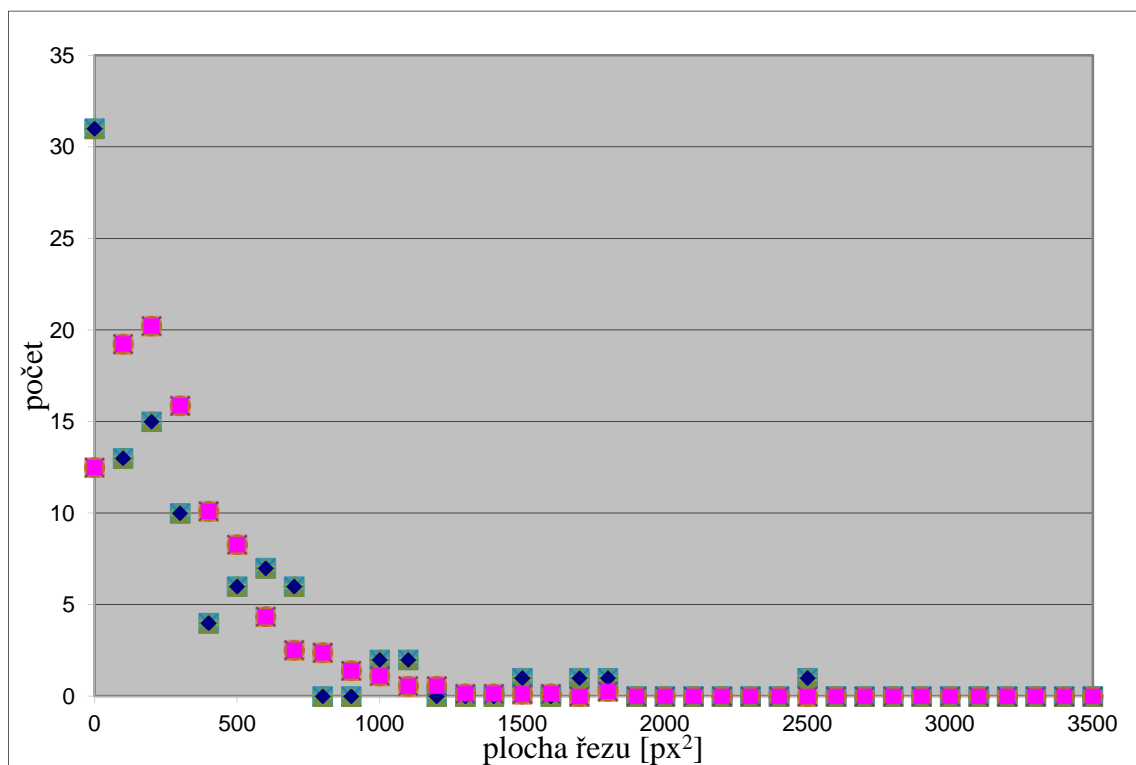
Obr. 30 – ZF 2 4060 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou



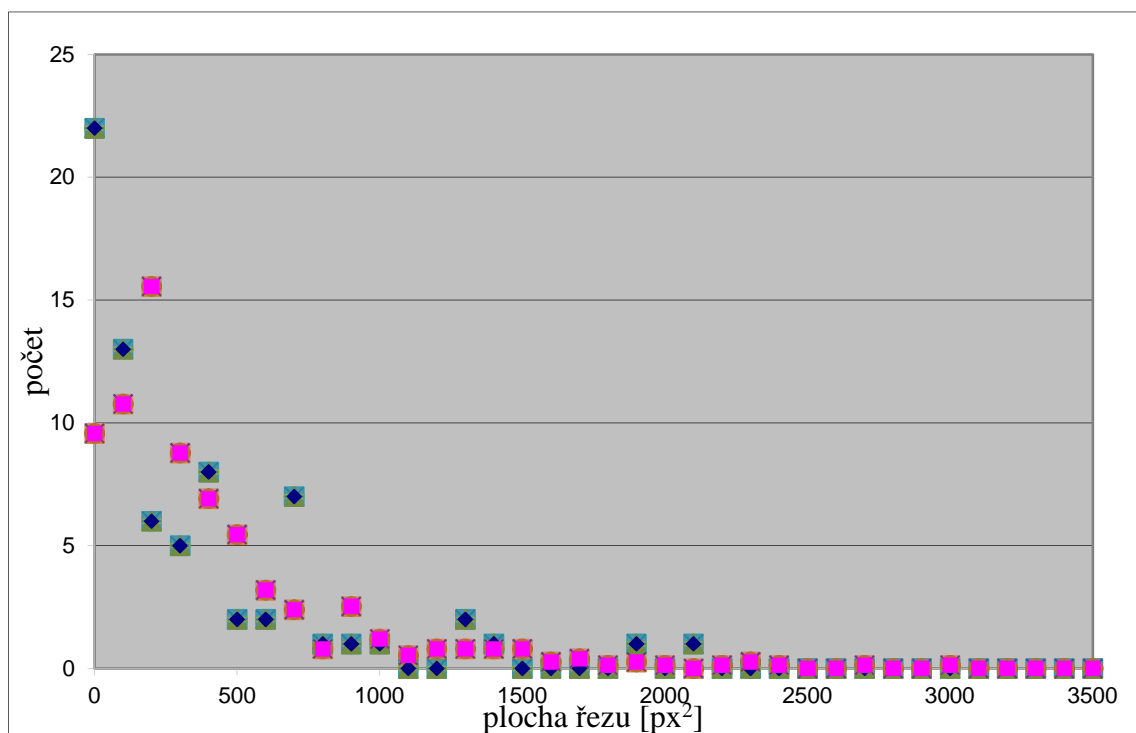
Obr. 31 - ZF 5050 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou



Obr. 32 – ZF 2 6040 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou



Obr. 33 – ZF 7030 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou

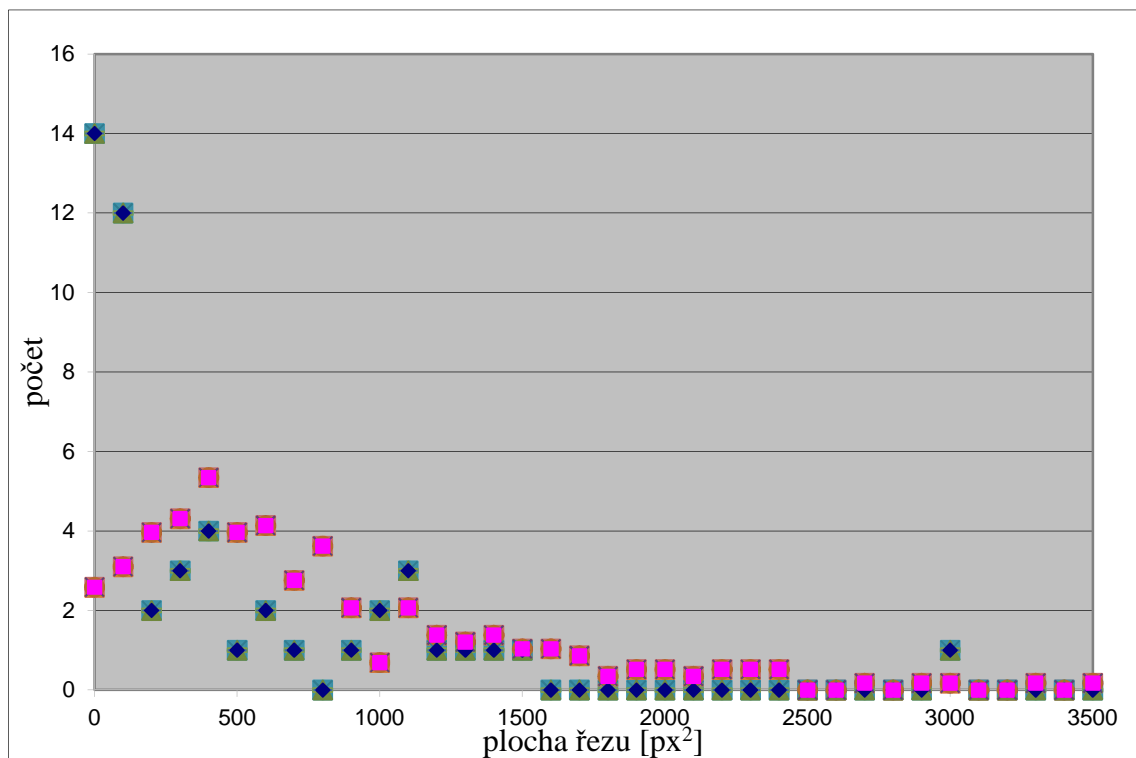


Obr. 34 – ZF 2 9010 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou

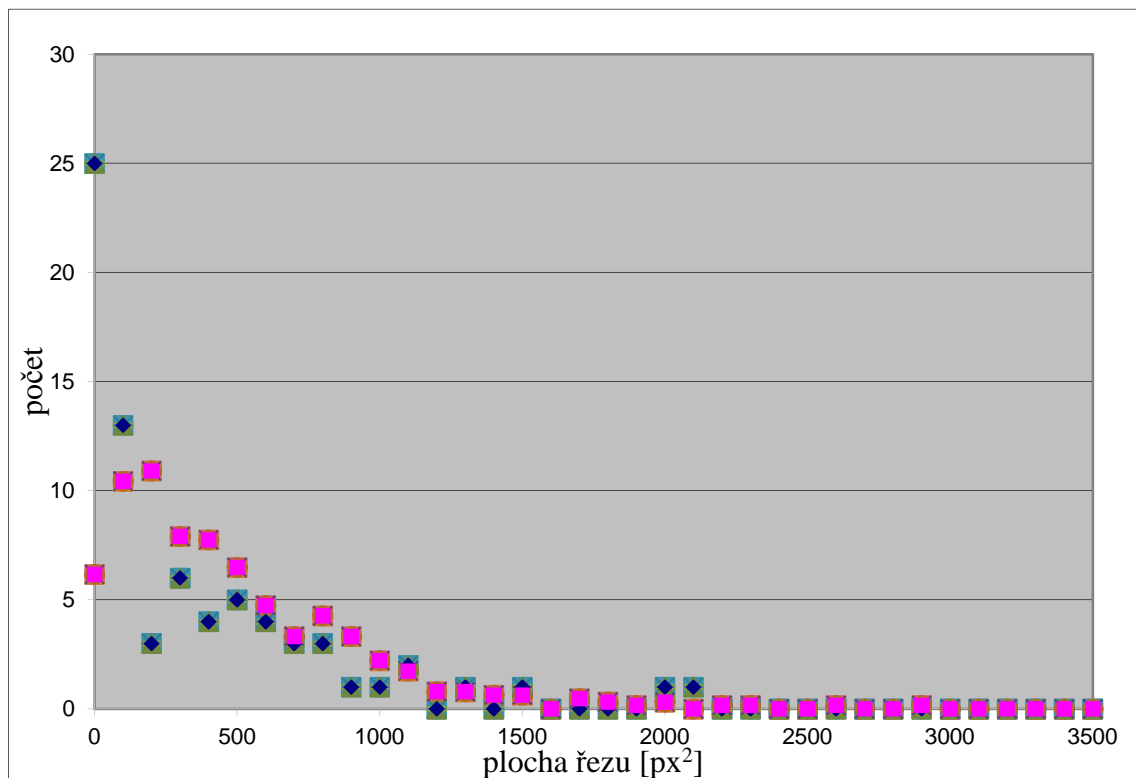
4.3.1.4 Série ZS

Tab. 8 – Objemy pórů vzorků série ZS

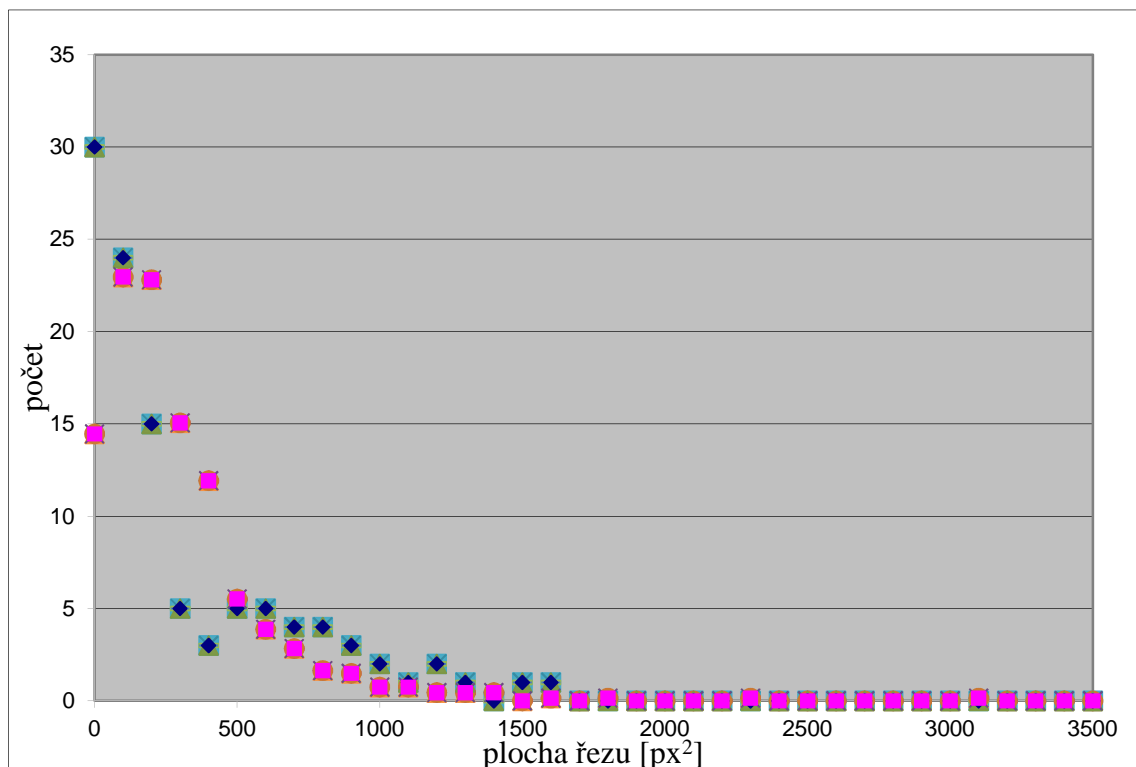
Vzorek	EV_1 [mm ³]	EV_2 [mm ³]
Z 100	94,44	22,05
ZS 5050	46,64	18,36
ZS 7030	23,87	12,32
ZS 8020	54,19	18,68
ZS 9010	57,47	16,42



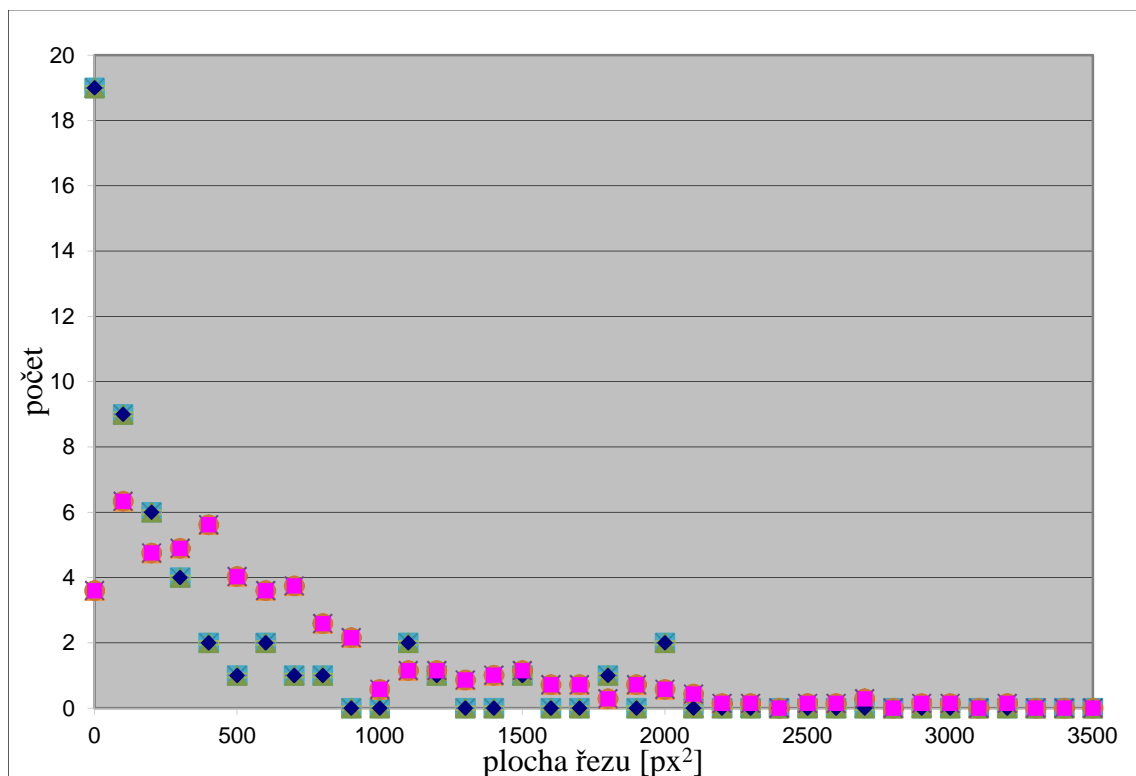
Obr. 35 – Z 100 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou



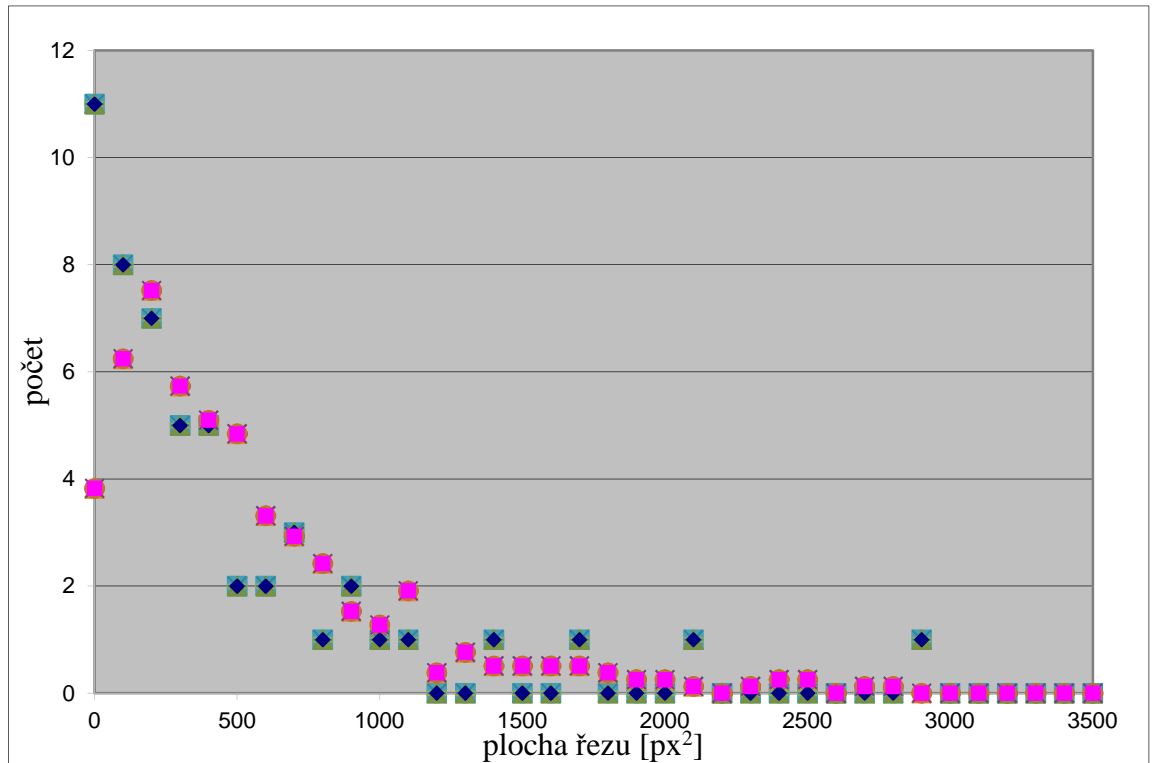
Obr. 36 – ZS 5050 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou



Obr. 37 – ZS 7030 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou



Obr. 38 – ZS 8020 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou



Obr. 39 – ZS 9010 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou

Obrázek 8 až 38 obsahuje srovnání experimentálních a modelové distribuce plochy řezu. Některé modelové body se značně odlišují od experimentálních, což je dáno tím, že program předpokládá výskyt malých pórů i tam kde jsme je neviděli.

4.3.2 Tětiny

Tab. 9 – Série ZS

Vzorek	Střední délka tětív [px]	Objem pórů [mm ³]
Z 100	39,252	22800
ZS 5050	18,576	216000
ZS 7030	17,579	254000
ZS 8020	23,129	112000
ZS 9010	22,686	118000

Tab. 10 – Série ZF

Vzorek	Střední délka tětiv [px]	Objem pórů [mm ³]
ZF 1090	26,28	76000
ZF 2080	29,269	55100
ZF 3070	28,742	58200
ZF 4060	20,219	16700
ZF 5050	34,752	32900
ZF 6040	31,132	45000
ZF 7030	25,955	79000
ZF 8020	35,989	29900
ZF 9010	39,115	23100

Tab. 11 – Série FS

Vzorek	Střední délka tětiv [px]	Objem pórů [mm ³]
F 100	20,969	149000
FS 1090	17,131	270000
FS 2080	18,833	207000
FS 4060	17,62	253000
FS 5050	19,831	177000
FS 6040	17,151	274000
FS 7030	16,77	293000
FS 9010	19,422	188000

Tab. 12 – Série ZF 2

Vzorek	Střední délka tětiv [px]	Objem pórů [mm ³]
Z 2 100	31,318	43700
ZF 2 1090	15,078	403000
ZF 2 2080	15,073	44000
ZF 2 3070	17,686	249000
ZF 2 4060	18,145	231000
ZF 2 5050	18,689	212000
ZF 2 6040	18,73	210000
ZF 2 7030	17,959	239000
ZF 9010	17,09	277000

Metoda pro výpočet velikosti pórů pomocí tětív se neosvědčila, neboť póry o objemu několik tisíc mm³ v pečivu nejsou obsaženy. Tato metoda se musí být důkladněji rozpracována, aby se přišlo na případné chyby ve výpočtech nebo zpracování.

ZÁVĚR

Byla navržena a ověřena metoda měření velikosti pórů v pečivu. Metoda vyžaduje pouze minimální experimentální vybavení a i její aplikace je velmi jednoduchá. Byly změřeny velikosti objemů pórů v pečivu a jejich distribuce. Bylo dokázáno, že měnící se obsah jedné složky způsobuje také změnu struktury pečiva, respektive velikost pórů. Byla rovněž změřena hustota vzorků pečiva, jejímž výsledkem bylo, že větší obsah žitné mouky v pečivu způsobuje výskyt menších pórů a větší obsah kukuřičné mouky naopak způsobuje výskyt menších pórů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Česká republika. Vyhláška: kterou se provádí § 18 písm. a), d), h), i), j) a k) zákona č. 110/1997 Sb., o potravinách a tabákových výrobcích a o změně a doplnění některých souvisejících zákonů, pro mlýnské obilné výrobky, těstoviny, pekařské výrobky a cukrářské výrobky a těsta. In: *333/1997 Sb.* Ministerstvo zemědělství, 1997, č. 11, 111/1997.
- Dostupné z: <http://eagri.cz/public/web/mze/legislativa/pravni-predpisy-mze/tematicky-prehled/100055901.html>
- [2] PŘÍHODA, Josef. *Co byste měli vědět o výrobě potravin?: Technologie potravin.* Ostrava: KEY Publishing, 2009, s. 470-483. Monografie. ISBN 978-80-7418-051-4
- [3] KADLEC, Pavel. *Technologie potravin I.* Praha: VŠCHT, 2007, s. 143. ISBN 978-80-7080-509-1
- [4] MÜLLEROVÁ, Monika a Jan SKOUPIL. *Technologie pro 4 ročník střední průmyslové školy studijního oboru zpracování mouky.* Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1988, s. 240. ISBN 04-824-88
- [5] ROHOUŠ, Václav a Karel ZÁVODSKÝ. *Stroje a zařízení v pekárnách.* Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1987, s. 14. ISBN 04-831-87
- [6] DRDÁK, Milan, Július STUDNICKÝ, Eva MÓROVÁ a Jolana KAROVIČOVÁ. *Základy potravinářských technologií.* Bratislava: Malé centrum, 1996, s. 144-145. ISBN 80-967064-1-1
- [7] HLAVATÝ, Ivo, Eva SCHMIDOVÁ a Jiří HAJDÍK. *Parametry jakosti svarových spojů hodnocené metodami obrazové analýzy* [online]. [cit. 2012-04-11]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/Publikace/HlavatyFS552005.pdf>
- [8] ZMEŠKAL, Oldřich, Barbora KOMENDOVÁ, Tomáš BŽATEK a Martin JULÍNEK. *Hodnocení kvality tiskových bodů metodami obrazové (waveletové) analýzy.* Bratislava, 2004. ISBN 80-227-2100-X. Dostupné z: http://www.fch.vutbr.cz/lectures/imagesci/download/cz05_brat04.pdf. Vysoké učení technické v Brně

- [9] ZMEŠKAL, Oldřich, Martin JULÍNEK a Tomáš BŽATEK. *Obrazová analýza povrchu potiskovaných materiálů a potištěných ploch.* [online]. Pardubice, 2003[cit. 2012-04-10]. ISBN 80-7194-372-X. Dostupné z: http://www.fch.vutbr.cz/lectures/imagesci/download/cz04_pard03.pdf
- [10] AGUILERA, Jose M. a David W. STANLEY. *Microstructural Principles of Food Processing and Engineering (2nd Edition).* Springer - Verlag, 1999, s. 450. ISBN 978-0-8342-1256-5
- [11] MCCLEMENTS, David J. *Understanding and Controlling the Microstructure of Complex Food.* Woodhead Publishing, 2007, s. 833. ISBN 978-1-4200-6573-2
- [12] MARAGOS, Petros, Ronald W. SCHAFER a M. K. BUTT. *Mathematical Morphology and Its Applications to Image and Signal Processing.* Springer, 1996, s. 488. ISBN 0792397339
- [13] SHIH, Frank Y. a Shouxian CHENG. *Adaptive mathematical morphology for edge linking.* Information Science, 2004, Volume 167, Issues 1-4, s. 9-21
- [14] APTOULA, Erchan a Sébastien LEFÈVRE. *A comparative study on multivariate mathematical morphology.* Pattern Recognition, 2007, Volume 40, Issue 11, s. 2914-2929
- [15] NOVOTNÝ, Dušan a Rudolf HRACH. *Advanced image analysis and its application in thin film physics.* Vacuum, 2010, Volume 84, Issue 1, s. 266-269
- [16] BENEŠ, Viktor. *Stereologie a výběr* [online]. FS ČVUT, KTM. 1998 [cit. 2012-04-11]. Dostupné z: http://www.statspol.cz/robust/1998_benes_98.pdf
- [17] HLUBINKA, Daniel. *Dvourozměrná rozdělení charakteristik sférolitů: Extrémy a stereologie* [online]. JČMF, 2004 [cit. 2012-04-11]. Dostupné z: <http://www.statspol.cz/robust/robust2004/hlubinka.pdf>
- [18] PROCHÁZKA, Jaroslav. *Stereologie anisotropních materiálů.* Zlín, 2005. Diplomová práce (Ing.). Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická. Vedoucí práce doc. RNDr. Petr Ponížil, Ph.D.
- [19] OLŠAN, Pavel. *Počítačová rekonstrukce prostorové makrostruktury sférolitů.* Zlín, 2002. Diplomová práce (Ing.). Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická. Vedoucí práce doc. RNDr. Petr Ponížil, Ph.D.

- [20]GALETKA, Marek. *Obrazová analýza rovinného řezu pěnou*. Zlín, 2010. Diplomová práce (Ing.). Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická. Vedoucí práce doc. RNDr. Petr Ponížil, Ph.D.
- [21]PONÍŽIL, Petr. *Prostorové teselace – teze k rigorózní zkoušce*. Zlín, 1998. Vysoké učení technické Brno. Fakulta technologická ve Zlíně
- [22]ČERMÁK, Roman. *Rovinné teselace jako model růstu sférolitů*. Zlín, 2001. Diplomová práce (Ing.). Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická. Vedoucí práce doc. RNDr. Petr Ponížil, Ph.D.
- [23]SPÁČIL, Ondřej. *Stereologie polymerních materiálů*. Zlín, 2003. Diplomová práce (Ing.). Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická. Vedoucí práce doc. RNDr. Petr Ponížil, Ph.D.
- [24]ICC standart No. 131 *Method for Test Baking of Wheat Flours*. International Association for Cereal Science and Technology, Vienna, Austria, 1980
- [25]Matoušek, Tomáš. *Pore Size Estimation, Recent Researches in Geography, Geology, Energy, Environment and Biomedicine*, ISBN 978-1-61804-022-0

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

CCD	charged coupled device
A	plocha
M_A	celková plocha
D	ekvivalentní průměr
π	Ludolfovo číslo
P_D	průměrná projekce
L	délka
MM	matematická morfologie
N_V, N_A, N_L	reciproké veličiny k veličinám v, v', v''
v	střední objem cely 3D teselace
v'	střední plocha profilu (řezu 3D cely náhodnou rovinou)
v''	střední délka tětiny (řezu 3D cely náhodnou přímkou)
$E \bullet$	střední odhad veličiny \bullet
s	střední povrch póru
w	střední šířka póru
c, c', c''	konstanty úměrnosti mezi $E_V, E_{V'}$ a $E_{V''}$
BP	bodový systém
x	souřadnice
V_i	cela Voronoiovy teselace
R^d	d -rozměrný euklidovský prostor
E_+^d	poloprostor ohraničený nadrovinou symetrie
PVT	Poisson-Voronoiova teselace
EDM	Euklidovská distanční mapa
C'	konstanta pro výpočet objemu póru

°C	stupeň Celsius
Z	kukuřice
F	pohanka
S	žito
V	objem
r	poloměr koule

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 – Snímek pořízený fotoaparátem	24
Obr. 2 – Ukázka Dilatace a Eroze (z leva: původní obrázek, dilatovaný a erodovaný)	26
Obr. 3 – Výsledný obrázek po zpracování v programu ImageJ.....	26
Obr. 4 – Oříznutý a Invertovaný vzorek	27
Obr. 5 – EDM zkonstruovaná na obrázku	28
Obr. 6 – Kružnice vepsané do středu pórů.....	28
Obr. 7 – Síť aproximující rovinný řez póry	29
Obr. 8 – Vzorek s modře zbarveným pozadím	30
Obr. 9 – ZF 1090 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou.....	31
Obr. 10 – ZF 2080 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou.....	32
Obr. 11 – ZF 7030 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou.....	32
Obr. 12 – ZF 4060 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou.....	33
Obr. 13 – ZF 5050 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou.....	33
Obr. 14 – ZF 6040 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou.....	34
Obr. 15 – ZF 7030 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou.....	34
Obr. 16 – ZF 8020 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou.....	35
Obr. 17 – ZF 9010 Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou.....	35
Obr. 18 – FS 100 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou.....	36
Obr. 19 – FS 1090 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou.....	37
Obr. 20 – FS 2080 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou.....	37

Obr. 21 – FS 4060 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou.....	38
Obr. 22 – FS 5050 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou.....	38
Obr. 23 – FS 6040 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou.....	39
Obr. 24 – FS 7030 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou.....	39
Obr. 25 – FS 9010 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou.....	40
Obr. 26 – Z 2 100 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou.....	41
Obr. 27 – ZF 2 1090 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou.....	41
Obr. 28 – ZF 2 2080 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou.....	42
Obr. 29 – ZF 2 3070 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou.....	42
Obr. 30 – ZF 2 4060 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou.....	43
Obr. 31 - ZF 5050 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou.....	43
Obr. 32 – ZF 2 6040 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou.....	44
Obr. 33 – ZF 7030 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou.....	44
Obr. 34 – ZF 2 9010 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou.....	45
Obr. 35 – Z 100 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou.....	46
Obr. 36 – ZS 5050 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou.....	46

- Obr. 37 – ZS 7030 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou..... 47
- Obr. 38 – ZS 8020 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou..... 47
- Obr. 39 – ZS 9010 - Srovnání experimentální (červené body) a modelové (modré body) distribuce plochy řezů pórů náhodnou rovinou..... 48

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 – Hustoty vzorků FS	24
Tab. 2 – Hustota vzorků ZF	24
Tab. 3 – Hustoty vzorků ZF 2	25
Tab. 4 – Hustoty vzorků ZS	25
Tab. 5 – Objem pórů vzorků série ZF	30
Tab. 6 – Objem pórů vzorků série FS	36
Tab. 7 – Objemy pórů vzorků série ZF 2	40
Tab. 8 – Objemy pórů vzorků série ZS	45
Tab. 9 – Série ZS	48
Tab. 10 – Série ZF	49
Tab. 11 – Série FS	49
Tab. 12 – Série ZF 2	49