

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra geoinformatiky

**VOJENSKÁ ARCHITEKTURA Z POHLEDU
FRAKTÁLNÍ GEOMETRIE**

Magisterská práce

Lenka PACLÍKOVÁ

Vedoucí práce: Doc. Mgr. Jiří DVORSKÝ, Ph.D.

Olomouc 2015

Geoinformatika

ANOTACE

Tato diplomová práce se zabývá stanovením fraktální dimenze vybraných opevnění v různých historických obdobích, která jsou rozdělena podle opevňovacích systémů od středověku až po období mezi světovými válkami. Výpočet fraktální dimenze u jednotlivých opevnění je proveden programem Fractal Analysis System, metodou výpočtu box-counting. V rámci práce je vyčleněn opevňovací systém středověký, rondelový, bastionový, polygonální, fortový a liniový. Bastionový opevňovací systém je dále rozdělen na další tři podkategorie – počátek bastionového opevňování, opevnění stavitele markýze de Vaubana, opevnění meziérské stavitelské školy. Celkem je zpracováno 25 objektů opevnění z různých historických období. Výpočet je prováděn pro jednotlivá obranná pásma, která jsou porovnávána v rámci každého opevňovacího systému. Hodnoty jsou srovnány i napříč historií s komentářem upřesňujícím výsledné hodnoty fraktální dimenze. Na příkladu vývoje olomouckého opevnění je dokázáno, že s vývojem dělostřelectva se hodnota fraktální dimenze snižuje a vznikají složitější tvary. Vrcholu je dosaženo u bastionového systému opevňování a nová opevnění mají opět jednodušší tvar a vyšší hodnotu fraktální dimenze.

KLÍČOVÁ SLOVA

fraktální geometrie, fraktální dimenze, vojenská architektura, opevnění, opeňování, pevnost

Počet stran práce: 51

Počet příloh: 4

ANOTATION

This diploma thesis deals with determination of fractal dimension of selected fortification in various historic periods which are divided according to fortification systems from Middle Ages to period between world wars. Calculation of fractal dimension at particular fortification is made by Fractal Analysis System program using box-counting method. Within the framework of the thesis are the Middle Ages system, the rondel system, the bastion system, the polygonal system, the fort system and the linium system set out. The bastion fortification system is further divided to another three subcategories – origin of the bastion fortification, fortifications of builder marquis de Vauban, fortification of Mezier construction school. There are 25 objects proceeded in total from different historical eras. Calculation is made for individual defensive zones which are compared within the framework of each fortification system. Values are also compared through the history with commentaries specifying final values of fractal dimension. Example of evolution of the Olomouc fortification proves that with development of artillery the fractal dimension is derogated and more complex structures arises. Limit is reached at the bastion system of fortification and new fortifications have once again simpler structure and higher level of fractal dimension.

KEYWORDS

fractal geometry, fractal dimension, military architecture, fortification, fort

Number of pages: 51

Number of appendixes: 4

Prohlašuji, že

- diplomovou práci včetně příloh, jsem vypracovala samostatně a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu,
- jsem si vědoma, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb.
- autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – školní dílo,
- beru na vědomí, že Univerzita Palackého v Olomouci (dále UP Olomouc) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, diplomovou práci užívat (§ 35 odst. 3),
- souhlasím, aby jeden výtisk diplomové práce byl uložen v Knihovně UP k prezenčnímu nahlédnutí,
- souhlasím, že údaje o mé diplomové práci budou zveřejněny ve Studijním informačním systému UP,
- v případě zájmu UP Olomouc uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít výsledky a výstupy mé diplomové práce v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona,
- použít výsledky a výstupy mé diplomové práce nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem UP Olomouc, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly UP Olomouc na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

Děkuji vedoucímu práce Jiřímu Dvorskému za rady, připomínky a především za trpělivost a vstřícnost při vedení práce.

Zde vložit originál zadání

Obsah

Úvod	9
1 Cíle práce	10
2 Použité metody a postupy zpracování	11
2.1 Data	11
2.2 Použité progamy a postup zpracování	11
3 Současný stav řešené problematiky	12
3.1 Fraktál	14
3.2 Fraktální dimenze	17
3.3 Metody výpočtu fraktální dimenze	19
4 Vojenská architektura	23
4.1 Počátky opevňování	23
4.2 Novověká opevnění	24
5 Vlastní řešení práce	34
5.1 Výběr zkoumaných objektů	34
5.2 Testování vhodného softwaru pro výpočet fraktální dimenze	35
5.3 Postup zpracování	36
6 Hodnocení výsledků	40
6.1 Středověký opevňovací systém	40
6.2 Rondelový opevňovací systém	41
6.3 Bastionový opevňovací systém	42
6.4 Klešťový a polygonální opevňovací systém	44
6.5 Fortový opevňovací systém	45
6.6 Liniový opevňovací systém	46
6.7 Vývoj opevňování v Olomouci	47
7 Diskuze	50

8 Závěr	51
LITERATURA	52

Úvod

Fraktální geometrie byla poprvé popsána v 70. letech 20. století matematikem Benoít B. Mandelbrotem. Dnes, kdy pokrok a věda jdou rychle kupředu, není možné psát, že se jedná o novou vědní disciplínu, nicméně se jedná o vědní disciplínu průlomovou. Mnoho teoretiků se na začátku začátku 20. století zabývalo zvláštními tvary, kterými byly např. Cantorovo diskontinuum, Kochova vložka nebo Sierpinského trojúhelník a právě Mandelbrotovi se tyto tvary podařilo popsat pomocí fraktální geometrie.

Dnes je fraktální geometrie využívána v mnoha vědních oborech – anatomii, ekonomii, počítačové grafice a v neposlední řadě v geovědách. Užívá se ve fyzické i socioekonomické geografii. Pomocí fraktální geometrie se zkoumají a klasifikují tvary říčních toků, struktury sídel a jak zjišťoval Janoška (2011) i rostliny na základě morfologie listů.

Tato práce se zcela netradičně zabývá vojenskou architekturou a zkoumá tvar historických opevnění od středověku až po období mezi světovými válkami. Kapitola 3 stručně popisuje současný stav použití fraktální geometrie v geovědách a seznamuje čtenáře se základními souvisejícími pojmy. Kapitola 4 se zabývá vývojem vojenské architektury a zmiňuje důležité stavební prvky, které byly v průběhu historie navrhovány a měly vliv na tvar půdorysu opevnění. V kapitole 5 je popsán postup práce a s ním spojené problémy zpracování a kapitola 6 obsahuje konečné hodnocení vybraných vojenských objektů z pohledu fraktální geometrie s ohledem na jednotlivé opevňovací systémy.

1 Cíle práce

Cílem magisterské práce je stanovení fraktální dimenze opevnění v různých historických obdobích a různých lokalitách s přihlédnutím k jednotlivým opevňovacím systémům – gotický, renesanční, rondelový, barokní bastionový a klešťový, polygonální, fortový až k modernímu liniovému. Předpoklad je takový, že se vzrůstající silou zatím hladkohlavňového dělostřelectva se bude zvyšovat fraktální dimenze opevnění. Vrcholu bude pravděpodobně dosaženo u bastionového nebo klešťového systému opevnění. A po krizi drážkovaného dělostřelectva a následně po krizi výbušného granátu se bude fraktální dimenze snižovat, tvar opevnění se bude vracet k jednodušším tvarům.

2 Použité metody a postupy zpracování

2.1 Data

Jak z názvu práce vyplývá, hlavním předmětem zkoumání jsou historická opevnění, proto bylo zapotřebí vycházet především z plánek, starých map nebo rekonstrukcí. Letecké snímky pro tyto potřeby nejsou vždy vhodné, jelikož původní pevnosti mohly být přestavěny, zničeny nebo nejsou přes vegetaci patrné. Podkladová data byla získána naskenováním z knih, případně z elektronických zdrojů. Seznam zdrojů podkladových dat je uveden v příloze 2.

2.2 Použité programy a postup zpracování

Pro digitalizaci podkladových dat byl použit software ArcMAP 10.1, který zároveň umožňuje export obrázků v různých formátech. Samotný výpočet byl realizován pomocí softwaru Fractal Analysis System. Autorem tohoto programu je Hiroyuki SASAKI, Ph. D., který podmiňuje zaslání licence na základě vyplněného formuláře, ve kterém žadatel uvádí pro jaké účely bude program využíván. Software byl zvolen na základě testování, které provedla ve své bakalářské práci, *Sofwarové možnosti výpočtu fraktální dimenze geografických jevů*, Daniela Čepová (2012).

Důležitým výchozím bodem pro začátek zpracování bylo studium opevňovacích systémů a výběr ukázkových pevností s existujícími podkladovými materiály. Dalším krokem byl výběr vhodného softwaru na výpočet fraktální dimenze. Následně byly vytvořeny obrázky opevnění, které vstupovaly do vybraného softwaru a byly pro ně vypočteny hodnoty fraktální dimenze. Tyto hodnoty byly na závěr porovnány napříč opevňovacími systémy.

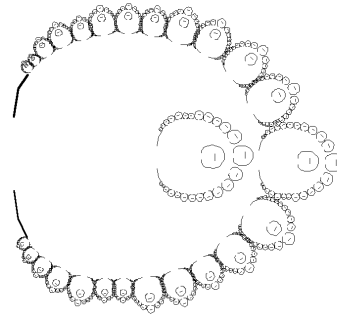
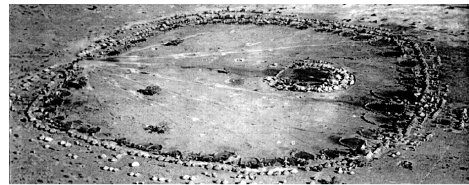
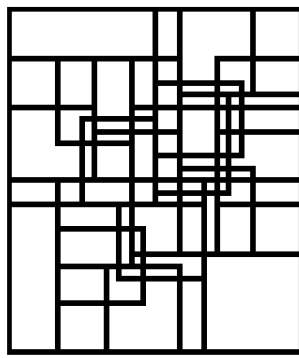
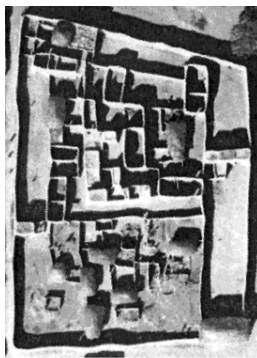
3 Současný stav řešené problematiky

Fraktální charakteristiky již byly posuzovány u spousty jevů či tvarů. V článku *Perspectives of fractal geometry in GIS analyses* (Pászto et al., 2011) autoři hovoří o vhodném využití fraktální dimenze ke klasifikaci do jednotlivých tříd. Na katedře geoinformatiky v Olomouci se Zbyněk Janoška (2011), zabýval Hausdorfovou dimenzí při studiu sídel, přesněji jak se mění tato dimenze s růstem města. Další problematikou byly možnosti automatické klasifikace do čeledí rostlin, a detailněji do druhů rostlin, na základě fraktálních charakteristik tvarů listů. Výsledky Janoškovy diplomové práce lze pokládat za úspěšné, jelikož se podařilo aplikovat fraktální analýzy k získání předpokládaných výsledků. Jak uvádí Janoška (2011), na základě pouhých dvou fraktálních charakteristik bylo možné úspěšně separovat rostlinné druhy do tří odlišných čeledí rostlin, a to s téměř 95% úspěšností (klasifikace podle druhů již tolik úspěšná nebyla).

Aby bylo možné provést roztrídění vybraných tvarů do nadefinovaných kategorií, je důležité používat pro výpočty jeden program a stejný algoritmus výpočtu např. Box-counting. O tom se přesvědčila ve své práci Čepová (2012), která ve svých případových studiích počítala fraktální dimenzi vybraných tvarů několika různými softwary. Výsledné dimenze jevů se u zkoumaných programů poměrně lišily. Je to především způsobeno různými možnostmi jednotlivých analyzátorů. Některé jsou pevně nastaveny a provedou výpočet bez uživatelského nastavení parametrů, jiné tato nastavení nabízí nebo vyžadují.

Oproti tomu Hendl (2014) hodnotil jednotlivé algoritmy, které počítají fraktální dimenzi a aplikoval je na zástavbu a komunikace středně velkých měst České republiky. Ve své práci počítal s algoritmy pokrývající dimenze, korelační dimenze a lakunarita. Již dříve se technikami výpočtu fraktální dimenze zabýval i Rypka (2008). Hendl (2014) ve své práci navíc zmiňuje výskyt fraktálů ve fyzické i v socio-ekonomické geografii.

Ron Eglash (1999) ve své knize *African Fractals* zkoumá tvary, které jsou typické pro jednotlivé kmemy v různých částech Afriky. U každého příkladu ve své knize srovnává letecký snímek, nebo půdorys osady s počítačem generovaným fraktálním modelem půdorysu. Simulace vytváří zjevné soběpříbuzné aspekty struktury půdorysu zástavby a v některých případech přináší srozumitelnější význam architektury pro lokální kultury. Principiálně jsou vesnice konstruovány tak, že dominantním místem je dům hlavního představitele osady a kolem tohoto domu jsou následně podle určitého pravidla přistavovány domy další (viz obr. 1).

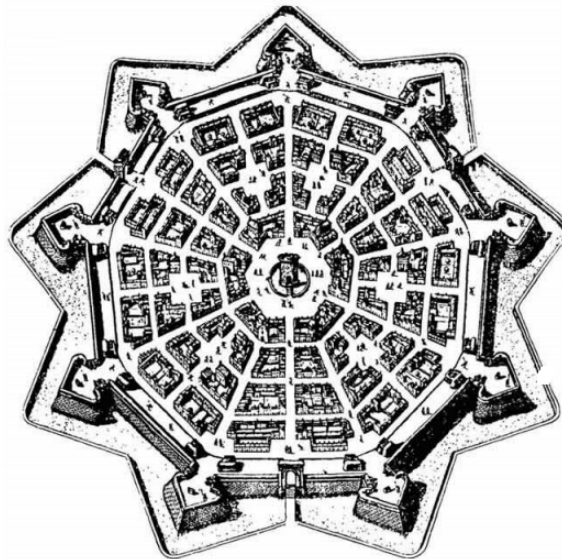


(a) Palác v osadě Logone-Birni, Kamerun.

(b) Osada Ba-ila, Zambie.

Obrázek 1: Letecké snímky afrických fraktálů a jejich počítačová simulace (převzato z: Eglash (1999)).

Batty a Longley (1994) ve své knize *Fractal Cities* popisují fraktálnost měst. Uvádí, že uliční síť měst, která vznikala na „zelené louce“, je pravidelný grid. Příkladem může být ostrov Manhattan, ale i jiná americká města. Již v renesanci vznikaly návrhy, jak by měla vypadat geometrie města. Kolem centra by byly v kružích soustředěné jednotlivé domy a centrum s okolím by bylo propojeno pravidelnou sítí ulic. Ostatně takovou strukturu je možné pozorovat u italského města Palmanova (viz obr. 2).



Obrázek 2: Palmanova podle architekta Scamozziho (převzato z: Batty a Longley (1994)).

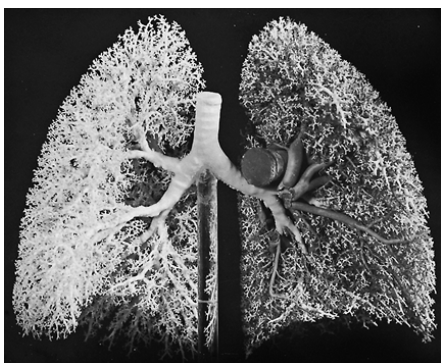
3.1 Fraktál

Prvně bylo slovo fraktál pro dané jevy použito v knize *Fraktály: Tvar, náhoda a dimenze* Mandelbrot a Fiala (2003), kde autor dále fraktál definuje jako objekt, u kterého se zkoumá zevnějšek – tedy jeho tvar. Konstrukce objektu, který má fraktální nepravidelnost, je náhodná a hlavní charakteristikou takového objektu je fraktální dimenze. Jak uvádí Mandelbrot (1982) slovo fraktál vzniklo z latinského slova fractus, které v češtině znamená zlomek. Latinské slovo frangere, které lze přeložit jako *rozbitý, rozlámaný*, nabízí možnost výkladu *vytvářet nepravidelné části*.

Přírodní fraktály

Pokud se člověk kolem sebe porozhlédne, nepochybně někde v nějakém objektu spatří fraktály. Ty se zde vyskytují ve velké míře. Lidé se s nimi běžně setkávají, aniž by si uvědomovali, co vlastně spatřují. Mandelbrot pronesl: „Mraky nejsou koule, hory nejsou kužele, blesk se nešíří po přímce. Fraktální geometrie je obrazem vesmíru, který je hrbolatý, nikoliv rovný, a podobaný nikoliv hladký. Je to geometrie důlků, jamek a hrboľů, pokřivenin, spleť a deformací.“ Jsou to specifické struktury na struktuře.

Fraktály je možné vidět v blescích při bouřce, ve větvení stromů, při detailním zkoumání sněhové vločky nebo i při pozorování větvení řeky. Pokud bude člověk z dálky pozorovat pohoří uvidí zubaté poklesy a výčnělky, pokud se přiblíží a pohoří bude prohlížet detailněji uvidí ty stejné tvary, ale menší a do jisté míry transformované (viz obr. 3).



(a) Lidské plíce
(převzato z: Burri et al. (2005)).



(b) Větvení stromu v parku na Vyšehradě.

Obrázek 3: Příklady přírodních fraktálů

Emanuel Swedenborg ¹ uvádí ve své teorii přírody, že každý náš orgán je vytvořen z podobných částí, že plíce jsou tvořeny několika maličkými plícemi, naše ledviny

¹Emanuel Swedenborg(1688-1772) švédský mystik, vědec a teolog, který ve svých spisech spojuje náboženskou a mystickou zkušenost s rozumem a racionalitou.

z malých ledvin. . . *Uvědomil jsem si to už dávno: Často jsem říkal, že každá větev stromu je kompletní malý strom, že fragment kamene je podobný velké skále, že každá hrst půdy je podobná velké hromadě půdy. . .*

Deterministické fraktály

Jak uvádí ve své práci Wiesner (2006), dříve než Mandelbrot si nejednoznačnosti v délce hranice a zvoleném měřítku všiml Lewis Fry Richardson². Richardsonovo užití fraktální dimenze k popisu členitosti pobřežní linie bylo v té době zcela originální. Byl také prvním, kdo prohlásil, že délka hranice pobřeží je ve skutečnosti nekonečná a tvary jsou statisticky stejné v široké škále délkové stupnice (Drazin, 1993). Jak ale uvádí Hotař (2011) Richardson empiricky odvodil vztah mezi délkou a měřítkem. Mandelbrot pak našel souvislosti v tomto vztahu s Hausdorffovou dimenzí a mohl tak označit pobřežní linii za fraktál (Hotař, 2011; Mandelbrot, 1982). Vědci se touto problematikou zabývali ještě před zavedením pojmu *fraktál* a *fraktální geometrie* (Tišnovský, 2000), ať už výše uvedený Richardson nebo Georg Cantor³. Ten v roce 1883 popsal Cantorovo diskontinuum (viz obr. 4), kde je úsečka délky 1 rozdělena na tři stejně velké části, prostřední díl se vyjme a stejný postup se na zbývajících dvou úsečkách opakuje nekonečně mnohokrát (Wiesner, 2006).



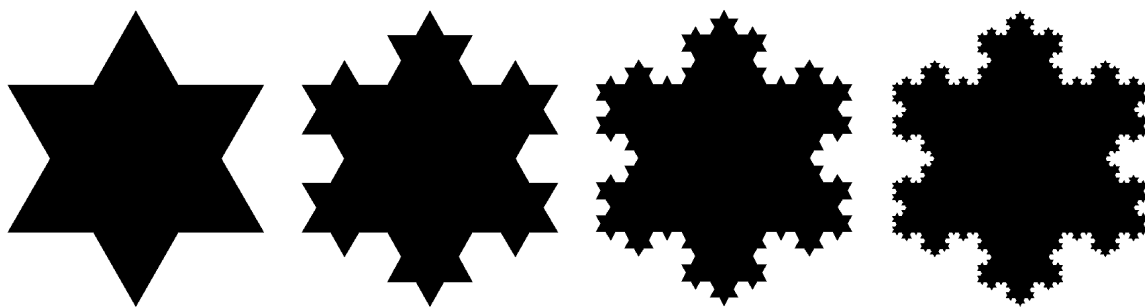
Obrázek 4: Cantorovo diskontinuum.

Dále je možné jmenovat Helgeho von Kocha⁴, který v roce 1904 světu představil Kochovu hvězdu (viz obr. 5). Kochova hvězda vychází z rovnostranného trojúhelníku, kde se následně nad středem každé strany sestrojí další rovnostranný trojúhelník. Strana vznikajícího trojúhelníku má třetinovou délku strany nad jejíž středem je sestrojován.

²Lewis Fry Richardson (1881 - 1953) anglický fyzik, matematik a meteorolog měřil délku pobřeží Korsiky různě velkými měřidly a s větší přesností měření docházelo ke zvětšování obvodu ostrova.

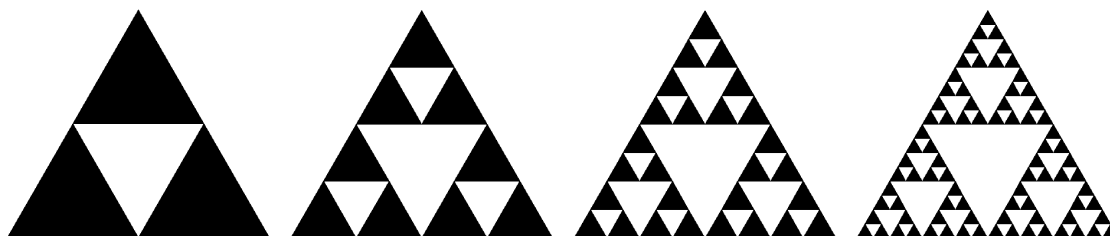
³Georg Cantor (1845-1918) významný německý matematik a logik.

⁴Helge von Koch (1870-1924) švédský matematik.



Obrázek 5: První čtyři iterace Kochovy hvězdy.

Dalším známým fraktálem je Sierpinského trojúhelník, který popsal Waclaw Sierpinsky⁵ v roce 1915. Sierpinského trojúhelník (viz obr. 6) je definován jako rekurzivní dělení trojúhelníku na menší trojúhelníkové části, vždy s výjimkou prostřední čtvrtiny, která se dále nedělí (Tišnovský, 2007).



Obrázek 6: První čtyři iterace Sierpinského trojúhelníku.

Mandelbrot ve své knize *The Fractal Geometry of Nature* poukazuje na to, že není možné popisovat přírodní objekty geometrickými tvary, jelikož je to velmi nepřesné. Není možné tedy popsat mraky jako koule a pohoří jako skupinu kuželů. Na základě tohoto poznatku začal Mandelbrot vyvíjet novou geometrii přírody a implementoval ji do mnoha různých oblastí. Zasloužil se tak o to, že je možné popsat množství nepravidelných a členitých vzorů všude kolem nás. Fraktální geometrie byla B. Mandelbrotem prvně popsána jako způsob jak matematicky definovat strukturu, jejíž dimenze není limitována na celé číslo. Jedná se tedy o odvětví matematiky, která studuje vlastnosti a chování fraktálů (Bamsley, 1993). Mandelbrotova fraktální geometrie poskytuje popis a matematický model pro mnoho zdánlivě složitých tvarů v přírodě. Popsat tvary jako pobřeží ostrova, mraky, strom, blesk, sněhovou vločku nebo pohoří, pomocí euklidovské geometrie by bylo velmi komplikované (Voss, 1988).

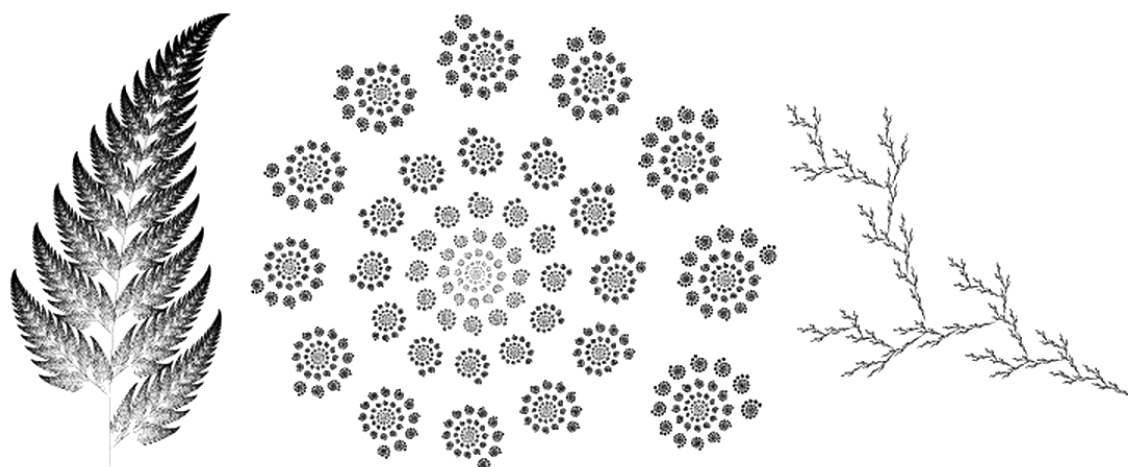
Soběpodobnost a soběpříbuznost

Vlastnost být invariantní vůči změně měřítka nazval Mandelbrot soběpodobnost a učinil z ní ústřední pojem celé své teorie. Zatímco klasická geometrie se zabývá objekty

⁵Waclaw Sierpinsky (1882-1969) polský matematik.

invariantními vůči transformacím představujícím různé symetrie, fraktální geometrie se zabývá invarianty vůči transformacím představujícím změnu měřítka (Pohlová, 1989). Soběpodobné množiny se se změnou měřítka výrazně nezmění, vždy budou vypadat podobně. Taková množina vzniká ze sama sebe a dochází tak k opakování základního tvaru. Názorným příkladem soběpodobnosti jsou matematické fraktály generované algoritmem IFS (Iterated Function Systems – Systém iterovaných funkcí) (viz obr. 7) (Petyovský a Tišnovský, 2003).

Setkat se se soběpříbuznými fraktály je možné spíše v přírodě, ať už se jedná o lidské tělo (cévní systém, průdušinky, závit mozku), strom (viz obr. 3), kořenový systém rostliny, oblaka, říční síť nebo hory. Při zvětšení na část fraktálu je patrná příbuzná kopie původní tvaru. Soběpříbuzný fraktál vzniká pomocí afinních transformací – posunem, rotací, změnou měřítka.



Obrázek 7: Fraktály generované algoritmem IFS (převzato z: Petyovský a Tišnovský (2003)).

3.2 Fraktální dimenze

Tato diplomová práce se zabývá porovnáním fraktální dimenze u opevnění v různých historických obdobích. Předtím je však vhodné přiblížit **dimenzi topologickou** (D_T), která se určuje pro geometricky hladké útvary, kterými může být například úsečka, čtverec nebo koule. Topologická dimenze je vždy celočíselná a je často spojována s charakteristickými objekty pro tuto dimenzi. Topologická dimenze bodu je 0, jelikož polohu bodu v něm samém není třeba určovat žádnou souřadnicí. Dimenze křivky je 1, pro které je definována jejich délka, která může být nekonečná (přímka), ale plocha je nulová, protože mohou být nekonečně tenké. Topologickou dimenzi 2 má kruh či n-úhelník, u kterých je nutné polohu určit pomocí dvou souřadnic. Takové tvary mají určitý obsah a nulový objem. Topologická dimenze krychle, ale i den co

den vnímaného prostoru je 3 (Hotař, 2011). U těchto útvarů nezáleží na jednotkách, ve kterých jsou zadány jejich parametry. Vlastnosti takovýchto útvarů nejsou závislé na měřítku (Tišnovský, 2000).

Fraktální dimenze (D_H) – známá jako **Hausdorffova** či Hausdorff-Besicovitchova, která je „charakteristickým číslem“, udává jak složitý je pozorovaný útvar (Hotař, 2008). Útvarem je nejčastěji myšlen povrch, struktura tělesa, časová řada nebo množina bodů. Hotař dále popisuje, že z geometrického hlediska je fraktální dimenzí vyjádřena složitost zkoumaných objektů, tato složitost je popsána pomocí jednoho čísla.

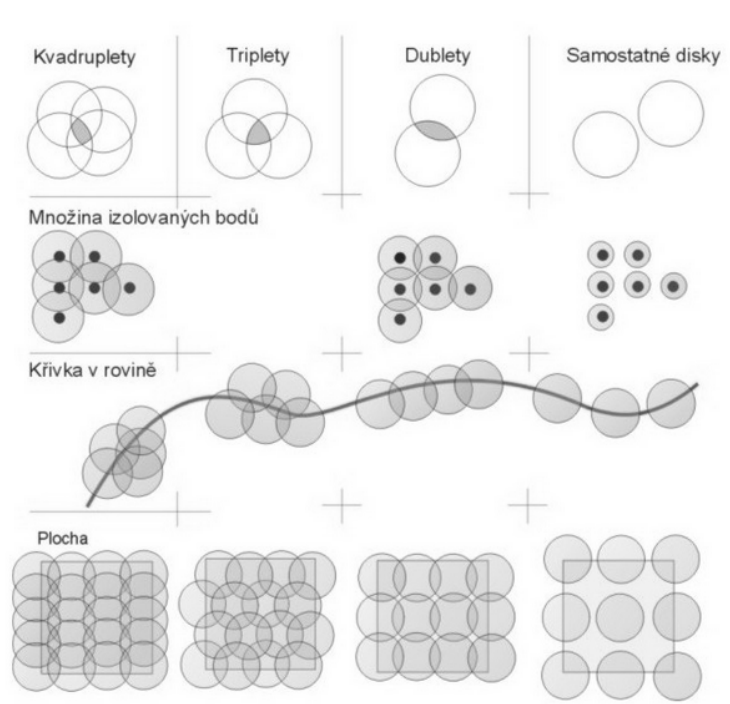
Definice fraktálů pomocí fraktální a topologické dimenze říká (Hotař (2011), Mandelbrot a Fiala (2003)): *Útvar je fraktálem pokud platí vztah, kde Hausdorffova dimenze je ostře větší než dimenze topologická:*

$$D_H > D_T \tag{1}$$

Ne-fraktální objekty mají tu vlastnost, že zmenšováním délky měřidla se přibližuje délka objektu (obvod) k nějaké limitní hodnotě. U fraktálů to neplatí, délka se neustále zvětšuje. Tato vlastnost se nazývá Richardsonův efekt (Hinner, 1999).

Pohlová (1989) uvádí, že hladké křivky mají fraktální dimenzi rovnou 1, avšak s rostoucí členitostí, roste i fraktální dimenze. Zmiňuje, že existují křivky, jejichž fraktální dimenze je rovna 2, což dokládá to, že fraktální dimenze je geometrická a jedná se tedy o míru členitosti. Dále zpochybňuje definici fraktálu (1), jelikož existují členité množiny, jejichž fraktální dimenze je rovna topologické např. tzv. ďábelského schodiště. Fraktální dimenze grafu této funkce je rovna 1.

Pokryvací dimenze (D_P), která jak uvádí Hotař (2011) spočívá v principu pokrývání disky (viz obr. 8). Lze pokrývat jednotlivými disky, dvojicemi disků (duplety), které mají nenulový průnik, trojicemi (triplety), či kvadruplety, které mají vzájemný průnik čtyř kotoučů. Na úplné pokrytí křivky stačí dublety - jediný průnik dvou sousedních disků, a to při jakémkoliv poloměru, pokryvací dimenze je 1. Plocha má pokryvací dimenzi $D_P = 2$. Na pokrytí je třeba průnik alespoň alespoň tří disků (triplety), pokrytí duplety není dostačující, protože plocha není pokryta celá. Množina S má pokryvací dimenzi $D_P = n$ právě tehdy, pokud pro libovolný poloměr disku $r > 0$ existuje pokrytí množiny S disky o poloměru r takové, že každý bod množiny S patří maximálně do $n+1$ pokrývajících disků a neexistuje takové pokrytí těmito disky, pro které by každý bod z množiny S patřil do n disků. Dále podle Hotaře (2011) platí pro převážnou většinu množin $D_T = D_P$.



Obrázek 8: Pokrývání bodů, křivky a plochy disky (převzato z: Hotař (2011)).

Vedle výše zmíněných definic fraktálu Hotař (2011) uvádí soběpodobnostní dimenzi a kapacitní dimenzi. Pauš (2006) ve své práci popisuje mimo jiné i **mřížkovou (box-counting) dimenzi** - v praxi jednu z nejvíce používaných dimenzí. Na základě matematického důkazu dokládá, že Hausdorfova a mřížková dimenze se nerovnájí, nicméně dodává, že v praxi nastává rovnost velmi často. Popis odhadu box-counting dimenze je uveden níže.

3.3 Metody výpočtu fraktální dimenze

Podle Hotaře(2008) není možno v reálném světě fraktální dimenzi spočítat, ale lze ji odhadovat, k čemuž slouží mnoho metod v závislosti na zkoumaném objektu. Tišnovský (2000) uvádí příklad výpočtu fraktální dimenze na úsečce, která má jednotkovou délku. Následně je úsečka rozdělena na N dílů, což odpovídá N -násobnému zvětšení úsečky. Výpočet měřítka úsečky je:

$$s = \frac{1}{N} \quad (2)$$

kde s je měřítka a N počet částí, na který byla úsečka rozdělena. Peitgen et al. (2004) uvádí vztah (3) mezi počtem částí N a faktorem zmenšení s :

$$N = \frac{1}{s^D} \quad (3)$$

Pro linii, čtverec a Kochovu vložku je uveden příklad vztahu mezi počtem částí N a faktorem zmenšení s v tabulce 1.

Tabulka 1: Vztah mezi počtem částí N a faktorem zmenšení s .

Tvar	Počet částí N	Faktor zmenšení s
linie	3	1/3
linie	6	1/6
linie	173	1/173
čtverec	$9 = 3^2$	1/3
čtverec	$36 = 6^2$	1/6
čtverec	$29929 = 173^2$	1/173
Kochova křivka	4	1/3
Kochova křivka	16	1/9
Kochova křivka	4^k	$1/3^k$

Hausdorffova dimenze se tedy vypočítá následujícím postupem:

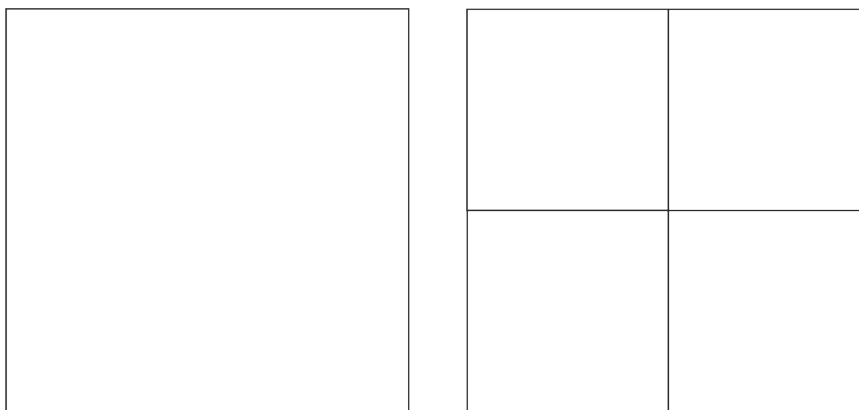
$$\begin{aligned}
 Ns^D &= 1 \\
 \log Ns^D &= \log 1 \\
 \log N + \log s^D &= 0 \\
 \log N + D \log s &= 0 \\
 D \log s &= -\log N \\
 D &= \frac{\log N}{\log \frac{1}{s}}
 \end{aligned} \tag{4}$$

Po dosazení výše uvedeného vztahu $s = \frac{1}{N}$ do vzorce $D = \frac{\log N}{\log \frac{1}{s}}$ bude výsledek:

$$D = \frac{\log N}{\log \frac{1}{\frac{1}{N}}} = \frac{\log N}{\log N} = 1 \tag{5}$$

Hausdorffova dimenze úsečky je rovna 1, výše bylo uvedeno, že topologická dimenze křivky je také 1. Na základě tvrzení, že fraktál má Hausdorffovu dimenzi ostře větší než topologickou lze odvodit, že úsečka není fraktálem.

Čtverec je dalším jednoduchým tvarem, pro který bude počítána fraktální dimenze. Je dán čtverec s jednotkovou délkou i plochou. Po dvojnásobném zjemnění čtverec vypadá tak, jako by měl čtyřnásobnou plochu (viz obr. 9).



Obrázek 9: Rozdělení čtverce se změnou měřítka.

Měřítka se tedy musí změnit podle následujícího vztahu:

$$s = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (6)$$

Hausdorffova dimenze čtverce se vypočítá:

$$D = \frac{\log N}{\log \frac{1}{s}} = \frac{\log N}{\log \sqrt{N}} = \frac{1}{\frac{1}{2}} = 2 \quad (7)$$

Ani čtverec není fraktálem, jelikož jeho topologická i fraktální dimenze je rovna dvěma.

Avšak odlišným tvarem je Kochova vložka, která vychází z rovnostranného trojúhelníka jednotkové délky strany. V prostřední třetině každé ze stran je vložen trojúhelník s třetinovou délkou strany. Výsledkem bude šestiúhelník, jehož obvod bude roven 4. Postup dělení se opakuje s každou z 12 nových stran, a tím vznikne Kochova hvězda (viz obr. 5) (Mandelbrot a Fiala, 2003). Při trojnásobném zjemnění se délka zvětší čtyřikrát – Hausdorffova dimenze proto není celé číslo (Tišnovský, 2000). Pro $N = 4$ se měřítko zmenší na třetinu:

$$s = \frac{1}{3} \quad (8)$$

Výpočet Hausdorffovy dimenze pro Kochovu vložku je tedy:

$$D = \frac{\log N}{\log \frac{1}{s}} = \frac{4}{3} \sim 1,26 \quad (9)$$

Metody výpočtu pro reálné útvary

Hotař (2011) zmiňuje pro výpočet reálných útvarů dvě metody – **metodu obvodu** pro křivky, které mají rozmezí fraktální dimenze mezi 1 a 2, stejně jako **metoda**

mřížková (box-counting) pro struktury na ploše (pro struktury v prostoru by bylo rozmezí mezi 2 a 3, pro množinu bodů na přímce mezi 0 a 1). Dasgupta (2013) uvádí další metody odhadu fraktální dimenze pro topologii profilu – Cell counting method, Semi-variogram method, Roughness-length method, Periodogram a Macimum entropy.

Obvodová metoda je jako mnohé jí podobné (the ruler method, the compass method, the structured walk method, the divider method) založena na výzkumu Richardsona (Quattrochi a Goodchild, 1997). Záleží tedy na zvolené délce měřidla r a celkovém počtu měření N daným měřidlem. Součin těchto dvou prvků dá určitou délku $L = Nr$. Se zmenšujícím se r roste hodnota L . Pro měřidlo blížící se nule se L blíží nekonečnu (Žára et al., 2004). Jelikož se délka mění v závislosti na měřidle a protože závislost mezi $\log r$ a $\log L(r)$ je ideálně přímková, platí vztah:

$$L(r) = N(r)r = Cr^{-D}r = Cr^{1-D} \quad (10)$$

Pro odhad fraktální dimenze stochastických fraktálů se používají dvě základní metody, které jsou založené na tzv. metodě počítání čtverců - Box-counting (Žára et al., 2004). V prvním kroku je křivka, u které je odhadována fraktální dimenze, pokryta N_1 nepřekrývajícimi se kruhy stejné velikosti. V druhém kroku je pokryta N_2 je opět pokryta kruhy jednotné velikosti, ale menšími než v prvním kroku. Poměr velikostí z prvního a druhého kroku je r . Odhad fraktální dimenze D je:

$$D \approx \frac{\log \frac{N_2}{N_1}}{\log \frac{1}{r}} \quad (11)$$

Další možností odhadu fraktální dimenze je překrytí objektu boxy (mřížkami) o různých stranách buněk r . Nejprve je tedy překryt studovaný objekt boxem - může se jednat o čtverec. Tento čtverec je neprázdný, jelikož v sobě obsahuje studovaný objekt. Čtverec je rozdělen v polovině každé strany a tím vzniknou další čtyři čtverce - spočítá se počet neprázdných čtverců. Takto bude původní čtverec rozdělen do 4^n částí o straně délky $(\frac{1}{2})^n$ (Janoška, 2011). Počet čtverců (boxů) $N(r)$ potřebných pro pokrytí objektu je dán vztahem (Hotař, 2011):

$$N(r) = C \left(\frac{1}{r}\right)^D = Cr^{-D} \quad (12)$$

Pro odhad fraktální dimenze je použit algoritmus, který stanovuje plochu potřebnou pro pokrytí objektu. Za použití vztahu (12) je celková plocha pokrytí $A(r)$ boxy o straně r vyjádřena jako:

$$A(r) = N(r)r^2 = Cr^{-D}r^2 = Cr^{2-D} \quad (13)$$

4 Vojenská architektura

Kdy se začalo lidstvo opevňovat? S nadhledem lze za prvopočátky opevňování považovat vytváření lidských obydlí. Ať už měl být ochraňován majetek nebo lidé samotní, obydlí nabízí jistý pocit bezpečí před vnějším světem. Před 6000 lety př. n. l. přešel člověk od lovu a sběru k zemědělství, a to podnítilo budování stálých sídel (Čapka, 1998). Usazování lidí a vytváření osad, vesnic, měst vedlo ke vzniku defenzivního způsobu boje. Ve výsledku jakýkoliv stavební útvar představuje specifický obranný prvek (Vencl, 1997).

Ne vždy sloužily prvky, které jsou považovány za prvky obrany opravdu pro tyto účely. Mnohdy se budovaly z náboženských důvodů. Některá opevnění měla dokazovat i moc panovníka a jeho bohatství. Nicméně tato práce se zabývá pouze vojenskou architekturou a proto budou v následujících odstavcích představeny důležité prvky obrany pro daná historická období.

4.1 Počátky opevňování

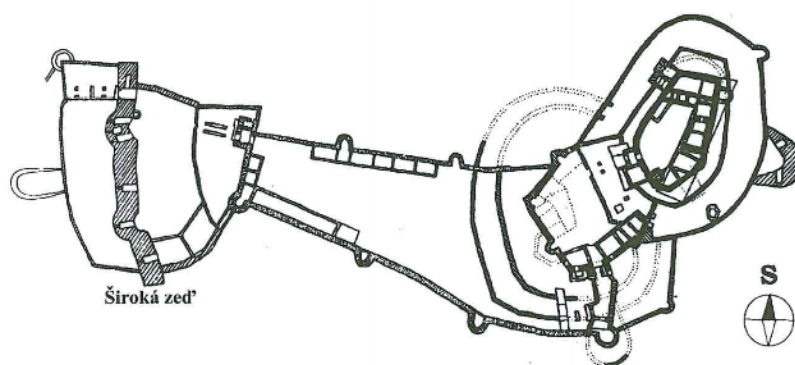
Hlavní roli v opevňování hrál výběr tvaru polohy, případně geomorfologické prvky v krajině. Opevnění byla budována na výběžcích vrchů, obvodové obranné prvky stavěny na kopcích. Pokud to bylo možné byla využita přirozená opevnění jako jsou skalky, kde opevnění vedlo mezi nimi nebo skalní bloky, které byly využity jako vstupní prostory (Čtverák a Lutovský, 2002). Jindy bylo využito slepé rameno řeky, to především v nížinných oblastech. Často docházelo k vykácení porostu v okolí opevnění, buď z technických důvodů, kdy se kmeny stromů použily jako stavební prvky, nebo kvůli strategii včasného odhalení protivníka. Dodnes je možné pozorovat jisté pozůstatky obrany, ať už to jsou různé valy nebo uměle vytvořené příkopy, jinde se vyskytují kamenná moře pod hrady nebo navršené hromady hlíny, které mění rovinu v hrboletý terén jako tomu je v olomouckých parcích.

Za nejstarší známé opevněné město na světě je považováno město Jericho na západním břehu Jordánu. Jeho vznik se datuje 6800 let před Kristem. Zda bylo nějaké ještě starší nedokládají žádné prameny ani znaky v krajině.

Mezi první opevňovací tvary, které se datují pro pravěk a raný středověk, lze jistě jmenovat **hradiště** (*raně středověké hrady*). Sloužila jako stálá sídla vládnoucí vrstvy. Hradiště byla prostorově i topograficky různorodá a bylo využíváno přirozených i umělých překážek. Stavěly se hradby s dřevěnou i kamennou konstrukcí, valy a palisády (stěny ze špičatých dřevěných kůlů). Obrana spočívala v dřevohlinité obvodové hradbě s kamennou čelní plentou a zpevněnými dřevěnými věžemi, především nad hradbami. Stavebními prvky této doby byla zemina, dřevo a kámen, později byly

na stavbu hradů používány i cihly a kameny spojované maltou. **Hrad** tvořil hlavní opevněný polyfunkční objekt vrcholného středověku. Významným hradem na našem území je **Pražský hrad**, jehož přestavba byla zahájena v roce 1135 a dokončena v druhé polovině 12. století (Durdík, 2002).

Obranu tvořila vysoká zděná hradba zpevněná obrannými věžemi, zdmi a baštami. Příklad obranné zdi je vidět u hradu Helfštýn (viz obr. 10). Tato obranná Široká zeď je unikátem. Její obrana nebyla pouze pasivní. Zeď byla natolik silná, že v ní byly vybudovány kasematy, ve kterých byl prostor pro děla. Château du Haut-Köenigsbourg je druhým a posledním příkladem takovéto obrany (Pátrač, 2011).



Obrázek 10: Hrad Helfštýn (převzato z: Kupka et al. (2002)).

Bašty se stavěly tvaru kruhového, hranatého podkovitého nebo polygonálního půdorysu a byly vůči vnitřnímu prostoru otevřené nebo zavřené, vystupovaly z hradeb do příkopu a umožňovaly boční obranu. Z počátku se používaly jednodušší bojové prostředky. Jednalo se o bodné a sečné zbraně, případně metací (Kupka, 1993).

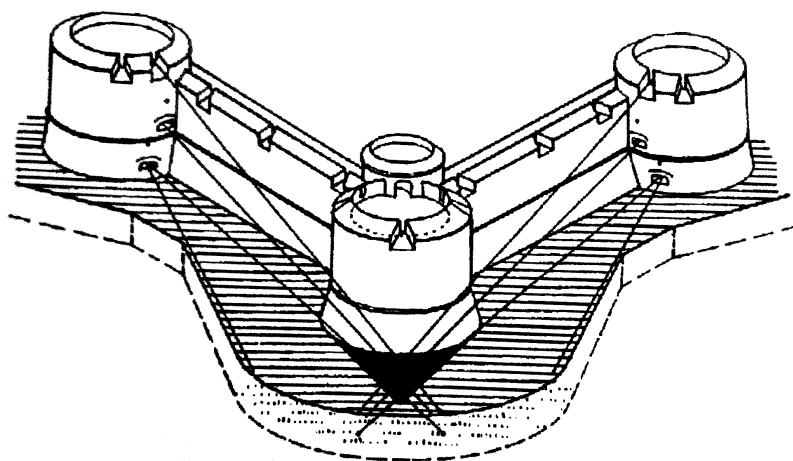
4.2 Novověká opevnění

Se zdokonalováním metacích strojů a použitím nové nabíjecí munice, došlo tedy i k výstavbě a přestavbě mohutnějších obranných zdí. V Číně vynalezený střelný prach začal během 13. století pronikat do Evropy. Nejdříve byly používány primitivní kovové konstrukce s malou ráží a velikosti střel velikosti jablka. Později došlo k dvěma vývojovým směrům. Jednak se zmenšovaly palné zbraně i střelivo, aby jej mohl přemístit a obsluhovat jediný střelec a zároveň došlo ke vzniku dělostřeleckých zbraní. První děla měla hladkou hlaveň, zaměřování nebylo zcela přesné a dostřel nevelký. Při dlouhodobém obléhání se používaly bombardy, které byly velmi těžké na přepravu i umístění do palebného postavení, i palba byla pomalá (*1 střela za 2 hodiny*). Útočníci jako ochranu proti obráncům používali dřevěné štíty (Kupka, 2002a).

Jak se zefektivňoval útok musela být zdokonalena i obrana, a to především stavebními úpravami. Vyvíjené obranné prvky byly pro daná období tak významné, že jsou podle nich pojmenovány celé opevňovací systémy. Jednotlivé druhy opevnění jsou popsány níže především podle Kupky (2002a), který se specializuje mimo jiné i na novodobé pevnostní stavitelství.

Rondelová opevnění

Úzké obranné věže a kamenné zdi nebyly dostatečně silné, aby odolaly dělostřelectvu. U nově vznikajících pevností bylo opevnění ponecháno v čistě zemním provedení. Zdily se jen stěny se střílnami pro ruční zbraně na vnějším úpatí valů a nebo stěny s dělovými střílnami. Zemní valy se oproti dřívějšku sypaly z vnější strany a zvyšovaly pasivní odolnost i dostatek prostoru pro budování odolných prostor pro ukrytí obránců. Vytvořením valů vznikla potřeba bránit jejich patu, proto byly využity boční předsunuté prvky, dříve bašty. Z přímé fronty zemního valu do prostoru vystupovaly prostorné válcové či polygonální dělostřelecké rondely, které již byly uzpůsobeny pro nasazení dělostřelectva. U tohoto způsobu obrany se již snižuje výška hradeb. Z rondelů bylo možné vést flankovací palbu směrem k sousedním rondelům, ale v čele každého rondelu vznikl mrtvý úhel, který nebylo možné bránit, což byl hlavní problém rondelového systému viz obrázek (viz obr. 11). Rod Pernštejnů je uváděn jako hlavní představitel rondelového opevňování na našem území, jsou jimi například hrady Chlumec nad Cidlinou, Kunětická hora, Pardubice nebo Tovačov. Další rondelové opevnění bylo v polovině 16. století vybudováno v Ingolstadt.



Obrázek 11: Schematická podoba rondelového opevnění s vyznačením směrů paleb a mrtvého prostoru před čelem rondelu (převzato z: Kupka (2002a)).

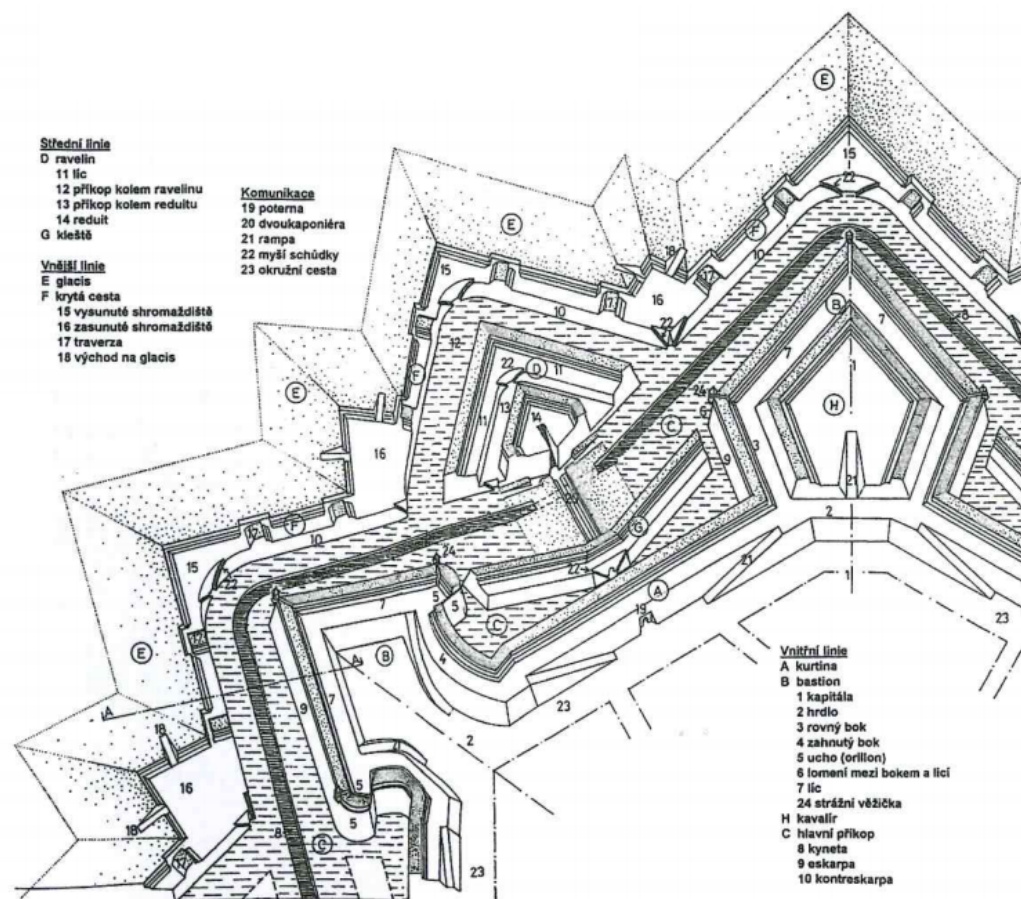
Bastionová opevnění

Bastionová opevnění byla obdobou rondelového systému, která však odstraňují mrtvé úhly. Bastion je jinými slovy bašta, která má pětiúhelníkový tvar a vystupuje z obranné linie špičkou do příkopu. Je tvořen dvěma líci, které tvoří špičku bastionu, boky a šíjí. Bastionový systém opevňování byl založen na vzájemném geometrickém uspořádání bastionů a kurtin (*hradba mezi dvěma prvky opevnění, např. baštami, bastiony, věžemi*). Bastiony umožňovaly flankovací a kosou palbu, kurtina palbu přímou (Kupka et al., 2002). Rovné líce umožňovaly přímou palbu více děl, takže mohla být prováděna plynulá palba. Dalším prvkem opevňování byla piatta forma (*malý bastion umístěný u kurtiny mezi dvěma bastiony*), jež sloužila k zesílení boční palby podél kurtiny, pokud byly bastiony od sebe více vzdáleny. Nové pevnosti tudíž měly tvar mnohoúhelníků, jejichž strany tvořily bastionové fronty. Prvopočátek se datuje k přelomu 15. a 16. století na ostrově Rhodos, nicméně vznik se přisuzuje území Apeninského poloostrova, odkud se stavební styly vyvíjely.

Prvním stavitelem, který použil pětiboké bastiony byl v první polovině 16. století Michele Sanmicheli, při opevňování Verony. Na Apeninském poloostrově lze nalézt mnoho jiných opevnění, které vděčí svému vzhledu Sanmichelimu, např. Bergamo, Padova a další. Ve středomoří jsou to pak Zadar, Šibenik, Trogir a Hvar (Kupka, 2005). V tomto období byla vystavěna i opevnění v Dubrovníku a Kypru. Toto původní užívání bastionového opevňovacího systému bylo souhrnně označeno jako **staroitalská inženýrská škola**. Začaly vznikat kryté cesty, které kopírovaly vnější zemní val (*kontreskarpu*), a to z důvodu, že byla potřeba podnikat i aktivní obranu za hradbami a valy (pro lepší orientaci v pojmech je níže uvedena ilustrace bastionového způsobu opevnění (viz obr. 12)).

V druhé polovině 16. se zkrátila délka kurtin a krytá cesta byla postupně obohacována dalšími předsunutými obrannými prvky. Pietta forma byla oddělena od kurtiny a stala se samostatnou předsunutou pevnůstkou trojúhelníkového tvaru v příkopu – **ravelin**. Ravelin svým vrcholem vyčníval před úroveň špiček obou sousedních bastionů, tím bylo dosaženo dokonalé ochrany špiček bastionů. Velké množství vystupujících a vstupujících úhlů dalo kryté cestě tvar pilového kotouče. Dalším novým prvkem byly vkládané kleště mezi ravelin a kurtinu. Vznikaly i další prvky, nicméně ty byly součástí stávajících tvarů a prakticky je zpevňovaly, případně tvořily vyšší patro obrany (kavalír, réduit) a pro tuto práci proto nejsou podstatné.

U bastionového způsobu opevňování, kromě druhu a počtu jednotlivých použitých pevnostních prvků, hraje velice významnou roli rovněž celkový tvar opevněného místa. Mnohem pravidelnější tvar pevnosti lze pozorovat u měst postavených „na zelené louce“ oproti organicky rostlým městům, u kterých byly budovány alespoň bastionové



Obrázek 12: Bastionová fronta s objasněním názvosloví
(převzato z: Kupka et al. (2002)).

citadely schopné samostatné obrany (u některých opevnění byly citadely vystavěny útočником, aby si držel kontrolu nad obléhaným místem).

V průběhu 16. – 19. století se vyvinulo mnoho inženýrských škol, které po většinou používaly prvky školy předchozí, napravovaly stavitelské chyby a zdokonalovaly obranu:

- **staroitalská** – souvislý val kurtin a bastionů obklopoval příkop, ve kterém se začaly objevovat první předsunuté prvky,
- **novoitalská** – dokonalejší geometrické uspořádání opevňovacích prvků, bohatší škála objektů vnější linie,
- **španělská** – bastiony s dlouhými, silně zploštělými čely a krátkými kurtinami,
- **staroněmecká** – navazuje na staroitalskou, ale mění uspořádání obranných prvků,
- **staroholandská** – hojné využití vodních příkopů, bastiony s ostrým úhlem čela kolmé na kurtiny, rozpracované vnější prvky,

- **staropruská** – navazuje na kleštvý systém opevňování, hlavní linie obrany z pravidelných půdorysů (nejčastěji hvězd),
- **francouzská** – velké množství přesunutých prvků, významný stavitel Vauban,
- **novoholandská** – tři linie obrany: bastiony s uchy, překrývající kleště půlkulatými či víceúhelníkovými boky.

Významným stavitelem tohoto období byl **Sebastien Le Prestre de Vauban**⁶, který je řazen mezi nejvýznamnější postavy světové vojenské historie. Údajně se zasloužil o modernizaci více než 400 starších a vybudoval až 160 nových pevnostních objektů, podrobnější informace a výčet 170 lokalit lze dohledat v knize *Stavitelé, obránci a dobyvatelé pevností* (Kupka, 2005). Mimo jiné vynalezl rikošetový způsob dělostřelecké palby (tzv. palba na odraz), při které se dělové koule vystřelené z hlavně rovnoběžně s úrovní terénu odrážely jako žabky na vodě. Zároveň u svých pevností zavedl obranu proti vlastnímu vynálezu tím, že dlouhé rovné fronty rozdělil příčnými zemními valy tzv. traverzami (Kupka, 2005). I když Vauban ve svých spisech uvádí, že pevnostní stavby volil výhradně podle terénních a taktických podmínek dané lokality, byly v pozdějších letech pevnostními teoretiky definovány tři stavební systémy.

První Vaubanův systém

- vycházel z novoitalské školy, hlavními prvky byly ostroúhlé bastiony, orillon, kavalíry, kleště raveliny, reduity a kontrgardy,
- pevnosti: citadela Lille, citadela Arras, Saarlouis, Mont Louis, Brest, Marseille.

Druhý Vaubanův systém

- silnější a komplikovanější opevnění, více vnějších obranných prvků, detašované bastiony,
- pevnosti: Belfort, Landau.

Třetí Vaubanův systém

- detašované bastiony, reduity odděleny od ravelinu příkopem, lomená kurtina,
- pevnosti: Neuf-Brisach.

Vaubanovy opevňovací systémy byly v následujícím století zdokonalovány, a to např. výstavbou větších bastionů, větších ravelinů trojúhelníkového tvaru podle Cormontaigna⁷. Pod jeho vedením vznikly např. pevnosti v Thionville, Strassburgu a Bitche.

⁶Sebastien Le Prestre de Vauban (1633-1707) – francouzský maršál, generální komisař pevností.

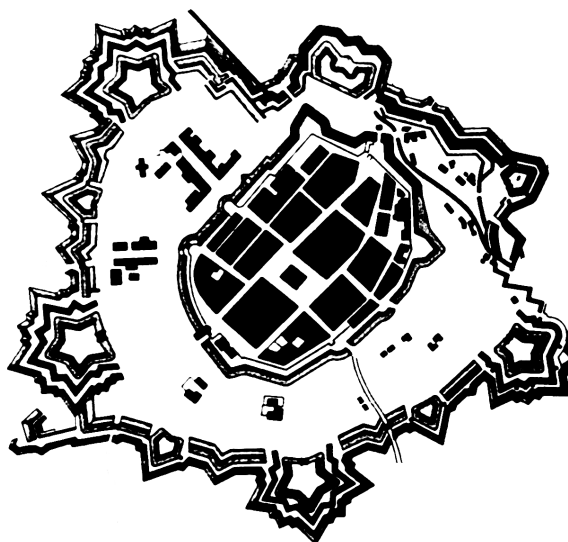
⁷Louise de Cormontaigne (1695-1752) - francouzský brigádní generál

Vrchol bastionového opevnění přišel se stavitelskou školou v Mézières. Mezièrská škola zavedla předsouvání lunet (mohutných kasematových objektů) na úpatí glacis. Tento prvek měl oddálit obléhací práce od pevnosti. Jediný příklad praktického použití kompletního předsunutého okruhu lunet podle této školy tvoří pevnost Palmanova. Dalším novým prvkem byly čepce (tamboury), val navržený na vystupujících špičkách kryté cesty. Myšlenky mezièrské školy byly realizovány v Josefově a Terezíně. Terezínská pevnost, až na absenci věnce předsunutých lunet (70 % pevnosti mohla chránit voda), téměř úplně odpovídala myšlenkám této školy.

Klešťová opevnění

V 17. a 18. století se začal rozvíjet klešťový způsob opevňování. Byl založen na střídání rovných front vstupujících pod úhlem 90 stupňů a vystupujících pod úhlem 60 stupňů, které tak udělily příslušnému fortifikačnímu prvku tvar hvězdice (viz obr. 13). Obecně se jednalo o dvě ramena svírající vůči sobě určitý úhel, takže se mohla navzájem krýt palbou (Kupka, 2005). Příkladem tohoto způsobu opevňování jsou přestavby a novostavby pevností Kožle, Nisa, Svídnice a Kladsko. Nevýhodou tohoto opevňovacího systému byla vyloučená přímá palba, byla možná pouze kosá a boční palba. Později byla opevnění vylepšena tím, že před vlastní pevností byly předsunuty detašované prvky, které oddalovaly obrannou frontu od jádra pevnosti a prodlužovaly dobu potřebnou k jejímu dobytí.

Pevnost Arad na území dnešního Rumunska je vybudována podle originální koncepce. Jedná se o klešťově-bastionový druh opevnění, označován jako aradský styl.

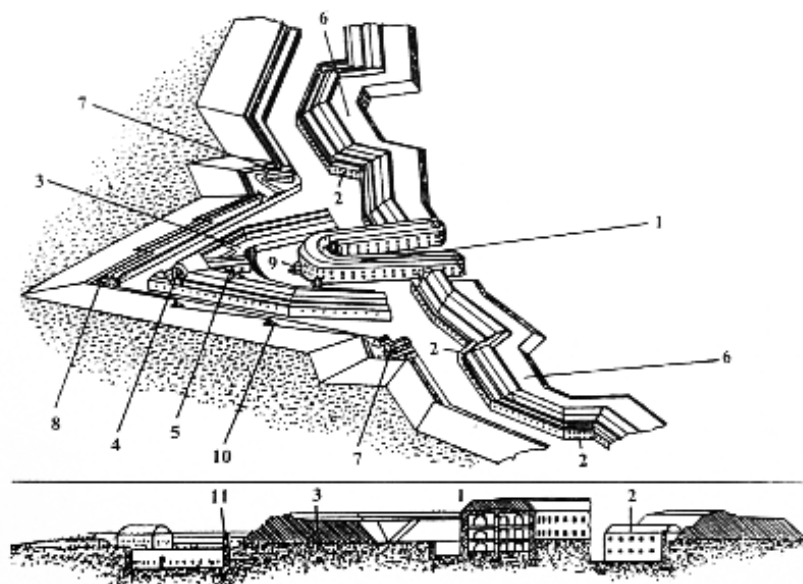


Obrázek 13: Zesílení pevnosti Svídnice pomocí předsunutého klešťového pevnostního obvodu (převzato z: Kupka (2002a)).

Polygonální opevnění

Zvětšování složitých obvodů bastionových a klešťových pevností, koncipovaných podle geometrických zásad s několika obrannými liniemi za sebou, bylo nepřijatelné s ohledem na velké finanční náklady, jež by bylo na jejich výstavbu potřeba vynaložit, ale také z důvodu počtu vojáků potřebných k obsazení hradeb (Kupka, 2002a).

Nový systém opevňování spočíval v aplikaci mnohoúhelníku (polygonu) na tvar pevnosti, jehož strany svíraly tupé úhly. Při minimální délce pevnostních valů tak opevnění obklopovalo maximální vnitřní prostor, proto byl tento styl opevňování označen jako polygonální. Součástí polygonálního opevnění byl příkop na jehož úpatí vnitřní strany vznikala tzv. Cartonova zeď, ve které se nacházely střílny pro ruční zbraně. Byla budována shromaždiště k soustřeďování jednotek pro výpady z pevnosti, a to v místech před saillanty (špice pevnostního prvku sevřená úhlem jeho lící). Významným krokem bylo obklopení souvislého polygonálního jádra pevnosti tzv. noyau, uzavřeným věncem samostatných fortů. Rozmístění i úkoly předsunutých objektů byly zcela plánovité a funkčně odlišné. Detašované objekty byly předsunuty před samotnou pevnost 800 metrů, posléze až 4 km. Tyto detašované forte měly zpravidla lunetový pětiúhelníhelníkový půdorys. Vzhledem k zvětšování vzdáleností byly bojovými prostředky tohoto období střelné zbraně a hladkohlavňové dělostřelectvo.



Vysvětlivky:

- | | |
|------------------------------|---------------------|
| 1. = hlavní kaponiéra | 6. = kavalír |
| 2. = boční baterie | 7. = blokhaus |
| 3. = luneta | 8. = minová předsíť |
| 4. = moždířová baterie | 9. = kaponiéra |
| 5. = kapitální dutá traverza | 10. = krytá cesta |
| | 11. = Carnotova zeď |

Obrázek 14: Schematická znázornění polygonální fronty (podle pruské pevnosti Poznaň)(převzato z: Kupka (2002a)).

Polygonální opevnění tedy mělo tři linie obrany. První linii představoval výše popsaný věnec fortů. Druhou linii tvořil val se systémem min a s krytou cestou. Třetí a nejsilnější linii vytvářel hlavní příkop s kaponiérami, které měly bránit příkop, baterie, Cartonova zeď a mohutný val (viz obr. 14).

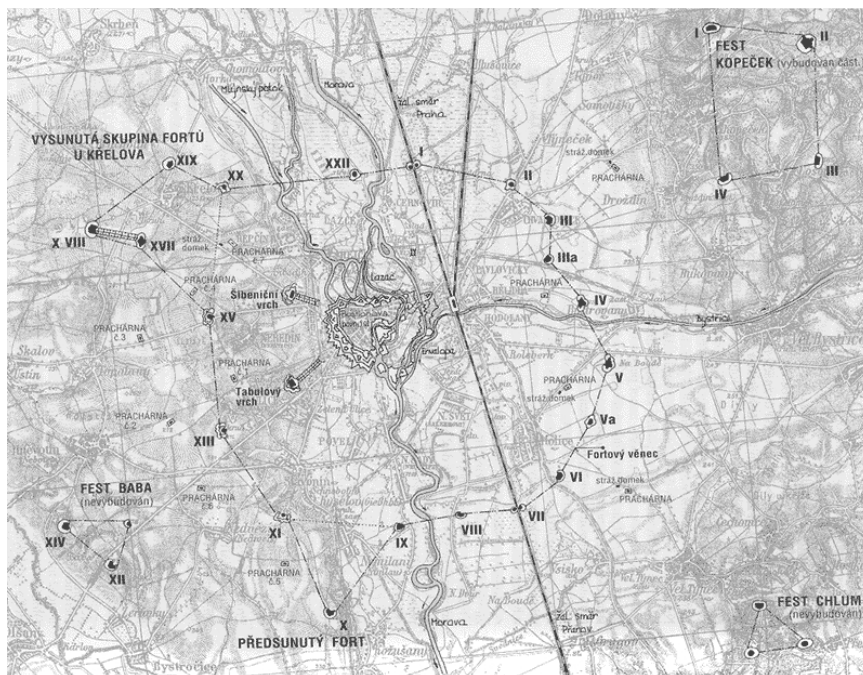
Polygonální fronty a detašované forty byly postupně stavěny u mnoha měst – Königsberg, Kolín nad Rýnem, Efurt, Poznaň, Toruň a další. Z finančních důvodů byly stavěny jednodušší okruhy dělostřeleckých věží, polygonálních fortů s reduity nebo provizorní zemní šance např. Komárno, Krakow nebo Přemyšl.

Fortová opevnění

V polovině 19. století došlo k velkým zvrátům v dělostřelecké technice, toto období je také nazýváno „krize drážkovaného dělostřelectva“. Nová děla s drážkovaným vývrtem měla ničivý efekt na všechny dosavadní pevnosti i moderní polygonální opevnění. Dosah nových děl byl až 3500 metrů, zvýšila se i přesnost i ničivý účinek v cíli. Reakcí na novou útočnou techniku bylo přesunutí obrany z jádra do předsunutého věnce fortů. Detašované forty polygonálního systému opevnění nebyly dostatečně vzdáleny od jádra pevnosti. Jako optimální se považovala vzdálenost čtyř až šesti kilometrů. Vzhledem ke své finanční náročnosti, byly tyto stavební úpravy realizovány pouze u největších a strategicky nejdůležitějších opevnění. Délka fortového prstence kolem jádra pevnosti dosahovala od 25 do 60 km. Detašované objekty byly různých tvarů. Ve Francii v polovině 19. století ještě převažoval bastionový půdorys fortů, v ostatních evropských státech měly forty jednoduchý polygonální půdorys nejčastěji lunetového (pětiúhelníkového) (viz obr. 16a) nebo trapézového tvaru. Fortové prstence byly použity například u měst Ingolstadt, Ulm, Poznaň, Kolín nad Rýnem. Reduitové forty byly v polovině 19. století vybudovány i v okolí Olomouce (viz obr. 15).

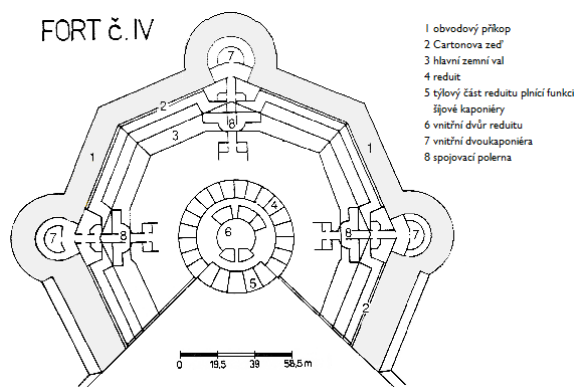
Ke konci 19. století byl vynalezen nový ničivý prostředek, a to dělostřelecký granát, plněný účinnou trhavinou, který byl navíc obohacen zapalovačem se zpožděním. Díky zpožděnému roznětu došlo k výbuchu až po vniknutí do zemního nakrytí chránícího daný pevnostní prvek. Destruktivní účinky byly velmi výrazné. Střepiny nárazových granátů prorážely i kovové dveře. Toto přelomové období je označováno jako „krize výbušného granátu“.

Reakcí na novou útočnou techniku bylo zavedení nových materiálů při výstavbě obraných prvků. Kámen, cihly a zeminu proto nahradil beton, ocel ve formě pancíře a později i železobeton. Předsunutý věnec fortů bylo nutné odsunout dále od centra, tudíž se vzdálenost zvětšila na 10 až 15 km. Tím se výrazně zvětšil i obvod pevností – v extrémních případech přesáhl 100 km, např. Paříž 140 km.



Obrázek 15: Prsteneček fortů kolem Olomouce (převzato z: Kupka (2002b)).

Unikátními forty, které byly stavěny v tomto období, byly bezpochyby tzv. „mořské forty“. Ty vznikaly na mělčinách, nebo na uměle nasypaných ostrovech jako ochrana pobřeží před nájezdy bojových lodí. Oproti fortům na souši se jednalo o stavby s jednoduchým půdorysem. Jedním z nejznámějších je např. fort Boyard u francouzského pobřeží, pobřeží pevnosti Portsmouth bránily např. forty Spitbank, No Man's Land a Horse Sand, v Manilské zátocě se nachází fort Drum (viz obr. 16b).



(a) Fort Radikow v Olomouci (upraveno podle: Kuch-Breburda a Kupka (2003)).



(b) Mořský fort Drum v Manilském zálivu (autor: Soutar (1983)).

Obrázek 16: Ukázky detašovaných fortů.

Liniové

První světová válka přinesla velké množství podnětů – nové zbraně, krach taktiky pohyblivého boje, bitvy založené na materiálním vyčerpání nepřítele – které byly rozhodující pro další vývoj fortifikací. Obranný obvod, budovaný jako prstenec kolem jednoho bodu, byl napřímen do souvislé linie, kde jednotlivé objekty byly rozmístěny vedle sebe či šachovnicově v linii, která přehrazovala ohrožený prostor, kopírovala hranici státu nebo uzavírala místo vhodné pro útok nepřítele (Kupka, 2002b; Kupka et al., 2002). Byly využívány přirozené překážky, kdy se opevněné linie opíraly o vodní tok či horský terén. Vznikaly dělostřelecké tvrze, jež byly obkloповány dělostřeleckými a pěchotními sruby, pancéřovými věžemi navzájem propojenými podzemními galeriemi. V Československu byl jako sруб označen mohutný železobetonový objekt s pěchotní i dělostřeleckou výzbrojí, který tvořil základní prvek linie těžkého opevnění i dělostřeleckých tvrzí.

Vzhledem k pokročilému vývoji munice a jejímu ničivému účinku již nezáleželo zpravidla na tvaru obranného prvku, ale především na dostatečné odolnosti použitého materiálu.

5 Vlastní řešení práce

5.1 Výběr zkoumaných objektů

Na základě studia opevňovacích systémů a stavitelů pevností u nás i v zahraničí byly vybrány objekty s přihlédnutím k jednotlivým opevňovacím systémům – středověký, rondelový, bastionový, klešťový, fortový, polygonální, liniový opevňovací systém. Popis bastionového opevňovacího systému byl dále rozšířen, jelikož v tomto období došlo k rozsáhlému vývoji opevňovacích prvků. Níže jsou vyjmenována všechna použitá opevnění, rozdělena podle opevňovacích systémů:

Středověký

Brusel, Helfštýn, Olomouc, Pražský hrad,

Rondelový

Ingolstadt, Olomouc, Pardubice,

Bastionový

Staré stavitelské školy - počátek – Olomouc, Padova, Rhodos,

Nové stavitelské školy - Vauban

Vauban - I. systém – Lille, Saarlouis,

Vauban - II. systém – Belfort, Landau,

Vauban - III. systém – Neuf-Brisach,

Stavitelská škola v Mezières – Terezín,

Klešťový

Arad, Svídnice,

Polygonální

Ingolstadt,

Fortový

Olomouc – Šibeniční vrch, Slavonín, Radíkov,

Liniový

Československé lehké opevnění – pěchotní srub odolnost III a odolnost IV.

5.2 Testování vhodného softwaru pro výpočet fraktální dimenze

Původně byly pro tuto práci zvažovány různé programy – FracLac, FRACTALYSE, Harfa, ImageJ a program Benoit. Na závěr byly vybrány tři programy podle jejich dostupnosti a uživatelsky příjemnému prostředí. Konečný výběr byl proveden na základě jednoduchého testování, kdy byly ve všech programech srovnány předem připravené vstupní obrázky – kružnice, kruh, čtverec, trojúhelník, a první čtyři iterace Kochovy vložky. Kromě kružnice měly ostatní objekty plnou výplň. U všech programů byla fraktální dimenze počítána algoritmem box-counting (viz tab. 2).

Tabulka 2: Výsledné hodnoty testování

Testovaný objekt	Fraktální dimenze při použití určitého softwaru		
	Benoit	Fractalyse	Fractal Analysis System
kružnice	1,914	1,262	1,287
kruh	1,672	1,865	1,917
čtverec	1,494	1,908	1,992
trojúhelník	1,784	1,819	1,866
Koch 1. iterace	1,800	1,797	1,841
Koch 2. iterace	1,786	1,811	1,836
Koch 3. iterace	1,765	1,820	1,844
Koch 4. iterace	1,758	1,828	1,852

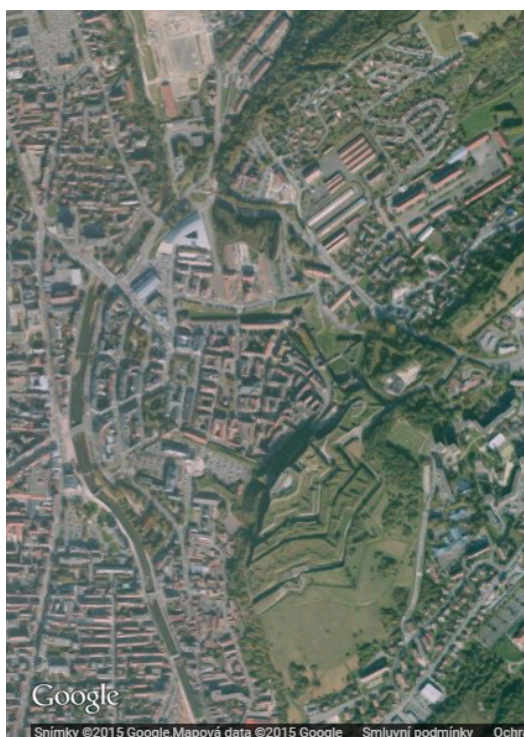
Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.4, fraktální dimenze čtverce i kruhu je 2, fraktální dimenze křivky 1. V tabulce 2 jsou vidět zvýrazněné výsledné hodnoty softwaru Fractal Analysis System, kde se hodnota kružnice 1,287 blíží hodnotě 1 i hodnoty kruhu a čtverce se blíží hodnotě 2. Rozdíl je dán tím, že do výpočtu vstupují rastrové obrázky a hrany takových obrázků nejsou vždy hladké. Iterace Kochovy vložky dosahují hodnot kolem 1,85 a později budou v práci využity.

Autorem programu Fractal Analysis System je Hiroyuki Sasaki, který poskytuje licenci tohoto programu pro vědecké pracovníky a studenty na základě vyplněného formuláře. Tento program umožňuje generovat podíl barev v obraze, vybrat pouze červené nebo zelené plochy a počítat fraktální dimenzi barevného i černobílého obrazu. Program počítá fraktální dimenzi algoritmem box-counting.

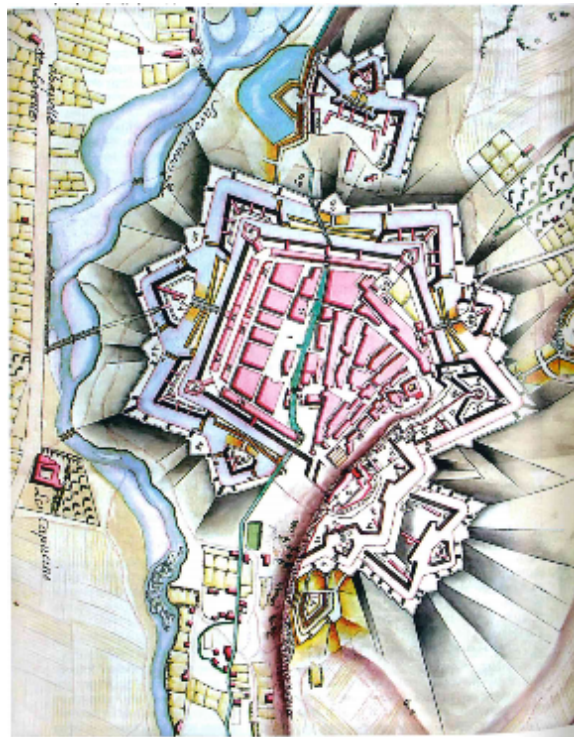
5.3 Postup zpracování

Příprava podkladových dat

Výchozím bodem pro přípravu obrázků byly podkladové mapy, plánky nebo obrázky, které budou co nejlépe zobrazovat opevnění daného území. V úvahu přicházela digitalizace map z leteckého snímkování, nicméně, jak je i výše uvedeno, ne vždy jsou zachovalá původní opevnění (viz obr. 17a).



(a) Letecký snímek - nedochovalé zdi pevnosti (zdroj: maps.google.com).



(b) Starý nákres pevnosti (převzato z: Kupka (2009)).

Obrázek 17: Porovnání podkladových dat - citadela Belfort (Francie).

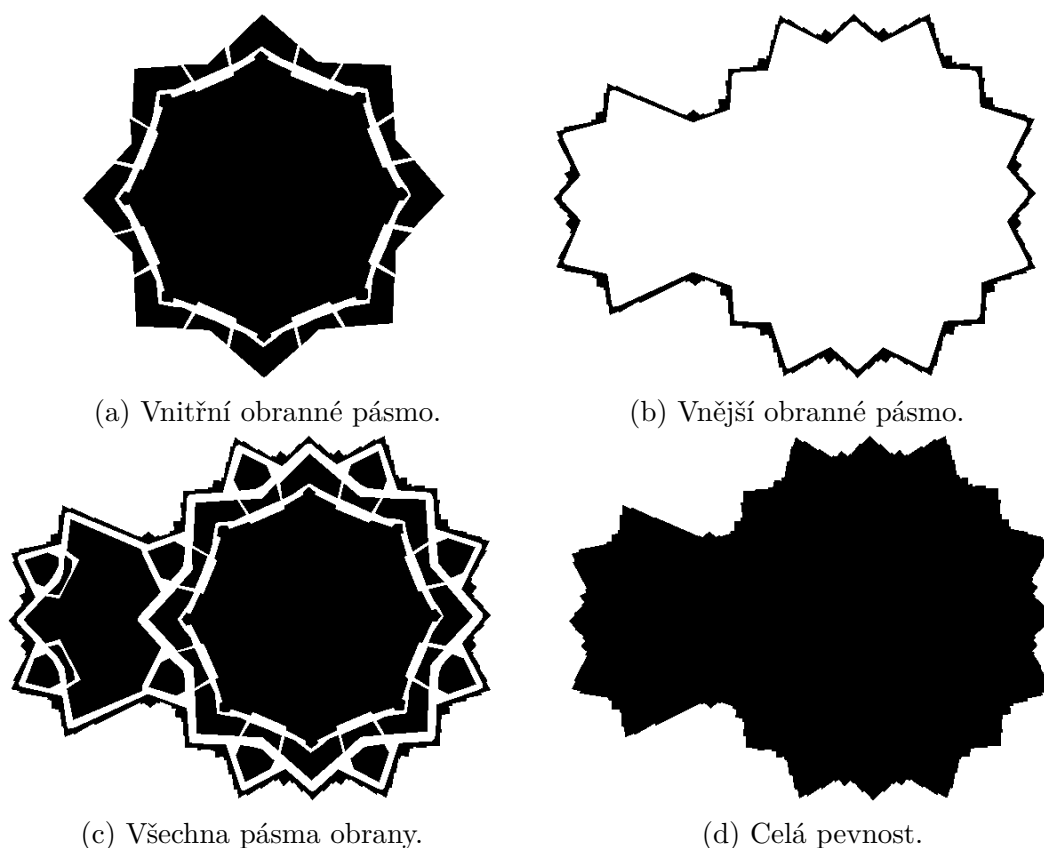
Pro další práci byla potřeba vytvořit obrázky ve formátu *.bmp, který je programem Fractal Analysis System podporován. Důležité vedle výběru pevností bylo studium pojmů a fortifikačních prvků, aby bylo později možné správně zařadit jednotlivé prvky obrany do odpovídajících obranných pásem.

Na počátku vyvstalo několik otázek. Co bude měřeno u pevností, aby bylo možné srovnání? Středověká i rondelová opevnění nebyla svým tvarem příliš složitá, jelikož vzhledem k tehdejšímu ozbrojení nebyla potřeba komplikovaných stavebních tvarů a několika obranných pásem. Z toho vyplývá existence pouze jednoho obranného pásma a později v případě rondelových opevnění i pásma středního.

Proto bylo vytvořeno pět úrovní, pro které byla počítána fraktální dimenze – vnitřní, střední a vnější obranné pásmo, celá pevnost, a všechna obranná pásma.

Toto rozdělení bylo vyvozeno z obranných pásem bastionového opevnění. Aby bylo možné srovnání všech pevností napříč historií následuje vysvětlení, jak byly jednotlivé opevňovací styly kategorizovány.

Pro středověký opevňovací styl v této práci platí, že i když byl vytvořen jen jeden obrázek jednoho pásma obrany a tím byla vypočtena jedna hodnota fraktální dimenze pro danou pevnost, do souhrnného srovnání všech pevností vstupovala hodnota do kategorií „vnitřní pásmo“, „celá pevnost“ i „všechna pásma obrany“. Bylo tak rozhodnuto, aby byly pokryty všechny kombinace, například srovnání středověkého opevnění s vnitřním pásmem bastionového opevnění v Olomouci, dále se všemi pásmy obrany Olomouce, ale i s olomouckým opevněním jako celkem. Podobně tomu bylo i u rondelového opevňovacího systému, i když zde se již vyskytuje pásmo, které by mohlo být považováno za pásmo střední.



Obrázek 18: Neuf-Brisach - ukázka obrázků, pro které byla fraktální dimenze počítána.

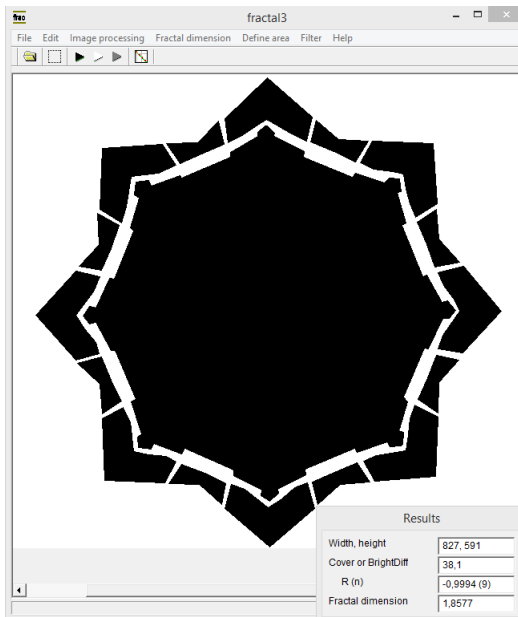
Jak již je výše zmíněno, kategorie byly vytvořeny podle bastionového opevňovacího systému. Pevnosti byly v tomto období velmi složité a pro obranu byla důležitá kombinace a sestavení hned několika obranných pásem. Proto byly připraveny obrázky pevností, které zobrazovaly všechna obranná pásma (vnitřní pásmo, střední pásmo, vnější pásmo – nebo také krytá cesta) (viz obr. 18).

Klešťový systém byl zajímavý použitím hvězdicových obranných prvků, proto pevnost Svídnice byla srovnávána jako celek, ale i jako samotný jeden hvězdicovitý obranný prvek. Polygonální pevnost byla podobná pevnostem bastionovým, proto bylo porovnáváno s ostatními pevnostmi jen vnější pásmo a pevnost celá.

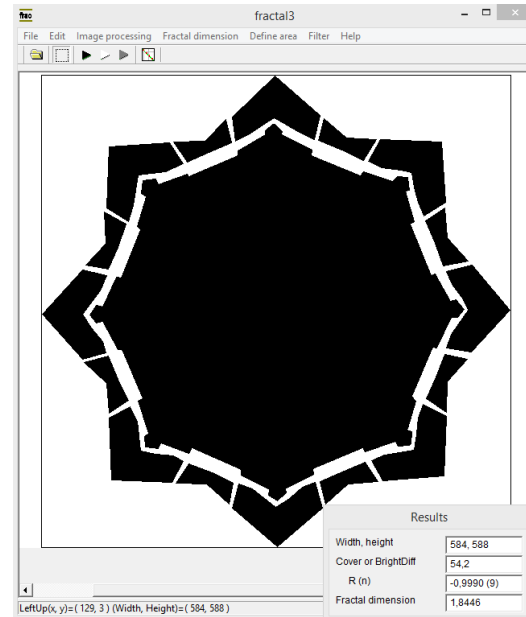
Další otázka visela nad modernějším způsobem opevňování. Fortová opevnění nebyla celistvá, pokud se jako obrana území považoval prstenec fortů, jako je vidět u opevnění Olomouce (viz obr. 15). Má být srovnáván s ostatními pevnostmi prstenec fortů jako celek? Jednotlivé forty byly malými pevnostmi sami o sobě, proto bylo pro porovnání vybráno několik typů fortů, které se nacházejí v okolí Olomouce, mezi nimi i Fort XI Slavonín, který je zajímavý dvěma kaponiérami nazývanými „kočičí uši“. Podobným případem je liniový obranný systém. Jak je již z názvu patrné, obranné prvky byly stavěny v linii, a to i podél hranice mezi státy (Magainotova linie na hranicích Francie s Německem). Jak je uvedeno výše, tvar obranného prvku neměl pro obranu takový význam jako použitý materiál. Proto u posledních dvou obranných systémů byly stavěny jednodušší prvky, které se neskládaly z množství obranných pásem. Porovnávání s ostatními pevnostmi byly podobným způsobem, jako tomu bylo u středověkých pevností.

Každý obrázek byl zvětšen tak, aby maximálně zaujímal prostor stránky A4, takto připravený obrázek byl exportován. Toto nastavení bylo zvoleno proto, aby parametry byly pro všechny obrázky stejné. Při exportu jednoho obrázku v různých rozměrech došlo při počítání fraktální dimenze k odlišným výsledkům, a proto byla snaha tomuto vlivu zamezit. Celkem bylo digitalizováno 25 pevností či obranných prvků a fraktální dimenze byla vypočítána pro 103 prvků obrany. Veškeré obrázky s odpovídající hodnotou fraktální dimenze jsou uvedeny v příloze 1.

Později bylo zjištěno, že přesnějšího výpočtu bude dosaženo využitím nástroje **Define area** v programu Fractal Analysis System. Tento nástroj umožňuje pomocí rámečku vybrat území, pro které má být fraktální dimenze počítána (viz obr. 19). Výsledné hodnoty byly původně získávány s přesností na tři desetinná místa, pozdější srovnávání již operují se dvěma desetinnými místy.



(a) Výsledek bez definované oblasti
(1,8577).



(b) Výsledek s definovanou oblastí
(1,8446).

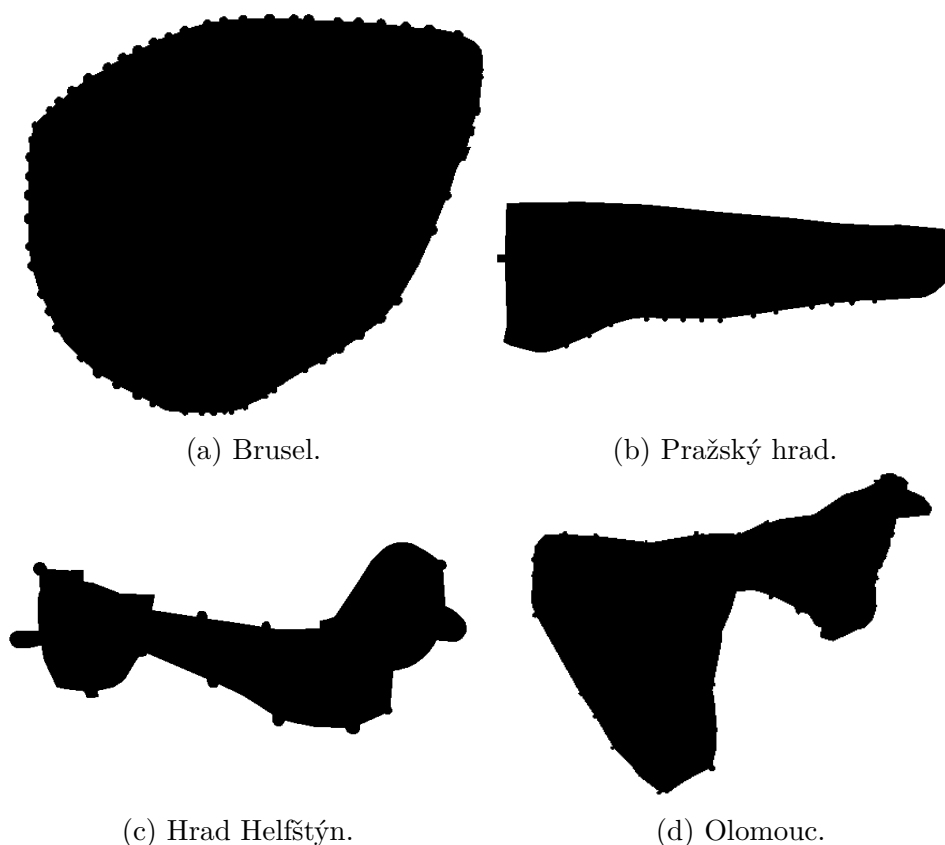
Obrázek 19: Rozdíl výsledků při použití nástroje **Define area** v prostředí programu Fractal Analysis System.

6 Hodnocení výsledků

6.1 Středověký opevňovací systém

Původní středověká opevnění vznikala kolem hradů nebo organicky kolem sídel. Pro toto období byl vybrán Pražský hrad, hrad Helfštýn, opevnění Bruselu a Olomouce (viz tab. 3). Dalo by se říct, že tyto tvary jsou poměrně jednoduché, složitost opevnění je dána pouze geomorfologickým podkladem, ale v žádném případě složitostí obranných prvků. Obranné prvky tehdejší doby se skládaly z baštových věží, které jsou na obrázcích sotva patrné.

Nejjednodušší tvar je vidět u opevnění Bruselu (viz obr. 20a), kdy je fraktální dimenze 1,92 srovnatelná s fraktální dimenzí kruhu, která byla získána v rámci testování (viz tab. 2). Fraktální dimenze Pražského hradu se podobně jako Brusel přibližuje hodnotě 2. Hrad Helfštýn i Olomouc jsou oproti předcházejícím dvěma opevněním tvarem složitější. I když použité obranné prvky mají jednoduchý tvar, přirozené překážky při výstavbě sehrály důležitou roli ve složitost tvaru pevnosti a proto byla hodnota fraktální dimenze oproti předchozím dvěma pevnostem nižší.



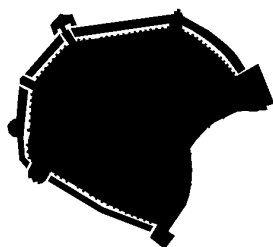
Obrázek 20: Obrázky středověkých opevnění.

Tabulka 3: Výsledné hodnoty fraktální dimenze.

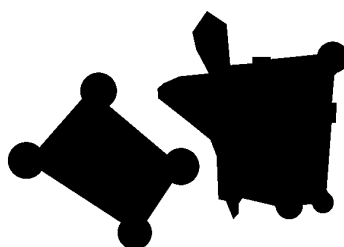
Pevnost	Fraktální dimenze jednotlivých pásem opevnění				
	Vnitřní	Střední	Vnější	Všechna pásma	Celá pevnost
Brusel	1,92			1,92	1,92
Pražský hrad	1,91			1,91	1,91
Hrad Helfštýn	1,88			1,88	1,88
Olomouc	1,85			1,85	1,85

6.2 Rondelový opevňovací systém

Tvar používaných obranných prvků se v tomto období příliš nelišil od tvarů používaných ve středověku. Středověké bašty jsou na nákresech velmi podobné rondelům. V Olomouci oproti středověku přibylo obranné pásmo, které nese některé nové prvky obrany a podobně bylo postaveno i město Ingolstadt. Opevnění v Pardubicích je složeno ze dvou samostatných opevnění, jedno opevňuje město, druhé je opevnění zámku, které má pravidelný tvar se čtyřmi nárožními rondely. Každý útvar byl počítán zvlášť, až na kategorii „všechna pásma“, pro kterou byla získána hodnota při zobrazení obou útvarů (1,85). Hodnoty fraktální dimenze rondelového opevňovacího systému mají v kategorii „všechna pásma“ široký rozsah od 1,84 do 1,88. V kategorii „celá pevnost“ jsou výrazně odlišné hodnoty u opevnění Ingolstadtu, jehož hodnota fraktální dimenze je blízká hodnotám středověkých opevnění.



(a) Ingolstadt.



(b) Pardubice
(zámek Pardubice vlevo).



(c) Olomouc.

Obrázek 21: Obrázky rondelových opevnění.

Tabulka 4: Výsledné hodnoty fraktální dimenze.

Pevnost	Fraktální dimenze jednotlivých pásem opevnění				
	Vnitřní	Střední	Vnější	Všechna pásma	Celá pevnost
Ingolstadt	1,91	1,58		1,88	1,91
Zámek Pardubice	1,85			1,85	1,85
Město Pardubice	1,87			1,85	1,87
Olomouc	1,87	1,51		1,84	1,86

6.3 Bastionový opevňovací systém

Pro bastionový opevňovací systém byla analyzována největší skupina opevnění. V tomto období docházelo k rychlému vývoji munice a byla potřeba útokům odolávat, proto došlo k mnoha různým stavebním úpravám a zmohutnění opevnění několika obrannými pásmy. Na začátku tohoto období opevnění volně navazovala na předchozí opevňovací systémy použitím bastionů.

Jak bylo zmíněno výše v kapitole 4.2, jedno z prvních opevnění, které neslo prvky bastionového opevňovacího systému lze nalézt na ostrově Rhodos. Nicméně počátek tohoto opevňovacího systému je historicky spjat s Apeninským poloostrovem. I když se i u Rhodosu vyskytují náznaky bastionů, tvarem, ale i hodnotou fraktální dimenze se podobá středověkým opevněním a opevnění Ingolstadtu z předešlého opevňovacího systému. Zdi opevnění Padovy v některých místech svírají ostrý úhel, nebo jsou na sebe kolmé. To již mohlo vézt k lepší obraně, i když jsou vrcholy bastionů zakončeny okrouhlou věží. Na nákresu se malé bastiony od rondelů příliš nelišily (viz obr. 22b), proto nebyly hodnoty fraktální dimenze výrazně ovlivněny. Opevnění Olomouce vznikalo do této podoby (viz obr. 22c) později než opevnění Padovy i Rhodosu. U olomouckého opevnění bylo již hojně využito bastionů, což je na první pohled patrné a celkově je toto opevnění od ostatních opevnění velmi odlišné. Vnitřní pásmo, které zde tvoří původní tvar opevnění Olomouce známý z předešlých opevňovacích systémů, doplněný o bastiony, dosahuje stejné hodnoty jako Padova. Porovnáním kategorie „všechna pásma“ lze vyčíst, že Olomouc má nejsložitější tvar, jejíž hodnotu fraktální dimenze (1,75) ovlivnily dva jihovýchodní pásy zemního opevnění, které tvořily první obranné pásmo proti útokům nepřítele z tohoto směru.



Obrázek 22: Obrázky pevností z počátku bastionového způsobu opevňování.

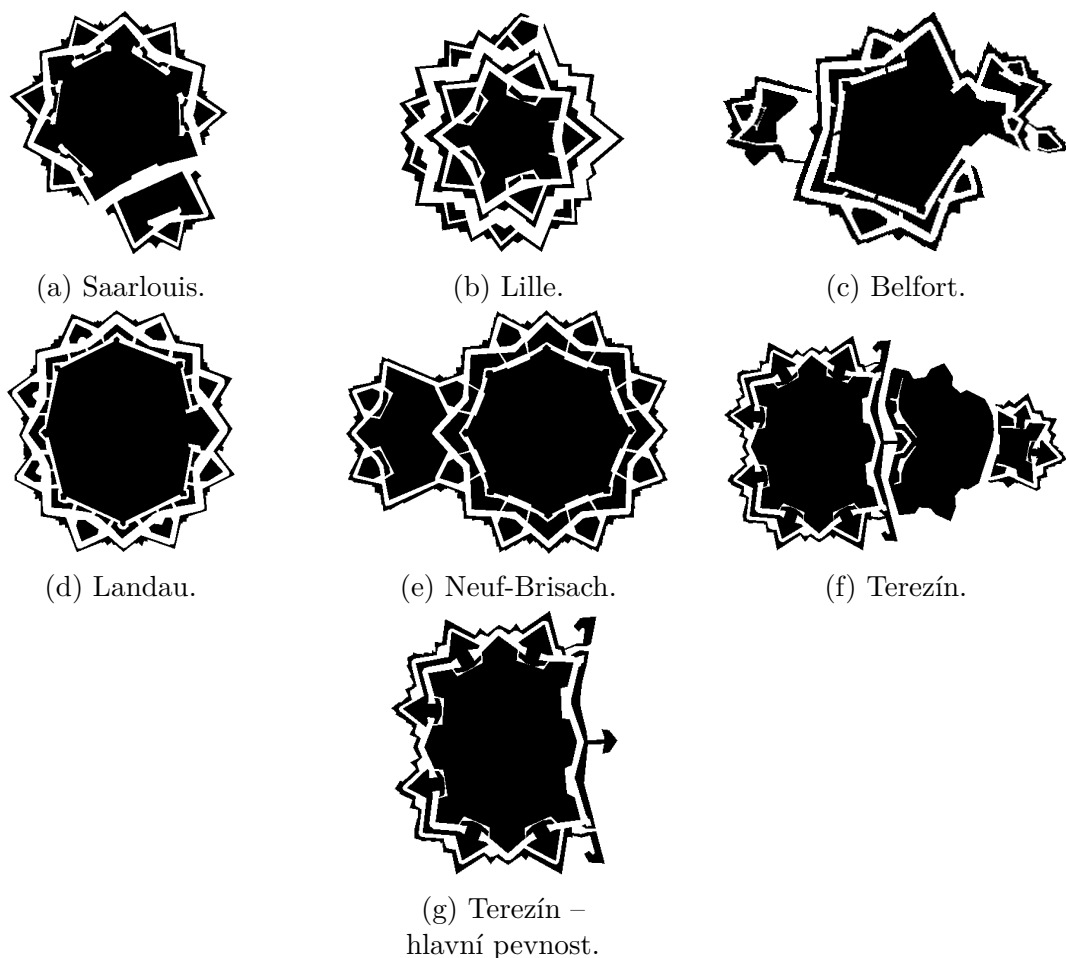
Tabulka 5: Výsledné hodnoty fraktální dimenze.

Pevnost	Fraktální dimenze jednotlivých pásem opevnění				
	Vnitřní	Střední	Vnější	Všechna pásma	Celá pevnost
Rhodos	1,90	1,59		1,91	1,92
Padova	1,87			1,87	1,87
Olomouc	1,87	1,44	1,54	1,75	1,88

Významným stavitelem bastionových pevností byl Sébastien Le Prestre de Vauban. Podle jeho návrhů bylo postaveno mnoho pevností, které byly později teoretiky rozděleny do tří systémů. V prvním systému byly postaveny níže vyobrazené pevnosti Saarlouis a citadela Lille. Jsou zde patrné bastiony, které jsou součástí vnitřního pásma, to se skládalo u opevnění Saarlouis ještě z kleští, u citadely Lille navíc i z detašovaných bastionů. Pevnosti druhého a třetího systému se od sebe příliš neliší. Vnitřní pásmo tvoří spolu se základním pevnostním okruhem předsunuté bastiony, které navazují na kleště. Rozdíl mezi druhým a třetím systémem je lomená kurtina u třetího systému (ta je chráněna kleštěmi). Hodnoty fraktální dimenze opevnění porovnáváné mezi sebou podle jednotlivých pásem nejsou zcela jednoznačné a není možné jejich začlenění do jednotlivých Vaubanových systémů. Porovnáním celých pevností nejvíce vyniká pevnost Belfort, jejíž výslednou fraktální dimenzi ovlivnily dvě korunní hradby. Tak jako u předchozí pevnosti byla ovlivněna fraktální dimenze pevnosti Saarlouis předsunutou korunní hradbou, bez které je fraktální dimenze opevnění 1,89 (v kategorii „celá pevnost“). V kategorii „všechna pásma“ se výrazně odlišuje citadela Lille. Naproti tomu se pevnost Terezín, ačkoli je složena z viditelně odlišných stavebních prvků, hodnotami fraktální dimenze podobá zbylým pevnostem (viz tab. 6).

Tabulka 6: Výsledné hodnoty fraktální dimenze.

Pevnost	Fraktální dimenze jednotlivých pásem opevnění				
	Vnitřní	Střední	Vnější	Všechna pásma	Celá pevnost
Saarlouis	1,89	1,60	1,44	1,83	1,88
Lille	1,85	1,56	1,48	1,77	1,90
Belfort	1,86	1,55	1,51	1,80	1,87
Landau	1,89	1,43	1,41	1,83	1,90
Neuf-Brisach	1,87	1,70	1,45	1,85	1,90
Terezín	1,85	1,74	1,46	1,85	1,89
Terezín – hlavní pevnost	1,86	1,65	1,52	1,85	1,89



Obrázek 23: Obrázky pevností podle Vaubana a stavitelské školy v Mézières.

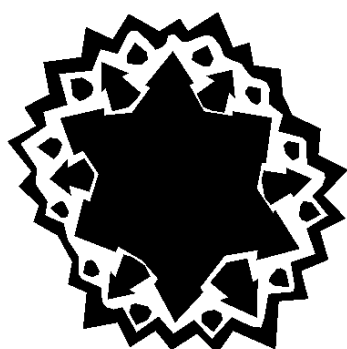
6.4 Klešťový a polygonální opevňovací systém

V těchto obdobích byl rozhodující především tvar vnějšího opevnění. Klešťová opevnění byla založena na soustavě ramen vstupujících pod pravým a vystupujících pod ostrým úhlem. Polygonální opevnění se skládala z ramen, která svírala tupý úhel.

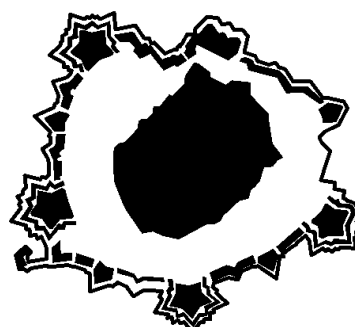
Opevnění citadely Arad v Rumunsku je kombinací bastionového a klešťového systému opevňování. Tvarem i hodnotou fraktální dimenze v kategorii „všechna pásma“ se citadela Arad podobá Vaubanovým pevnostem a v kategorii „celá pevnost“ dosahuje hodnoty fraktální dimenze kruhu (viz tab. 2). Podobnost s Vaubanovými pevnostmi je možné pozorovat i u detailu klešťového opevnění Svídnice. Hodnoty z kategorie „celá pevnost“ jsou u všech pevností velmi podobné hodnotám bastionových opevnění. I u polygonálního opevnění Ingolstadtu, a to i v případě větší části pevnosti Ingolstadt (viz obr. 24d vlevo), je hodnota fraktální dimenze 1,89.

Tabulka 7: Výsledné hodnoty fraktální dimenze.

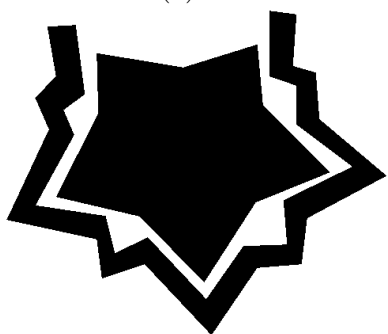
Pevnost	Fraktální dimenze jednotlivých pásem opevnění				
	Vnitřní	Střední	Vnější	Všechna pásma	Celá pevnost
Arad	1,86	1,60	1,62	1,85	1,92
Svidnice		1,59	1,43	1,75	1,89
Svidnice – detail	1,89	1,68		1,83	
Ingolstadt			1,59		1,89



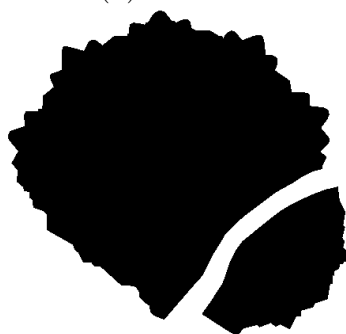
(a) Arad.



(b) Svidnice.



(c) Svidnice – detail.



(d) Ingolstadt – celá pevnost.

Obrázek 24: Obrázky kleštvého a polygonálního systému opevnování.

6.5 Fortový opevňovací systém

Fortový opevňovací systém byl založen na detašovaných objektech, ty byly odsunuty dále do předpolí tak, aby se jádro pevnosti nacházelo mimo dostřel drážkovaných děl. Forty tvořily prstenec kolem opevňovaného území, tudíž se nadále nejednalo o souvislé opevnění, ale každý fort byl samostatnou malou pevností. Pro analýzu tohoto opevňovacího systému byly vybrány tři fortové okolí Olomouce. Tvar fortů byl mnohem jednodušší než tomu bylo u bastionových pevností, spíše se podobal rondelovým opevněním. Hlavním důvodem změny tvaru opevnění byla větší vzdálenost, ve které byly útok a obrana vedeny. Porovnáním vnitřních pásem i pevností jako celku se potvrzuje, že se jedná tvarově o jednoduché stavby.



Obrázek 25: Obrázky fortů z okolí Olomouce.

Tabulka 8: Výsledné hodnoty fraktální dimenze.

Pevnost	Fraktální dimenze jednotlivých pásem opevnění				
	Vnitřní	Střední	Vnější	Všechna pásma	Celá pevnost
Šibeniční vrch	1,92	1,68	1,68	1,84	1,90
Slavonín	1,90	1,62	1,62	1,83	1,90
Radíkov	1,91			1,91	1,91

6.6 Liniový opevňovací systém

Objekty liniového opevňovacího systému byly stejně jako u fortového systému součástí většího obranného pásma. Významnou roli v opevňování hrál především použitý materiál. Pro ukázkou byly vybrány dva pěchotní sruby. Pěchotní sruby bylo možné typově rozdělit podle mnoha kritérií, jedním z nich je i odolnost. Podle odolností se dále dělily na sruby velkého typu (tzv. římany) a malého typu (tzv. araby), jejichž názvy byly odvozeny od římských a arabských číslic, kterými se odlišovaly. Sruby velkého typu byly budovány na důležitějších místech a byly lépe vyzbrojeny. Československé pěchotní sruby odolnosti III a IV (viz obr. 26) jsou podobně jako forty z předchozího systému tvarově jednodušší, s čímž souvisí i hodnota fraktální dimenze (viz tab. 9).

Tabulka 9: Výsledné hodnoty fraktální dimenze.

Pevnost	Fraktální dimenze jednotlivých pásem opevnění				
	Vnitřní	Střední	Vnější	Všechna pásma	Celá pevnost
Odolnost III	1,91			1,91	1,91
Odolnost IV	1,90			1,90	1,90



(a) Pěchotní srub odolnost III.



(b) Pěchotní srub odolnost IV.

Obrázek 26: Obrázky pěchotních srubů československého lehkého opevnění.

6.7 Vývoj opevňování v Olomouci

Při přípravě podkladových materiálů byl kladen důraz na zařazení opevnění Olomouce do všech opevňovacích systémů tak, aby bylo možné srovnání opevnění podle historického vývoje. Obrázky opevnění a tabulka s komentářem jsou uvedeny níže. Následující odstavce stručně popisují historický původ vyobrazených opevnění (viz obr. 27).

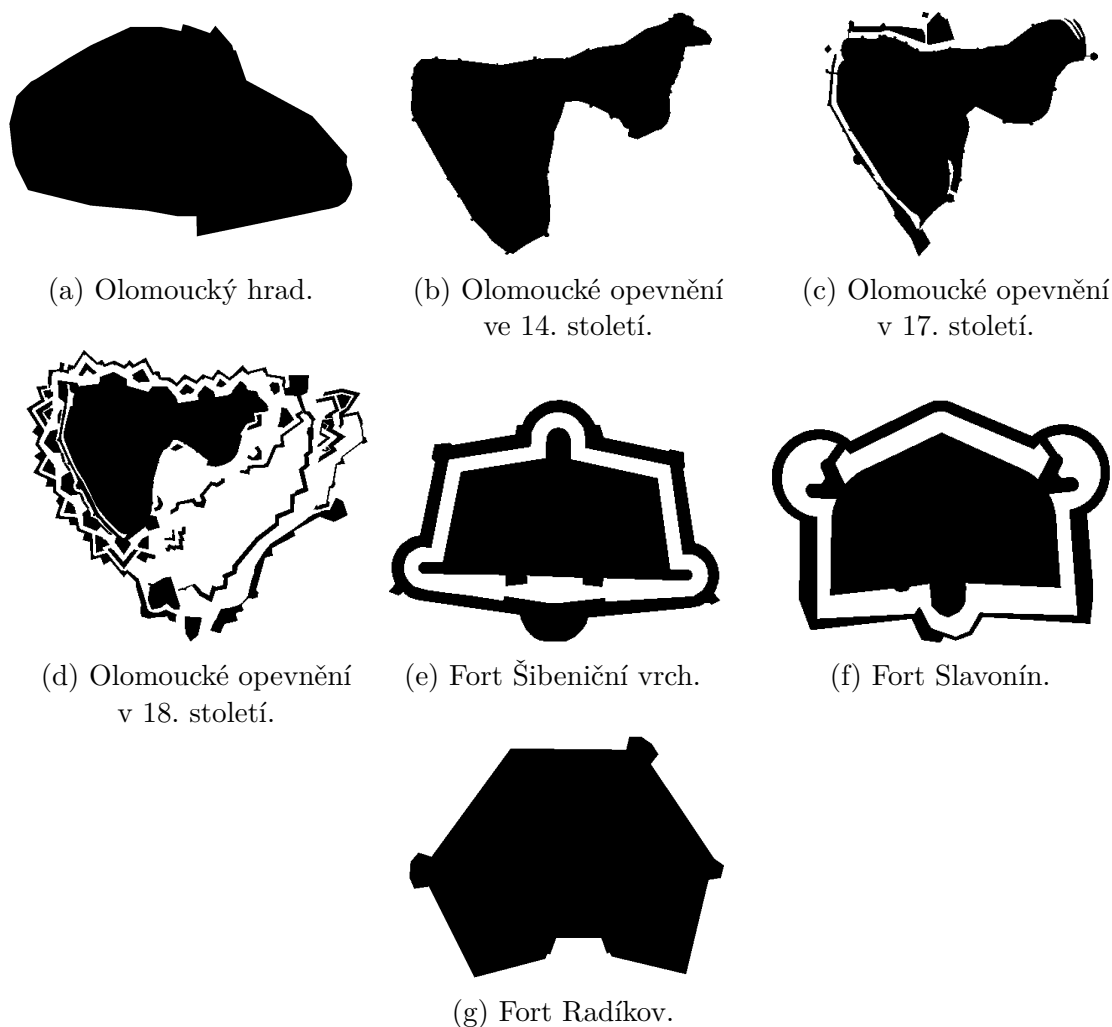
Prvním opevněným místem v Olomouci byl Václavský pahorek, kde byla na počátku 13. století vystavěna mohutná hradba kolem Olomouckého hradu a svatováclavského církevního komplexu. (*Půdorys hradeb (viz obr. 27a) byl vytvořen pouze pro potřeby srovnání vývoje olomouckého opevňování*). Pozdější středověký tvar opevnění města se datuje k první polovině 14. století. Téměř celé opevnění bylo chráněno vodními toky, ať už řekou Moravou, řekou Povelkou nebo umělým kanálem.

V roce 1642 padla po čtyřdenním obléhání olomoucká pevnost do rukou Švédů, kteří ji za pomoci obyvatel začali přestavovat podle soudobých trendů opevňování (Kuch-Breburda a Kupka, 2003). V té době byly přestavěny poničené části původního opevnění po obléhání a vystavěny první jednoduché bastiony.

V 18. století došlo k další významné přestavbě opevnění, při které bylo odkoupeno velké množství pozemků a zničeno i několik vesniček v těsné blízkosti předhradí. Významně byly upraveny i vodní toky ve městě, kdy byly některé svedeny do Moravy, jiné zasypány. Historicky nepravidelný půdorys města znemožňoval výstavbu pro tehdejší dobu ideálního pravidelného mnohoúhelníku. Na západní i severní straně Olomouce se podařilo vytvořit pravidelné bastionové fronty, ale na jihu a východě byla potřeba obranu přizpůsobit terénu i vodním tokům.

Polygonální obranný systém nebyl na území dnešního státního celku aplikován. Kolem Olomouce však byly vybudovány předsunutě forty, které byly dále postaveny

pouze u pevnosti Terezín. V roce 1846 byla dokončena výstavba prvního polygonálního fortu na Šibeničním a Tabulovém vrchu. V roce 1866 byly vybudovány čtyři nové lunety podobné fortům na Šibeničním a Tabulovém vrchu, konstrukčně se však v řadě použitých obranných prvků odlišovaly (Kuch-Breburda a Kupka, 2003). U nových lunet bylo použito vnitřních dvoukaponiér, které jsou také nazývány „kočičí uši“, jak je vidět u fortu Slavonín (viz obr. 27f). Od roku 1871 měla probíhat výstavba nejsilnějšího uskupení permanentních fortů na Svatém Kopečku. Nakonec byla v tomto permanentním provedení realizována pouze stavba fortu Radíkov, která byla v roce 1876 zastavena.



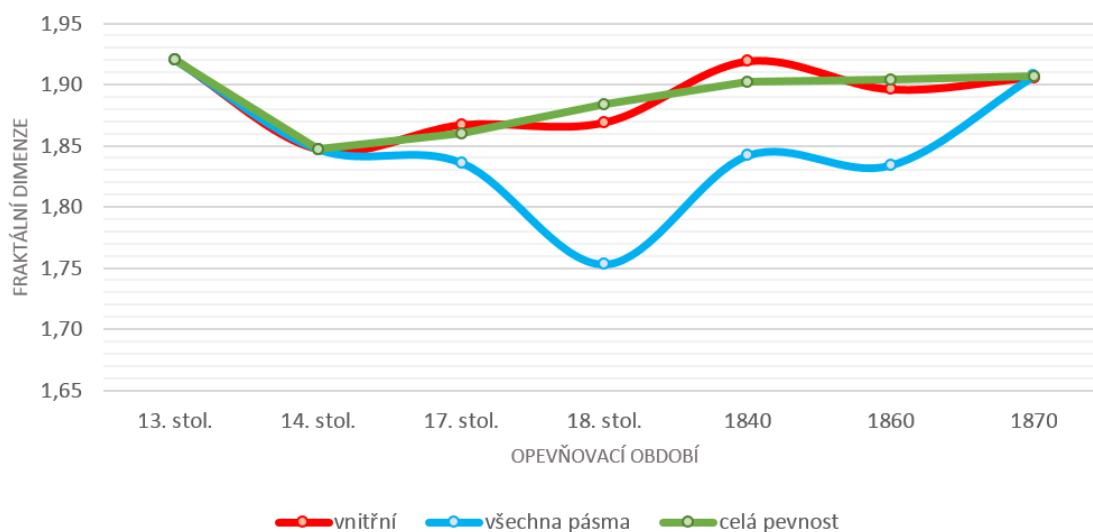
Obrázek 27: Obrázky vývoje opevnování Olomouce napříč opevňovacími obdobími.

Tabulka 10 zobrazuje všechny výše zmiňované opevňovací objekty. Ty jsou řazeny chronologicky podle doby jejich výstavby od nejstaršího po nejmladší. Výsledné hodnoty fraktální dimenze kategorie „celá pevnost“ mají trend, který byl na začátku práce předpokládán, což znázorňuje i graf 1. Nejjednodušší tvar je pozorován u Olomouckého hradu, jehož výsledná hodnota fraktální dimenze dosahuje fraktální dimenze 1,92. Stejně i fort z posledního období potvrzují, že se tvary opevnění

v pozdějším období začaly opět zjednodušovat. Podobné výsledky je možné vyčíst i v kategorii „všechna pásma“, kde je mimo jiné vidět, že se fraktální dimenze s vývojem útočných prostředků snižovala a vrcholu opevňování bylo dosaženo v 18. století u bastionového systému opevnění. Po krizi drážkovaného dělostřelectva v 19. století se hodnota fraktální dimenze začala opět zvyšovat.

Tabulka 10: Výsledné hodnoty fraktální dimenze.

Pevnost	Fraktální dimenze jednotlivých pásem opevnění				
	Vnitřní	Střední	Vnější	Všechna pásma	Celá pevnost
Olomoucký hrad	1,92			1,92	1,92
Olomouc 14. stol.	1,85			1,85	1,85
Olomouc 17. stol.	1,87	1,51		1,84	1,86
Olomouc 18. stol.	1,87	1,44	1,54	1,75	1,88
Šibeniční vrch	1,92	1,68	1,68	1,84	1,90
Slavonín	1,90	1,62	1,62	1,83	1,90
Radíkov	1,91			1,91	1,91



Graf 1: Změna fraktální dimenze pásem obrany opevnění na území Olomouce v závislosti na různých opevňovacích obdobích.

7 Diskuze

Tato diplomová práce měla za cíl porovnat vojenskou architekturu v různých historických obdobích pomocí fraktální geometrie. Pro samotnou realizaci práce musel být vybrán vhodný a dostupný program. Jelikož bylo rozhodnuto, že výpočet fraktální dimenze bude proveden pomocí algoritmu box-counting, byly testovány programy, které výpočet touto metodou umožňují. Program byl vybrán na základě testování, při kterém byly vyhodnoceny hodnoty fraktální dimenze pro vybrané tvary, jejichž hodnoty se nejvíce blížily předpokládaným výsledkům. Byl zvolen program Fractal Analysis System, který je na metodě box-counting založen a pro samotný výpočet fraktální dimenze není nutné žádné další uživatelské nastavení.

Podkladová data vojenských objektů, které tvořily mimo jiné plánky stavitelů, případně kreslené rekonstrukce historiků, byla vybrána s ohledem na dostupnost a kvalitu. Kvalita byla rozhodující při dalším zpracování – digitalizaci. V některých případech bylo obtížnější tvar některých objektů zachytit, jindy byl tvar zjednodušen. Přiměřené zjednodušení tvaru bylo možné bez většího vlivu na výslednou fraktální dimenzi. Půdorysy opevnění byly vytvářeny s výplní, tím se dala odlišit jednotlivá pásma a bylo tak možné nechat vyniknout i vodní příkopy ve vnitřním obranném pásmu pevnosti. Pro srovnání zobrazuje tabulka v příloze 1 některá opevnění s vodním příkopem i bez vodního příkopu (*existence vodního příkopu lze odvodit z popisu obrázku, kde je součástí názvu slovo „voda“*). Použitím plných objektů vznikl i rozkol v použití slova „nižší“ a „vyšší“ hodnota fraktální dimenze v cílech práce a práci samotné, jelikož při zadávání tématu se předpokládala práce s křivkou.

Samotné hodnocení opevnění bylo rozděleno do pěti kategorií, podle kterých byla digitalizovaná data exportována. Pro tyto exportované obrázky byla posléze počítána fraktální dimenze. Rozdělení do uvedených kategorií vycházelo z pásem, ze kterých se skládala bastionová opevnění. Přestože se ostatní opevnění z tolika pásem neskládala, byly jejich hodnoty vyplněny i do dalších kategorií, aby byla pokryta maximální možná míra srovnání s ostatními obrannými objekty. Kategorie „celá pevnost“ byla vytvořena z plného polygonu, jehož hranice tvořilo vnější pásmo (krytá cesta), při jehož digitalizaci byly oddělené prvky obrany logicky propojeny přes přirozené překážky nebo s nejbližším dalším prvkem. Tento krok byl učiněn z důvodu další možnosti srovnání se všemi objekty a zachycení změny tvaru opevnění jako celku. Výsledné hodnoty fraktální dimenze některých opevnění jsou výrazně ovlivněny podkladem a terénními překážkami, které měly zásadní vliv na celkový tvar opevnění. Takové případy se v práci vyskytovaly u opevnění středověkého a také u rondelového opevňovacího systému.

8 Závěr

Magisterská práce měla za cíl stanovit fraktální dimenzi opevnění v různých historických obdobích s přihlédnutím k jednotlivým opevňovacím systémům. V první části práce byly přiblíženy pojmy, které souvisejí s teorií fraktální geometrie. Další část práce se orientovala na charakteristiku opevňovacích systémů a popis hlavních prvků opevnění. V popisu opevňovacích systémů nebyly opomenuty ani používané zbraně. Každý opevňovací systém byl doplněn o několik konkrétních pevností z různých míst Evropy, nebyly vynechány ani pevnosti na území dnešní České republiky a zejména pak opevnění v Olomouci.

Pro porovnání opevnění bylo digitalizováno 25 opevnění, z nichž bylo podle stanovených kategorií exportováno na sto obrázků, pro které byla počítána fraktální dimenze. Všechny obrázky s příslušnou fraktální dimenzí jsou uvedeny v příloze 1. Kapitola 6 byla rozdělena podle opevňovacích systémů. Pro každé toto období byly zobrazeny opevnění se všemi obrannými pásmy, ze kterých se skládaly a k nim byla doplněna tabulka výsledných hodnot fraktální dimenze.

Závěr práce se zaměřuje na opevnění Olomouce. Jsou zde popsány historické souvislosti, které se vážou na výstavbu a přestavbu olomouckých opevnění. Na příkladu olomouckých pevností byl potvrzen předpoklad z cílů práce. První opevnění Olomouckého hradu bylo jednoduché a oblé a tomu odpovídá i vysoká hodnota fraktální dimenze, která je blízká hodnotě fraktální dimenze kruhu, vypočítané stejným programem při testování softwaru. S vývojem hladkohlavňového dělostřelectva se fraktální hodnota snižovala a vrcholu bylo dosaženo u bastionového způsobu opevňování. Později v 19. století, po vývoji drážkovaného dělostřelectva, se tvar opevnění vrátil zpět k jednoduššímu tvaru.

LITERATURA

- BAMSLEY, M. F. *Fractal Everywhere*. Academic Press Professional, 1993.
- BATTY, M., LONGLEY, P. *Fractal Cities: A Geometry of Form and Function*. Academic Press Limited, 1994. ISBN 0-12-455570-5.
- BURRI, P. H., GIL, J., WEIBEL, E. R. *General Thoracic Surgery, 6th Edition*, chapter 3 Ultrastructure and Morphometry of the Human Lung, s. 30–46. Lippincott Williams & Wilkins, 2005. Dostupné z: <http://flylib.com/books/en/3.98.1.8/1/>.
- ČAPKA, F. *Dějiny zemí Koruny české v datech*. 3. vydání. Libri, 1998. Dostupné z: <http://www.libri.cz/databaze/dejiny/>. ISBN 80-85983-67-2.
- ČEPOVÁ, D. Softwarové možnosti výpočtu fraktální dimenze geografických jevů. Master's thesis, Univerzita Palackého v Olomouci, 2012.
- ČTVERÁK, V., LUTOVSKÝ, M. *Pevnosti a opevnění v Čechách na Moravě a ve Slezsku*, chapter Pravěké a raně středověké fortifikace v českých zemích, s. 12–42. Libri, 2002. ISBN 80-7277096-9.
- DASGUPTA, R. Determination of the fractal dimension of a shore platform profile. *Journal Geological Society of India*, 81, s. 122–128, January 2013. Dostupné z: http://download.springer.com/static/pdf/591/art%253A10.1007%252Fs12594-013-0011-0.pdf?auth66=1425767917_c0653f546690a3fc49b0b5965701d00d&ext=.pdf.
- DRAZIN, P. G. *Collected Papers of Lewis Fry Richardson*, 1 Meteorology and numerical analysis, chapter Fractals, s. 45 – 47. Press Syndicate of the University of Cambridge, 1993.
- DURDÍK, T. *Pevnosti a opevnění v Čechách na Moravě a ve Slezsku*, chapter České fortifikace vrcholného středověku, s. 43–86. Libri, 2002. ISBN 80-7277096-9.
- EGLASH, R. *African Fractals - Modern Computing and Indigenous Design*. Rutgers University Press, 1999. ISBN 978-0813526140.
- HENDL, J. Pokročilé metody výpočtu fraktální dimenze v geovědách. Master's thesis, Univerzita Palackého v Olomouci, 2014.
- HINNER, M. Jemný úvod do fraktálů. online, 1999. Dostupné z: <http://martin.hinner.info/math/Fraktaly/>.

- HOTAŘ, V. Fraktální geometrie, 2011. Dostupné z: <http://www.ksr.tul.cz/fraktaly/>.
- HOTAŘ, V. Vyhodnocování strukturovaných povrchů pomocí matlabu. In *Mezinárodní konference Technical Computing Prague*, 2008. Dostupné z: http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/MATLAB08/prispevky/045_hotar.pdf.
- JANOŠKA, Z. Hausdorffova dimenze při studiu sídel. Master's thesis, Univerzita Palackého v Olomouci, 2011.
- KUCH-BREBURDA, M., KUPKA, V. *Pevnosti 23: Pevnost Olomouc*. Praha : FORTprint, 2003. ISBN 80-86011-21-6.
- KUPKA, V. *Boje o francouzské pevnosti během německo-francouzské války 1870 - 71*. Fortprint, 2009. ISBN 9788086011387.
- KUPKA, V. *Pevnosti 1: Fortové pevnosti a jejich místo v dějinách opevnování*. Praha : FORTprint, 1993. ISBN 80-900299-0-6.
- KUPKA, V. *Stavitelé, obránci a dobyvatelé pevností*. Libri, 2005. ISBN 80-85983-67-2.
- KUPKA, V., ČTVERÁK, V., LUTOVSKÝ, M. *Pevnosti a opevnění v Čechách na Moravě a ve Slezsku*, chapter Slovník odborné terminologie a dalších opevněných lokalit, s. 416–534. Libri, 2002. ISBN 80-7277096-9.
- KUPKA, V. a. *Pevnosti a opevnění v Čechách na Moravě a ve Slezsku*, chapter Obecný vývoj evropského pevnostního stavitelství v období od 16. do 19. století, s. 87–415. Libri, 2002a. ISBN 80-7277096-9.
- KUPKA, V. b. *Pevnosti a opevnění v Čechách na Moravě a ve Slezsku*, chapter Pevnostní stavitelství v období mezi oběma světovými válkami, s. 260–267. Libri, 2002b. ISBN 80-7277096-9.
- MANDELBROT, B., FIALA, J. *Fraktály: tvar, náhoda a dimenzie*. Mladá fronta, 2003. ISBN 9788020410092.
- MANDELBROT, B. B. *The Fractal Geometry of Nature*. W. H. FREEMAN AND COMPANY New York, 1982.
- PÁSZTO, V., MAREK, L., TUČEK, P., JANOŠKA, Z. Perspectives of fractal geometry in gis analyses. In *GIS Ostrava 2011 - Sborník*. VŠB, 2011. Dostupné z: http://gis.vsb.cz/GIS_Ostrava/GIS_Ova_2011/sbornik/papers/Paszto.pdf.
- PÁTRÁČ. Hrad helřtýn - pevnost v moravské bráně. [online], 2011. Dostupné z: <http://www.palba.cz/viewtopic.php?t=4538>.

- PAUŠ, P. Počítačové metody a analýzy fraktálních množin. Master's thesis, České vysoké učení technické v Praze, 2006.
- PEITGEN, H.-O., JUERGENS, H., SAUPE, D. *Chaos and Fractals New Frontiers of Science*. Springer Science and Business Media, Inc., second edition edition, 2004.
- PETYOVSKÝ, P., TIŠNOVSKÝ, P. Linearizované systémy iterovaných funkcí, 2003. Dostupné z: http://www.elektrorevue.cz/clanky/03019/kap_1.htm.
- POHLOVÁ, V. Fraktální geometrie. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, 34, No. 5, s. 267–277, 1989. Dostupné z: <http://dml.cz/dmlcz/138364>.
- QUATTROCHI, D., GOODCHILD, M. *Scale in Remote Sensing and GIS*. Environmental science and engineering, GIS, remote sensing, mapping. Taylor and Francis, 1997. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=uyfbQN0s_tgC. ISBN 9781566701044.
- RYPKA, M. Techniky výpočtu fraktálních dimenzí. Master's thesis, Univerzita Palackého v Olomouci, 2008.
- SOUTAR, P. Pohled od jihu: Americká bitevní loď uss new jersey plouvá mezi corregidorem a pevnosti fort drum. [online], červenec 1983. Dostupné z: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e8/Fort_Drum_DN-SN-83-09891.JPG.
- TIŠNOVSKÝ, P. Fraktály, X. 2000. Dostupné z: http://www.fit.vutbr.cz/~tisnovpa/fract/clanky/1.htm#tth_sEc1.5.
- TIŠNOVSKÝ, P. Želví grafika a rekurze, VIII. 2007. Dostupné z: <http://www.root.cz/clanky/zelvi-grafika-a-rekurze/>.
- VENCL, S. K problému počátku pravěkých fortifikací. *Sborník prací Filozofické fakulty brněnské univerzity. M, Řada archeologická*, 46, M2, s. 29–39, 1997. ISBN 80-210-1755-4.
- VOSS, R. F. *The Science of Fractal Images*, chapter Fractals in nature: From characterization to simulation, s. 21 – 70. Springer New York, 1988. doi: 10.1007/978-1-4612-3784-6. Dostupné z: <http://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4612-3784-6/page/1>.
- WIESNER, R. Užití a zneužití fraktálů. Master's thesis, Masarykova univerzita, 2006.
- ŽÁRA, J., BENEŠ, B., SOCHOR, J., FELKEL, P. *Moderní počítačová grafika*. Computer Press, 2004. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=USQnAAAACAAJ>. ISBN 9788025104545.

PŘÍLOHY

Seznam příloh

Vázané přílohy

Příloha 1	Tabulka obrázků s vypočtenou fraktální dimenzí
Příloha 2	Seznam zdrojů podkladových dat

Volné přílohy







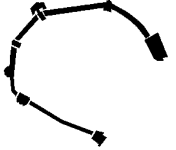
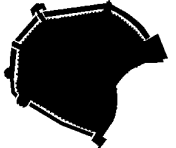
Příloha 3	CD
-----------	----

Netištěné přílohy

Příloha 4	ve složce <i>obrazky</i> na CD
-----------	--------------------------------



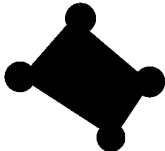






Příloha 1

Tabulka 1: Seznam pevností

Skica	Pevnost	Opevňovací systém	Pásma opevnění	Fraktální dimenze	Název obrázku ve složce obrázky (*.bmp)
	Olomouc	středověký	vnitřní	1,92	Olomouc_hrad
	Brusel	středověký	vnitřní	1,92	Brusel
	Praha	středověký	vnitřní	1,91	Prazsky_hrad
	Olomouc	středověký	vnitřní	1,85	Olomouc_14_stoleti
	Helfštýn	středověký	vnitřní	1,88	helfstyn
	Ingolstadt	rondelový	vnitřní	1,91	Ingolstadt_vnitri
	Ingolstadt	rondelový	střední	1,58	Ingolstadt_stredni
	Ingolstadt	rondelový	všechna	1,88	Ingolstadt_vse








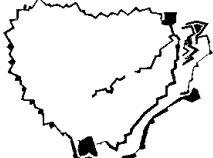
Pokračování na další stránce...

Tabulka 1: Seznam pevností (pokračování)

Skica	Pevnost	Opevňovací systém	Pásmo opevnění	Fraktální dimenze	Název obrázku ve složce obrázky (*.bmp)
	Ingolstadt	rondelový	celá pevnost	1,91	Ingolstadt_cele
	Pardubice	rondelový	vnitřní	1,85	Pardubice_cele
	Pardubice	rondelový	vnitřní	1,85	Pardubice_zamek
	Pardubice	rondelový	vnitřní	1,87	Pardubice_mesto
	Olomouc	rondelový	vnitřní	1,87	OL_17_vnitrni
	Olomouc	rondelový	celá pevnost	1,86	OL_17_cele
	Olomouc	rondelový	všechna	1,84	Olomouc_17_vse
	Olomouc	rondelový	střední	1,51	OL_17_stredni
	Padova	bastionový	vnitřní	1,87	Padova





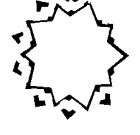
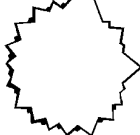
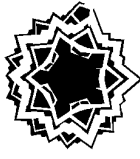
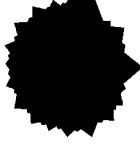
Pokračování na další stránce...

Tabulka 1: Seznam pevností (pokračování)

Skica	Pevnost	Opevňovací systém	Pásmo opevnění	Fraktální dimenze	Název obrázku ve složce obrázky (*.bmp)
	Rhodos	bastionový	vnitřní	1,90	Rhodos_vnitri
	Rhodos	bastionový	střední	1,59	Rhodos_stredni
	Rhodos	bastionový	všechna	1,91	Rhodos_vse
	Rhodos	bastionový	celá pevnost	1,92	Rhodos_cele
	Olomouc	bastionový	vnitřní	1,87	OL_vnitri
	Olomouc	bastionový	vnitřní	1,87	OL_vnitri_voda
	Olomouc	bastionový	střední	1,44	OL_stredni_pasmo
	Olomouc	bastionový	vnější	1,44	OL_kryta_cesta



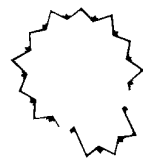





Pokračování na další stránce...

Tabulka 1: Seznam pevností (pokračování)

Skica	Pevnost	Opevňovací systém	Pásma opevnění	Fraktální dimenze	Název obrázku ve složce obrázky (*.bmp)
	Olomouc	bastionový	všechna	1,75	OL_vse
	Olomouc	bastionový	všechna	1,88	OL_cele
	Lille	bastionový	vnitřní	1,86	Lille
	Lille	bastionový	vnitřní	1,85	Lille_vnitřni
	Lille	bastionový	střední	1,56	Lille_stredni
	Lille	bastionový	vnější	1,48	Lille_kryta_cesta
	Lille	bastionový	všechna	1,77	Lille_vsechna_pasma
	Lille	bastionový	celá pevnost	1,90	Lille_cele

Pokračování na další stránce...









Tabulka 1: Seznam pevností (pokračování)

Skica	Pevnost	Opevňovací systém	Pásmo opevnění	Fraktální dimenze	Název obrázku ve složce obrázky (*.bmp)
	Saarlouis	bastionový	vnitřní	1,89	Saarlouis_vnitri
	Saarlouis	bastionový	střední	1,60	Saarlouis_stredni
	Saarlouis	bastionový	vnější	1,44	Saarlouis_vnejsi
	Saarlouis	bastionový	všechna	1,83	Saarlouis_vse
	Saarlouis	bastionový	celá pevnost	1,88	Saarlouis_cele
	Saarlouis	bastionový	střední	1,56	Saarlouis_HP ¹ _stredni
	Saarlouis	bastionový	vnější	1,46	Saarlouis_HP_vnejsi
	Saarlouis	bastionový	všechna	1,84	Saarlouis_HP_vse

Pokračování na další stránce...

¹HP – Hlavní pevnost bez korunní hradby.


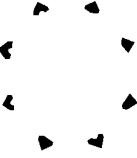
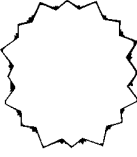



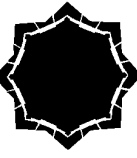
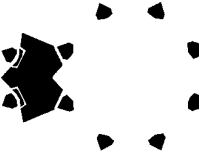
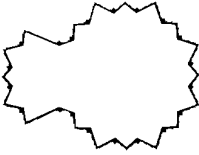
Tabulka 1: Seznam pevností (pokračování)

Skica	Pevnost	Opevňovací systém	Pásmo opevnění	Fraktální dimenze	Název obrázku ve složce obrázky (*.bmp)
	Saarlouis	bastionový	celá pevnost	1,89	Saarlouis_HP ² _cele
	Belfort	bastionový	vnitřní	1,87	Belfort_vnitrni
	Belfort	bastionový	vnitřní	1,86	Belfort_vnitrni_voda
	Belfort	bastionový	střední	1,55	Belfort_stredni
	Belfort	bastionový	vnější	1,51	Belfort_vnejsi
	Belfort	bastionový	všechna pásma	1,81	Belfort_vse
	Belfort	bastionový	všechna pásma	1,80	Belfort_vse_voda
	Belfort	bastionový	celá pevnost	1,87	Belfort_cely

Pokračování na další stránce...

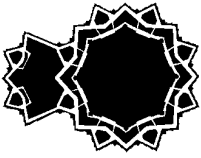







²HP – Hlavní pevnost bez korunní hradby.

Tabulka 1: Seznam pevností (pokračování)

Skica	Pevnost	Opevňovací systém	Pásma opevnění	Fraktální dimenze	Název obrázku ve složce obrázky (*.bmp)
	Landau	bastionový	vnitřní	1,89	Landau_vnitrni
	Landau	bastionový	střední	1,43	Landau_stredni
	Landau	bastionový	vnější	1,41	Landau_vnejsi
	Landau	bastionový	všechna pásma	1,83	Landau_vse
	Landau	bastionový	celá pevnost	1,90	Landau_cele
	Neuf-Brisach	bastionový	vnitřní	1,90	Neuf_Brisach
	Neuf-Brisach	bastionový	vnitřní	1,87	NB_vnitrni
	Neuf-Brisach	bastionový	střední	1,70	NB_stredni
	Neuf-Brisach	bastionový	vnější	1,45	NB_kryta_cesta




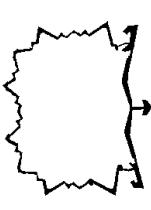
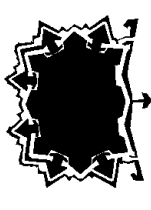


Pokračování na další stránce ...

Tabulka 1: Seznam pevností (pokračování)

Skica	Pevnost	Opevňovací systém	Pásma opevnění	Fraktální dimenze	Název obrázku ve složce obrázky (*.bmp)
	Neuf-Brisach	bastionový	vnější	1,85	NB_vse
	Neuf-Brisach	bastionový	celá pevnost	1,90	NB_cele
	Terezín	bastionový	vnitřní	1,85	Terezin_vnitri
	Terezín	bastionový	střední	1,74	Terezin_stredni
	Terezín	bastionový	vnější	1,46	Terezin_vnejsi
	Terezín	bastionový	všechna pásma	1,85	Terezin_vse
	Terezín	bastionový	všechna pásma	1,84	Terezin_vse_sipy
	Terezín	bastionový	celá pevnost	1,89	Terezin_cely

Pokračování na další stránce...

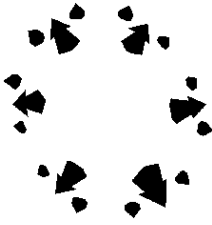
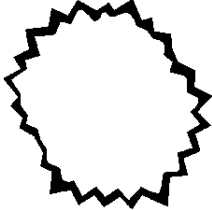
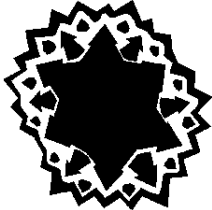
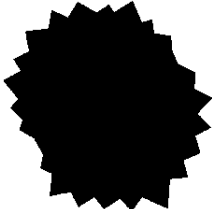
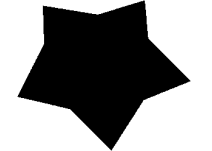
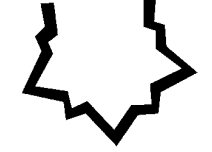

Tabulka 1: Seznam pevností (pokračování)

Skica	Pevnost	Opevňovací systém	Pásma opevnění	Fraktální dimenze	Název obrázku ve složce obrázky (*.bmp)
	Terezín	bastionový	celá pevnost	1,85	Terezin_cely_sip
	Terezín	bastionový	vnitřní	1,86	Terezin_HP ³ _vnitri
	Terezín	bastionový	střední	1,65	Terezin_HP_stredni
	Terezín	bastionový	vnější	1,52	Terezin_HP_vnejsi
	Terezín	bastionový	všechna pásma	1,85	Terezin_HP_vse
	Terezín	bastionový	celá pevnost	1,89	Terezin_HP_cele
	Arad	klešťový	vnitřní	1,86	Arad_vnitri

Pokračování na další stránce...

³HP – hlavní pevnost.


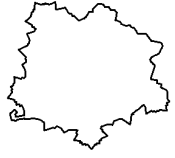






Tabulka 1: Seznam pevností (pokračování)

Skica	Pevnost	Opevňovací systém	Pásma opevnění	Fraktální dimenze	Název obrázku ve složce obrázky (*.bmp)
	Arad	kleštvý	střední	1,60	Arad_stredni
	Arad	kleštvý	vnější	1,62	Arad_vnější
	Arad	kleštvý	všechna pásma	1,85	Arad_vse
	Arad	kleštvý	celá pevnost	1,92	Arad_cele
	Svidnice	kleštvý	vnitřní	1,89	svidnice_d ⁴ _vnitri
	Svidnice	kleštvý	střední	1,68	svidnice_d_stredni
	Svidnice	kleštvý	všechna pásma	1,83	svidnice_d_vse

Pokračování na další stránce...

⁴d – detail kleštvého opevnění.

Tabulka 1: Seznam pevností (pokračování)



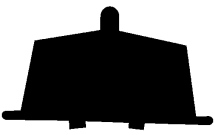




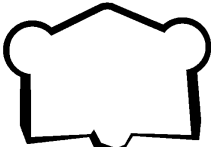

Skica	Pevnost	Opevňovací systém	Pásmo opevnění	Fraktální dimenze	Název obrázku ve složce obrázky (*.bmp)
	Svídnice	klešťový	střední	1,59	svidnice_stredni
	Svídnice	klešťový	vnější	1,43	svidnice_vnejsi
	Svídnice	klešťový	všechna pásma	1,75	svidnice_vse
	Svídnice	klešťový	celá pevnost	1,89	svidnice_cele
	Ingolstadt	polygonální	vnější	1,63	Ingolst_p_HP ⁵ _vnejsi
	Ingolstadt	polygonální	celá pevnost	1,89	Ingolst_p_HP_cele
	Ingolstadt	polygonální	vnější	1,68	Ingolst_p_MP ⁶ _vnejsi
	Ingolstadt	polygonální	celá pevnost	1,88	Ingolst_p_MP_cele

Pokračování na další stránce...

⁵Hlavní pevnost.


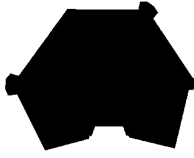


⁶Malá pevnost.

Tabulka 1: Seznam pevností (pokračování)

Skica	Pevnost	Opevňovací systém	Pásma opevnění	Fraktální dimenze	Název obrázku ve složce obrázky (*.bmp)
	Ingolstadt	polygonální	vnější	1,59	Ingolst_p_vnejsi
	Ingolstadt	polygonální	celá pevnost	1,89	Ingolst_p_cele
	Šibeník	fortový	vnitřní	1,92	Sibenik_vnitрни
	Šibeník	fortový	vnější	1,68	Sibenik_vnejsi
	Šibeník	fortový	všechna pásma	1,84	Sibenik_vse
	Šibeník	fortový	celá pevnost	1,90	Sibenik_cele
	Slavonín	fortový	vnitřní	1,90	Slavonin_vnitрни
	Slavonín	fortový	vnější	1,62	Slavonin_vnejsi
	Slavonín	fortový	všechna pásma	1,83	Slavonin_vse

Pokračování na další stránce...

Tabulka 1: Seznam pevností (pokračování)

Skica	Pevnost	Opevňovací systém	Pásmo opevnění	Fraktální dimenze	Název obrázku ve složce obrázky (*.bmp)
	Slavonín	fortový	celá pevnost	1,90	Slavonin_cele
	Radíkov	fortový	vnitřní	1,91	Radikov
	ČS ⁷ opevnění	liniový	vnitřní	1,91	odolnost_III
	ČS opevnění	liniový	vnitřní	1,90	odolnost_IV

⁷Československá opevnění.

Příloha 2

ARAD

Mapy Google. 2015. [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <https://www.google.cz/maps/place/Arad,+Rumunsko/@46.1724168,21.3341729,1913m/data=!3m1!1e3!4m2!3m1!1s0x4745984ba35c59c3:0xf70074a3e558491?hl=cs>.

BELFORT

KUPKA, V. *Boje o francouzské pevnosti během německo-francouzské války 1870 - 71*. Fortprint, 2009, s. 79. ISBN 9788086011387.

BRUSEL

BOUTTATS, G. 2001-. File: *Bombardement Bruxelles 1695 01.jpg*. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2014-03-12]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bombardement_Bruxelles_1695_01.jpg.

ČESKOSLOVENSKÉ OPEVNĚNÍ

STEHLÍK, E. Československý pevnostní systém z let 1935-38. IN *Pevnosti a opevnění v Čechách na Moravě a ve Slezsku*. Libri, 2002, s. 284. ISBN 80-7277096-9.

HELFŠTÝN

KUPKA, V., ČTVERÁK, V., LUTOVSKÝ, M. Slovník odborné terminologie a dalších opevněných lokalit. IN *Pevnosti a opevnění v Čechách na Moravě a ve Slezsku*. Libri, 2002, s. 443. ISBN 80-7277096-9.

INGOLSTADT

KLEEMANN, O. 2007. File: *Festung Ingolstadt 1573.jpg*. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2015-03-25]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Festung_Ingolstadt_1573.jpg.

Die Befestigungsanlagen Ingolstadts. 1999. SCHEUERER, Kurt. *Die Befestigungsanlagen Ingolstadts* [online]. [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://www4.ingolstadt.de/stadtmuseum/scheuerer/ing/festu-01.htm>

LANDAU

Die Festung. 2012. *Festungsbauverein Landau - Les amis de Vauban e.V.* [online]. [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: <http://www.festungsbauverein.de/die-festung/>.

LILLE

Plan of The City and Citadel of Lisle - Barry Lawrence Ruderman Antique Maps Inc. 2014. *Barry Lawrence Ruderman Antique Maps Inc.* [online]. [cit. 2014-03-12]. Dostupné z: <https://www.raremaps.com/gallery/enlarge/24501>.

NEUF-BRISACH

BOUTTATS, G. 2001-. File:Plan_citadelle_Neuf_Brisach.jpg. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2014-03-12]. Dostupné z: http://fr.wikipedia.org/wiki/Neuf-Brisach#/media/File:Plan_citadelle_Neuf_Brisach.jpg.

OLOMOUC

KUCH-BREBURDA, M., KUPKA, V. *Pevnosti 23: Pevnost Olomouc*. Praha : FORTprint, 2003, s. 1, 17, 23, 40, 150, 237. ISBN 80-86011-21-6.

PADOVA

Padova. 2014. *Fortified Places > Relief Maps > Padova (Padua)* [online]. [cit. 2014-03-12]. Dostupné z: <http://www.fortified-places.com/reliefs/venice/padova/image2.jpg>.

PARDUBICE

KUPKA, V., ČTVERÁK, V., LUTOVSKÝ, M. Slovník odborné terminologie a dalších opevněných lokalit. IN *Pevnosti a opevnění v Čechách na Moravě a ve Slezsku*. Libri, 2002, s. 489. ISBN 80-7277096-9.

PRAHA

KUPKA, Vladimír. 1996. *Pevnosti 9: Pevnost Praha*. 2. vyd. ARPA Dvůr Králové nad Labem: FORTprint, s.15. ISBN 80-860-1100-3.

RHODOS

Rhodes tourism info web sites. 2015. *Europe Travel* [online]. [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: <http://www.europetravel.gr/v2/de/Links.php?CatLinkId=14>.

SAARLOUIS

WIRTH, Christian. 2015. LEXIKON S. *Wgseald.de* [online]. [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: http://www.wgseald.de/LEXIKON_S.html.

SVÍDNICE

KUPKA, V. *Stavitelé, obránci a dobyvatelé pevností*. Libri, 2005, s. 133. ISBN 80-85983-67-2.

TEREZÍN

ROMAŇÁK, A. 1994. *Pevnosti 5: Pevnost Praha*. 2. vyd. ARPA Dvůr Králové nad Labem: FORTprint.