

# STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 1: Matematika a statistika

## Metody aproximace Ludolfova čísla

## Methods of approximation of Archimedes' constant

**Autor:** Jiří Zelenka

**Škola:** Gymnázium Zikmunda Wintra Rakovník, příspěvková organizace,

Žižkovo náměstí 186, 26901 Rakovník

**Kraj:** Středočeský kraj

**Konzultanti:** Jména a příjmení konzultantů včetně všech titulů

Rakovník 2018

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou práci SOČ vypracoval samostatně a použil jsem pouze literaturu a prameny uvedené v seznamu bibliografických záznamů.

Prohlašuji, že tištěná verze a elektronická verze soutěžní práce SOČ jsou shodné.

Nemám důvod protestovat proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) v platném znění.

V Domoušicích dne datum .....

Jiří Zelenka

## **Poděkování**

Děkuji všem svým přátelům a učitelům, kteří mě motivovali k psaní odborné práce na toto téma. Hlavně pak Mgr. Vojtěchu Delongovi, který velkou část svého volného času věnoval pravidelným konzultacím a řešení problémů s literaturou a s prací na počítači i v pozdních večerních hodinách. Neposledně jsem mu vděčen i za tvorbu latexové šablony, která mi usnadnila psaní práce.

## **Anotace**

Cílem této práce je informovat o základních metodách aproximace Ludolfova čísla (dále jen „ $\pi$ “). V práci je popsán historický vývoj a metody jeho výpočtu. Každou metodu zmíněnou v textu si otestujeme v počítačové simulaci, popřípadě provedeme experiment vedoucí k přibližné hodnotě  $\pi$ . Poslední téma, který si projdeme, je využití počítačových technologií k přiblížení se skutečné hodnotě  $\pi$ .

## **Klíčová slova**

Ludolf, číslo, pí, algoritmus, účinnost

## **Annotation**

The purpose of this thesis is to inform about the basic methods of approximation of Archimedes' constant (hereinafter " $\pi$ "). It is described the historical development and methods of its calculation. Every method which I present in the text we test by a computer simulation. Additionally, we make an experiment which led to an approximate value of  $\pi$ . In the end, we focus on the use of computer technology for  $\pi$  calculation.

## **Keywords**

Archimedes, constant, pi, algorithm, efficiency

# **OBSAH**

# 1 ÚVOD

Člověk si již od dob, když si začal uvědomovat tvary a velikosti, musel být vědom, že existuje jistá závislost mezi průměrem a obvodem kruhu. Nejspíš okolo 2000 př. n. l. lidé ve vyspělých civilizacích začali užívat konstantu, kterou, když ji vynásobili průměr kruhu, dostali obvod kruhu [1]. Zprvu užívali hodnoty experimentálně změřené. Až ve starověku přišel Archimédes ze Syrakus s prvním algoritmem, pomocí něhož lze nalézt hodnotu konstanty s libovolnou přesností.

Vzhledem k tomu, že ve středověku nebyl téměř žádný zájem o tuto oblast matematiky, další přínosy pocházejí až z novověku [1][12]. Velký posun kupředu byl objev nekonečného součtu a součinu a řetězových zlomků. Následkem toho vzniklo bezpočet algoritmů, nicméně většina měla pomalou konvergenci<sup>1</sup>.

Zdokonalování a vymýšlení nových algoritmů bylo podmíněno mírou poznatků matematiky, hlavně z oblasti teorie čísel a rovnic. Asi nejceněnější příspěvek z konce raného novověku je objev integrálního počtu sirem Isaacem Newtonem. Do 18. století neměla konstanta jednotné označení, až Leonhard Euler začal používat námi již známé řecké písmeno  $\pi$ .

Další velký rozkvět zažilo  $\pi$  až s příchodem počítačů v polovině 20. století. Do té doby bylo  $\pi$  spočítáno jen na 808 desetinných míst. Během několika let bylo vytvořeno mnoho rekordů. Ze začátku to bylo několik desítek tisíc desetinných míst. V roce 2016 bylo ve Švýcarsku  $\pi$  spočítáno na 22,4 biliónů desetinných míst [2]. O 3 roky později v březnu společnost Google oznámila, že jejich zaměstnanec spočítal hodnotu konstanty na 31,4 biliónů desetinných míst [21].

V první části si ukážeme pomocí Lindenmannova důkazu, že  $\pi$  je iracionální, resp. transcendentní<sup>2</sup>. Tím si objasníme, proč se nikomu v historii nepovedlo a ani nepovede konečnou metodou vyjádřit celý desetinný rozvoj.

Od další části vše už bude poskládáno chronologicky. Ukážeme si, jakou hodnotu používaly jednotlivé starověké civilizace v Evropě a na Blízkém východě. Odvodíme si Archimédův algoritmus, první vedoucí k libovolné přesnosti výpočtu  $\pi$ . Ze středověku si představíme Leonarda Fibonacciho, který tento algoritmus studoval, a Mikuláše Kusánského, který přispěl světu novým algoritmem.

Čtvrtá kapitola se bude zabírat novověkem, kde si představíme Vièteův a Wallisův nekonečný součin, Snellova vylepšení Archimedova algoritmu. Jedním z témat budou i řetězové zlomky, hlavně Brounckerův řetězový zlomek. Dále bude následovat Gregoryho-Leibnizova, Newtonova, Sarpova řada. U Newtonovy řady si podrobně popíšeme odvození, protože je to první

---

<sup>1</sup>Konvergence je rychlost algoritmu. Vyjadřuje, jak moc se přiblížíme skutečné hodnotě s každou další iterací (provedeným krokem).

<sup>2</sup>Transcendentní iracionální čísla nelze vyjádřit zlomkem. Nemají totiž ukončený desetinný rozvoj a zároveň nemají žádnou stále se opakující část desetinného rozvoje. Od algebraických iracionálních čísel se liší tím, že nemůže být kořenem žádné algebraické rovnice s racionálními koeficienty.

řada, která byla odvozena pomocí integrálů. Leonharda Eulera si zmíníme nejen kvůli tomu, že dal světu symbol  $\pi$ , ale i on představil veřejnosti několik řad. Své zástupce zde budou také mít i geometrické algoritmy, např.: Descartův a Gregoryho algoritmus. Historii zakončí algoritmy hrající roli při výpočtech  $\pi$  na prvních počítačích.

V předposlední části bude simulace Monte Carlo<sup>3</sup> a s tím spojena Buffonova jehla, kterou si i experimentálně ověříme. V poslední část všechny algoritmy porovnáme pomocí mnou definované veličiny  $\mathfrak{N}$  [mem].

## 1.1 Důkaz transcendentnosti $\pi$

Historicky první důkaz přinesl roku 1761 Johann Heinrich Lambert. Ten potvrdil, že  $\pi$  je iracionální, ale nevyvrátil, že  $\pi$  je algebraické. V roce 1794 Adrien-Marie Legendre dokázal, že  $\pi^2$  je iracionální, a byl přesvědčen, že to není algebraické iracionální číslo, ale že to půjde těžce dokázat. Až Carl Louis Ferdinand von Lindemann v roce 1882 přišel s důkazem, že  $\pi$  je transcendentní iracionální číslo.

Lindemannův důkaz vychází z Eulerovy identity:

$$e^{i\pi} + e^0 = 0.$$

Jestliže exponenty 0 a  $i\pi$  jsou různá čísla, tak musí být navzájem lineárně nezávislá<sup>4</sup>. Podle Lindemannova–Weierstrassova teorému musí být i čísla  $e^{i\pi}$  a  $e^0$  algebraicky nezávislá. Z toho také vyplývá, že alespoň 1 exponent číslo transcendentní. Již na první pohled je jasné, že 0 není transcendentní, protože může být kořenem algebraické rovnice ( $x = 0$ ). V tom případě musí být  $i\pi$  transcendentní. Aby ze součinu čísel vyšlo transcendentní číslo, musí alespoň jeden činitel být také transcendentní číslo. A když lze zapsat, že:

$$i = \sqrt{-1} \Rightarrow i^2 = -1 \Rightarrow i^2 + 1 = 0,$$

musí nutně být  $\pi$  transcendentní [1].

## 2 HISTORICKÝ VÝVOJ ODHADU $\pi$

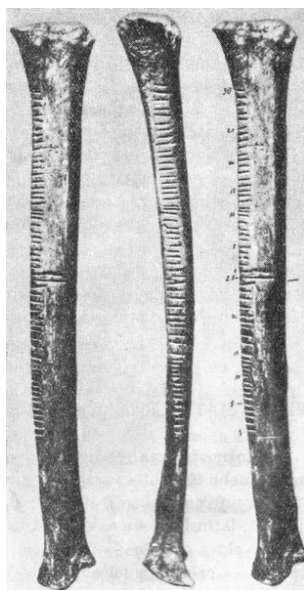
### 2.1 Starověk

Již před 1 000 000 let si člověk začal uvědomovat tvary, velikosti (čísla) a vztahy mezi veličinami, např.: větší kámen je těžší, starší strom je větší. Někdy v době kamenné lidé začali počítat, o čemž svědčí řezy na kostech (obr. 1). V této době člověk začal vnímat monotónní funkce<sup>5</sup>, např.: dvakrát větší pole znamená dvakrát víc úrody. Jenže to u kruhu, jednoho z nepřírodnějších tvarů, neplatilo. Věděli jen, že čím větší průměr, tím větší obvod. Až někdy kolem roku 2000 př. n. l. přišli na to, že, aby tato úměra platila pro výpočet, musí průměr vynásobit konstantou, a tak začaly vznikat první aproximace  $\pi$  [1].

<sup>3</sup>Monte Carlo je libovolná numerická simulace využívající náhodnost. V tomto případě půjde o zjištění poměru obsahu ploch.

<sup>4</sup>Dvě čísla jsou lineárně závislá právě tehdy, když jedno jde vyjádřit jako součin druhého čísla s libovolným reálným nenulovým číslem.

<sup>5</sup> $f(x) : y = x$



Obrázek 1: Zářezy na kostech [3]

### 2.1.1 První numerické aproximace

**Blízký východ** Mezi prvními oblastmi, kde se doloženě rozvíjela matematika, bylo území Blízkého východu. Hlavně u velkých řek, jako je Euphrat a Tigris, se začaly vyvíjet první civilizace. Již od 3. tisíciletí př. n. l. se začínají objevovat první písemné prameny včetně matematiky.

V roce 1936 byla nalezena přibližně 320 km od Babylonu ve městě Susa hliněná destička, která tvrdí, že podíl obvodu pravidelného šestiúhelníku a obvodu kruhu o stejném průměru je [1]:

$$\frac{57}{60} + \frac{36}{60^2} = \frac{96}{100}$$

Pokud víme, že obvod pravidelného šestiúhelníku  $o_s$  je šestinásobek poloměru  $r$  a že obvod kruhu  $o_k$  je poloměr krát dvojnásobek  $\pi$ , můžeme si vyjádřit hodnotu  $\pi$ .

$$\frac{o_s}{o_k} = \frac{96}{100} \Rightarrow \frac{6r}{2\pi r} = \frac{96}{100} \Rightarrow \frac{3}{\pi} = \frac{96}{100} \Rightarrow \pi = 3\frac{1}{8} \quad (1)$$

Z této destičky je jasné, že v Babylonii používali za hodnotu  $\pi$  3,125.

Na většině území zpravidla používali hodnotu 3 [3]. Na to poukazují památky Židů, například "První kniha královská" praví o Šalomounově paláci (kapitola 7, verš 23): "Udělal také moře slité, desíti loket od jednoho kraje k druhému, okrouhlé vûkol, a pět loket byla vysokost jeho, a okolek jeho třicíti loket vûkol." [4] nebo i samotných Babyloňanů. Na tabulce YBC 7302 ve tvaru kruhu jsou napsána čísla 3, 9 a 45, z nich jde usuzovat, že obvod je dán 3, 9 je druhá mocnina obvodu a 45 je její obsah. Tyto hodnoty se dají použít ve vzorci:

$$S = \frac{1}{12}o^2, \quad (2)$$

kde  $S$  je obsah a  $o$  je obvod [5]. Pokud si vzorec 2 rozepíšeme, dostaneme, že  $\pi$  je v této aproximaci 3.

$$S = \frac{1}{12}o^2 \Rightarrow \pi r^2 = \frac{1}{12}4\pi^2 r^2 \Rightarrow 1 = \frac{1}{3}\pi \Rightarrow \pi = 3$$





Obrázek 2: Tabulka YBC 7302 [5]

**Egypt** Matematika v Egyptě musela existovat již v 3. tisíciletí př. n. l., protože v přibližně té době probíhaly stavby pyramid a kanálů, na které byly potřeba pokročilé znalosti matematiky [3].

Roku 1858 poblíž Nilu byl nalezen Rhindův papyrus, který obsahuje návod na výpočet obsahu kruhu. V příkladu R50 se tvrdí, že obsah trojúhelníka  $S$  je roven  $\frac{64}{81}$  vynásobenému druhou mocninou průměru  $d$  [1].

$$S = \frac{64}{81}d^2 \quad (3)$$

Když si vztah upravíme, dostaneme hodnotu  $\pi$ .

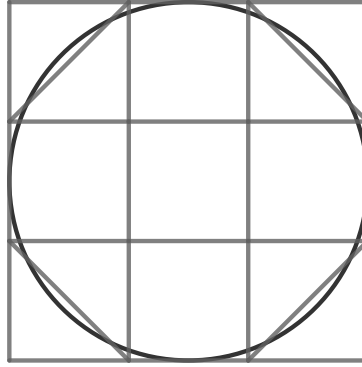
$$S = \frac{64}{81}d^2 \Rightarrow \frac{1}{4}\pi d^2 = \frac{64}{81}d^2 \Rightarrow \pi = 3\frac{13}{81}$$

Pomocí našeho vzorce pro obsah kruhu je jasné, že pro Egyptany byla hodnota  $\pi$  3,16. Jak ke vzorci 3 došli, zůstává záhadou, ale mnoho historiků matematiky se přiklání, že na násobek  $\frac{64}{81}$  přišli pomocí čtvercové sítě, kterou používali při projektování staveb. Když na čtvercové síti složené z 9 čtverců jako na obrázku 3 aproximujeme kruh osmiúhelníkem, dostaneme, že obsah kruhu je  $\frac{7}{9}$  druhé mocniny průměru kruhu. Protože  $\frac{64}{81}$  je snadno zapisovatelné pomocí kamenných zlomků, které se v té době hojně používaly, je možné, že  $\frac{63}{81}$  nahradili  $\frac{64}{81}$  [5].

**Řecko** Na úplném vrcholu byla starověká matematika v Řecku a to hlavně díky velkému množství vědců z celé řady oborů. Do dnešní doby se v matematice používá mnoho jejich poznatků, např.: Archimédovy geometrické řady, Pythagorova věta, Euklidovy věty a Archimédův algoritmus na výpočet  $\pi$ , který je rozebrán v kapitole 2.2.2.

**Řím** Klaudios Ptolemaios, vědec žijící v Alexandrii 85-165 n. l. [12], ve své 1. knize „Almagest“ sestavil tabulku tětiv (sinů). Funkci sinus značí jako  $\text{chrd } \alpha$ . K určení základních hodnot užívá do té doby již známých znalostí z matematiky. Pro získání malých úhlů odvodil vzorec pro  $\text{chrd}$  polovičního úhlu:

$$\text{chrd}^2 \frac{\alpha}{2} = \frac{1 - \text{chrd}(180^\circ - \alpha)}{2},$$



Obrázek 3: Sít' pro aproximaci kruhu

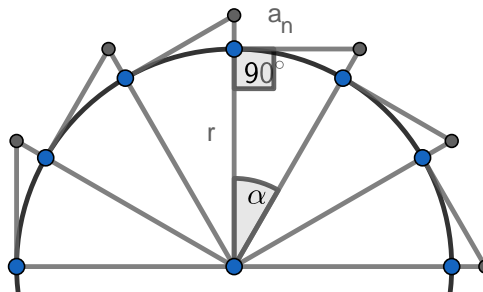
který lze zapsat dnešním zápisem jako:

$$\sin^2 \frac{\alpha}{2} = \frac{1 - \cos \alpha}{2}.$$

Po úpravě vzorcem  $\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$ , který znal i Ptolemaios, lze dostat algoritmus pro poloviční úhel:

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{1 - \sin^2 \alpha}}{2}}. \quad (4)$$

Když se dostal až na  $1^\circ$  využil novou goniometrickou funkci aproximaci obvodu kruhu  $o$ , kterou lze vidět na obrázku 4. Tato aproximace by šla zapsat dnešním moderním zápisem takto<sup>6</sup>:



Obrázek 4: Ptolemaiova aproximace kruhu

$$o = \lim_{n \rightarrow \infty} nr \sin \left( \frac{360^\circ}{n} \right),$$

když to vložíme do vzorce pro  $\pi$ :

$$\pi = \frac{o}{2r},$$

dostaneme, že:

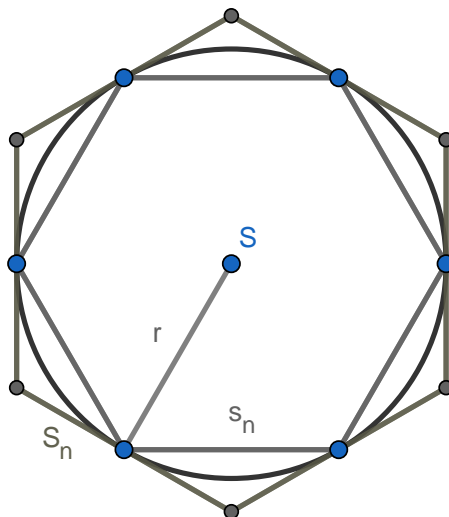
$$\pi = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n \sin \left( \frac{360^\circ}{n} \right)}{2}. \quad (5)$$

Ptolemaios pro  $\alpha = 1^\circ$  ( $n = 360$ ) dostal hodnotu  $\pi$  3,14166. Důvod, proč nedostal hodnotu 3,14143, je, že během svého výpočtu chrd  $1^\circ$  pomocí vzorce 4 zaokrouhloval [3].

<sup>6</sup>Funkce  $\sin \alpha$  je sice definovaná jako protilehlá odvěsna ku přeponě, ale pro malou protilehlou odvěsnu  $a_n$  můžeme přeponu brát přeponu za stejně dlouhou jako přilehlou odvěsnu  $r$  (obrázek 4).

## 2.1.2 Archimédův algoritmus

Archimédes (287-212 př. n. l.[3]) použil k výpočtu  $\pi$  úvahu, že obvod vepsaného pravidelného  $n$ -úhelníku  $o_n$  je menší než obvod kruhu  $o_k$  a že obvod opsaného pravidelného  $n$ -úhelníku  $O_n$  je větší než obvod kruhu:



Obrázek 5: Kruh s opsaným a vepsaným  $n$ -úhelníkem

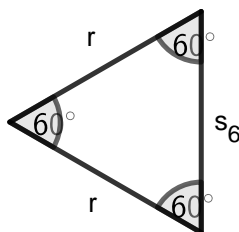
$$o_n < o_k < O_n$$

$$ns_n < 2\pi r < nS_n$$

$$\frac{ns_n}{2r} < \pi < \frac{nS_n}{2r}, \quad (6)$$

kde  $n$  je počet vrcholů/stran,  $r$  je poloměr kružnice,  $s_n$  je délka strany vepsaného  $n$ -úhelníku a  $S_n$  je délka strany opsaného  $n$ -úhelníku [1]. Princip tohoto algoritmu je ten, že čím více bude mít  $n$ -úhelník vrcholů, tím více bude opisovat kruh a tím bude menší příslušný interval.

Archimédes začal výpočet na snadno spočitatelném šestiúhelníku, kde délka strany vepsaného šestiúhelníka je poloměr kružnice<sup>7</sup>, pro jednoduchost výpočtu zavedeme jednotkový poloměr ( $r = 1$ ).

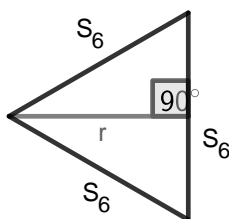


Obrázek 6: Jeden trojúhelník z vepsaného šestiúhelníka

$$s_6 = r \Rightarrow s_6 = 1$$

<sup>7</sup>Pravidelný šestiúhelník se skládá z šesti rovnostranných trojúhelníků. To znali již Babyloňané[1].

Délka stany opsaného šestiúhelníka jde vypočítat pomocí Pythagorovy věty.

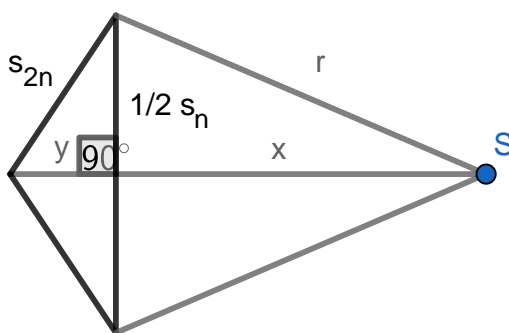


Obrázek 7: Jeden trojúhelník z opsaného šestiúhelníka

$$S_6^2 = r^2 + \left(\frac{S_6}{2}\right)^2 \Rightarrow 4S_6^2 = 4r^2 + S_6^2 \Rightarrow S_6^2 = \frac{4}{3}r^2 \Rightarrow S_6 = \frac{2\sqrt{3}}{3}r$$

$$\Rightarrow S_6 = \frac{2\sqrt{3}}{3}r$$

Když se hodnoty  $s_6$  a  $S_6$  vloží do vztahu 4, vyjde, že  $3 < \pi < 2\sqrt{3}$ . Archimédes u této hodnoty nevydržel, a tak počítal dál, ale protože pro víceúhelníky není výpočet tak jednoduchý<sup>8</sup>, odvodil si vztah pro  $2n$ -úhelníky.



Obrázek 8: 1 trojúhelník z vepsaného šestiúhelníka a 2 trojúhelníky z vepsaného dvanáctiúhelníka

Z obrázku 8 můžeme sestavit soustavu 3 rovnic, ze kterých se dá vyjádřit  $s_{2n}$ :

1. Protože se jedná o mnohoúhelník vepsaný, vrcholy budou ležet vždy n kružnici ve vzdálenosti  $r$  od středu  $S$ .

$$r = x + y$$

2. Pro pravý trojúhelník z obrázku 8 podle Pythagorovy věty platí, že:

$$r^2 = x^2 + \left(\frac{1}{2}s_n\right)^2 = x^2 + \frac{1}{4}s_n^2.$$

3. Pro levý trojúhelník z obrázku 8 podle Pythagorovy věty platí, že:

$$s_{2n}^2 = y^2 + \left(\frac{1}{2}s_n\right)^2 = y^2 + \frac{1}{4}s_n^2.$$

<sup>8</sup>Za Archiméda nebyly známé goniometrické funkce. První, kdo určil jejich hodnoty, byl Ptolemaios. [3]

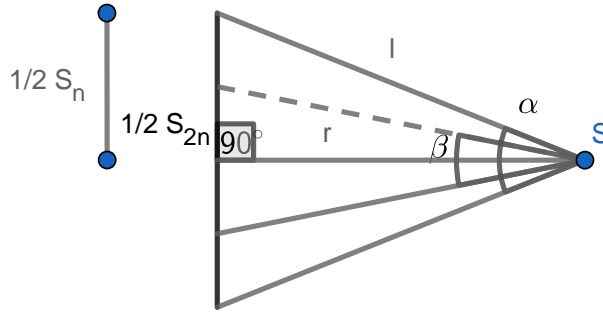
Celá soustava se dá upravit a dá se z ní vyjádřit  $s_{2n}$ . (Jednotlivé rovnice soustavy rovnic jsou zapsány ve sloupcích pod sebou a jednotlivé kroky úprav jsou vždy mezi sloupci doprava.)

$$\begin{array}{lll}
 x + y = r & x + y = 1 & y = 1 - x \\
 x^2 + \frac{s_n^2}{4} = r^2 & x^2 + \frac{s_n^2}{4} = 1 & x = \sqrt{1 - \frac{s_n^2}{4}} \\
 y^2 + \frac{s_n^2}{4} = s_{2n}^2 & y^2 + \frac{s_n^2}{4} = s_{2n}^2 & y^2 + \frac{s_n^2}{4} = s_{2n}^2
 \end{array}$$

$$(1-x)^2 + \frac{s_n^2}{4} = s_{2n}^2 \Rightarrow 1 - 2x + x^2 + \frac{s_n^2}{4} = s_{2n}^2 \Rightarrow 1 - 2\sqrt{1 - \frac{s_n^2}{4}} + 1 - \frac{s_n^2}{4} + \frac{s_n^2}{4} = s_{2n}^2$$

$$\Rightarrow s_{2n}^2 = 2 - 2\sqrt{1 - \frac{s_n^2}{4}} \Rightarrow s_{2n} = \sqrt{2 - \sqrt{4 - s_n^2}} \quad (7)$$

Z obrázku 9 je patrné, že když se zpoloviční úhel  $\alpha$  na úhel  $\beta$  (zdvojnásobení počtu vrcholů),



Obrázek 9: 1 trojúhelník z opsaného šestiúhelníka a 1 trojúhelník z opsaného dvanáctiúhelníka

musí platit:

$$\frac{\frac{1}{2}S_{2n}}{\frac{1}{2}(S_n - S_{2n})} = \frac{r}{l},$$

protože v libovolném trojúhelníku je poměr libovolných dvou stran svírající úhel  $\varphi$  stejný jako poměr úseček ve zbývajících straně rozdělené osou úhlu  $\varphi$ . Pomocí Pythagorovy věty lze spočítat stranu  $l$ .

$$l = \sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{2}S_n\right)^2} = \sqrt{1 + \frac{1}{4}S_n^2}$$

Nyní stačí dosadit a vyjádřit  $S_{2n}$ [6].

$$\begin{aligned}
 \frac{\frac{1}{2}S_{2n}}{\frac{1}{2}(S_n - S_{2n})} &= \frac{r}{\sqrt{r^2 + \frac{1}{4}S_n^2}} \Rightarrow \frac{S_{2n}}{S_n - S_{2n}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{4}S_n^2}} \\
 \Rightarrow \frac{S_{2n}}{S_{2n}(\frac{S_n}{S_{2n}} - 1)} &= \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{4}S_n^2}} \Rightarrow \frac{S_n}{S_{2n}} - 1 = \sqrt{1 + \frac{1}{4}S_n^2} \\
 \Rightarrow S_{2n} &= \frac{S_n}{1 + \sqrt{1 + \frac{1}{4}S_n^2}} \Rightarrow S_{2n} = \frac{2S_n}{2 + \sqrt{4 + S_n^2}} \quad (8)
 \end{aligned}$$

Tímto postupem došel až k 96-úhelníku a vypočítal, že  $3\frac{10}{71} < \pi < \frac{1}{7}$ , neboli  $3.1408 < \pi < 3.1429$ . Ve výpočtu musel odmocňovat, např:  $\sqrt{3} \approx \frac{265}{153}$ , ale dodnes se neví, jak to udělal.

Je možné, že Archimédes šel později ještě dál, protože v roce 1896 v Istanbulu byla nalezena Metrika z roku 60 př. n. l. od Herona z Alexandrie (10-70 n. l. [7]), kde se Heron odvolává na Archiméda s tím, že  $3.1416 < \pi < 3.1738$ . Chyba v horním intervalu vznikla asi opisem originálu. [1]

## 2.2 Středověk

Vzhledem k tomu, že během středověku probíhal souboj vědy a náboženství a starověké poznatky stačily, došlo v řadě vědeckých disciplín, včetně matematiky, k útlumu. Jedni z mála, kteří se v této době zabývali  $\pi$ , byl Leonardo Fibonacci a Mikuláš Kusánský. [1] [12]

### 2.2.1 Leonard Fibonacci

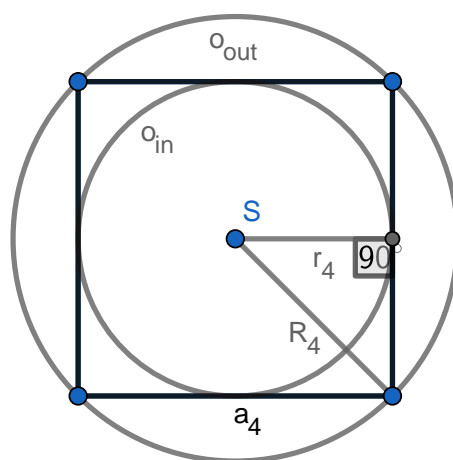
Leonardo z Pizy/Fibonacci (1180-1250) použil ke svému výpočtu  $\pi$  Archimédovu metodu. Pomocí decimální aritmetiky, která ještě za Archiméda nebyla známá, došel u 96-úhelníku k nerovnosti  $\frac{1440}{458\frac{4}{9}} < \pi < \frac{1440}{458\frac{1}{5}}$ . Když se z mezních hodnot udělá průměr:

$$\frac{\frac{4}{9} + \frac{1}{5}}{2} = \frac{29}{90} \doteq \frac{1}{3},$$

vyjde Fibonacciho hodnota  $\pi \frac{864}{275} \approx 3,141818$ . [1] [10]

### 2.2.2 Mikuláš Kusánský

Mikuláš Kusánský (1401-1464) byl německý filosof, teolog, diplomat, matematik a kardinál v Římě. Objevil novou, tzv. „sendvičovou“ metodu pro výpočet  $\pi$ . Vzal si pravidelný  $n$ -úhelník s obvodem 2, který byl vepsán a opsán kružnicemi (obr. 10), a zdvojnásobováním úhlů v mnohoúhelník o stejném obvodu zpřesňoval krajní intervaly výpočtů  $\pi$ .



Obrázek 10: Kusánského algoritmus

Začal na čtverci o straně  $a_4$ , která se rovnala  $\frac{1}{2}$ . Poloměr vepsané kružnice  $r_n$  je polovina strany

čtverce, tj.  $\frac{1}{4}$ . Poloměr opsané kružnice  $R_n$  lze spočítat pomocí Pythagorovy věty.

$$R_4 = \sqrt{r_4^2 + \left(\frac{a_4}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{1}{16} + \frac{1}{16}} = \frac{\sqrt{2}}{4}$$

Když znal poloměr vepsané a opsané kružnice, začal iterovat pomocí jeho nalezených vzorců pro obvody kružnic v  $2n$ -úhelníku.

$$r_{2n} = \frac{R_n + r_n}{2} \quad (9)$$

$$R_{2n} = \sqrt{R_n r_{2n}} \quad (10)$$

Jak již bylo zmíněno, obvod opsané  $o_{in}$  a vepsané  $o_{out}$  kružnice tvoří meze intervalu, ve kterém se nachází obvod  $n$ -úhelníka  $o$ . Interval lze rozepsat do dvou nerovností.

$$\begin{aligned} o_{in} < o &\Rightarrow 2\pi r_n < o \Rightarrow \pi < \frac{2}{2r_n} \Rightarrow \pi < \frac{1}{r_n} \\ o < o_{out} &\Rightarrow o < 2\pi R_n \Rightarrow \frac{2}{2R_n} < \pi \Rightarrow \frac{1}{R_n} < \pi \end{aligned}$$

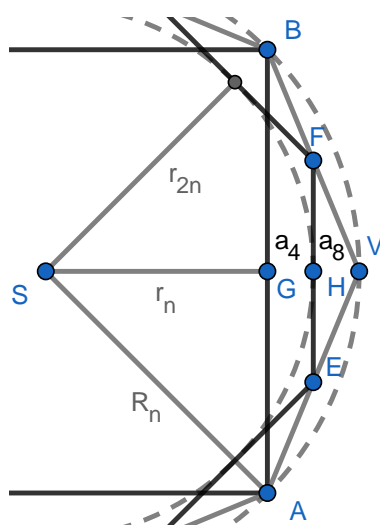
Z předchozích dvou nerovností lze udělat jednu nerovnost.

$$\frac{1}{R_n} < \pi < \frac{1}{r_n} \quad (11)$$

Kdyby nezvolil obvod  $n$ -úhelníku 2 ale libovolný jiný  $o$ , dostal by nerovnost pro výpočet  $\pi$ :

$$\frac{o}{2R_n} < \pi < \frac{o}{2r_n}$$

Kusánský přišel ke vzorci 9 tak, že sestrojil konstrukci, v které je čtyř- a osmiúhelník o stejném obvodu (obr. 11), takže platí, že:



Obrázek 11: Výpočet poloměru vepsané kružnice osmiúhelníka

$$|AB| = 2|EF| \Rightarrow a_4 = 2a_8.$$

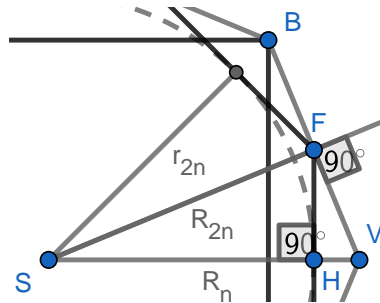
Z tohoto tvrzení, pak vyplývá, že bod  $H$ , který je od středu  $S$  vzdálen jako poloměr vepsané kružnice  $2n$ -úhelníku<sup>9</sup>, je přesně uprostřed mezi  $G$  a  $V$ , což jde si ověřit tak, že vezmeme pravoúhlý trojúhelník  $GVH$ , který bude mít úhel  $\alpha$  při vrcholu  $V$ , a pomocí funkce tangens zapíšeme rovnici:

$$\begin{aligned} \tan\left(\frac{|BG|}{|GV|}\right) &= \tan\left(\frac{|FH|}{|HV|}\right) \Rightarrow \frac{|BG|}{|GV|} = \frac{|FH|}{|HV|} \Rightarrow \frac{\frac{1}{2}a_4}{|GV|} = \frac{\frac{1}{2}a_8}{|HV|} \\ &\Rightarrow \frac{2}{|GV|} = \frac{1}{|HV|} \Rightarrow |GV| = 2|HV|. \end{aligned}$$

Tedy stačí délky poloměrů zprůměrovat.

$$|SH| = \frac{|SG| + |SV|}{2} \Rightarrow r_{2n} = \frac{R_n + r_n}{2}$$

Vzorec 10 vychází z Euklidovy věty o odvěsně (obr. 12) [9], kde:



Obrázek 12: Výpočet poloměru opsané kružnice osmiúhelníka

$$|SF|^2 = |SV||SH| \Rightarrow |SF| = \sqrt{|SV||SH|} \Rightarrow R_{2n} = \sqrt{R_n r_{2n}}.$$

Kusánský se ještě před objevením tohoto algoritmu zabýval geometrickým přiblížením k obvodu kruhu. Vymyslel hned několik přiblížení. Pravděpodobně nejpresnější se nachází v knize „Dialogus de circuli quadratura“ z roku 1457, která je na obrázku 13. V konstrukci na obrázku hledá přiblížení obvodu  $o_k$  kružnice  $k$  se středem v bodě  $S$  a poloměrem  $r$ . Kružnice protínají kolmé přímky v bodech  $A, B, C$  a  $D$  se společným bodem  $S$ . Dále narýsoval kružnici  $l$  s poloměrem  $R$ , který se rovná:

$$R = \frac{r + |AB|}{2} = \frac{r + \sqrt{r^2 + r^2}}{2} = \frac{r + \sqrt{2}r}{2} = \frac{r(1 + \sqrt{2})}{2}$$

Na kružnici  $l$  umístil bod  $K$  tak, aby platilo, že úhel  $BSK$  je  $60^\circ$ . Nakonec vepsal do kružnice  $l$  rovnostranný trojúhelník  $IJK$  se stranou  $a$ . Strana  $a$  se rovná:

$$\sin 60^\circ = \frac{\frac{a}{2}}{R} \Rightarrow \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{a}{2R} \Rightarrow a = \frac{2R\sqrt{3}}{2} \Rightarrow a = \frac{r(\sqrt{3} + \sqrt{6})}{2}$$

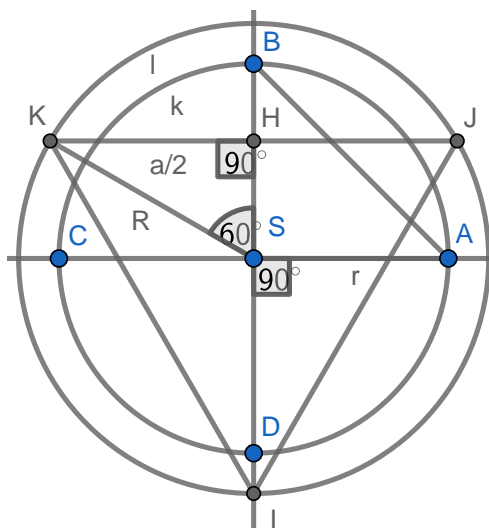
Když oba obvody porovnáme, zjistíme přibližnou hodnotu  $\pi$  [13].

$$o_k = o_{\triangle IJK} \Rightarrow 2\pi r = 3a \Rightarrow 2\pi r = \frac{3r(\sqrt{3} + \sqrt{6})}{2} \Rightarrow \pi = \frac{3(\sqrt{3} + \sqrt{6})}{4}$$

$$\pi \approx 3,136$$

<sup>9</sup>v tomto případě osmiúhelníku





Obrázek 13: Výpočet poloměru vepsané kružnice osmiúhelníka

## 2.3 Novověk

Konec 15. století a začátek 16. století byl ve znamení zámořských cest. Z tohoto důvodu byl požadavek na přesnější měřicí přístroje, což mělo za následek rozvoj přírodních věd včetně matematiky. [1]

### 2.3.1 François Viète

François Viète (1540–1603) jako první vymyslel algoritmus na výpočet  $\pi$  založený na nekonečném součinu (vzorec 12).

$$\frac{2}{\pi} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{\sqrt{2+\sqrt{2}}}{2} \cdot \frac{\sqrt{2+\sqrt{2+\sqrt{2}}}}{2} \cdot \dots \quad (12)$$

Vydal ho v knize „Variorum de rebus mathematicis responsorum, liber VIII“ v roce 1593 [1]. Tento lze snadno odvodit pomocí goniometrických funkcí.

Pomocí vzorce:

$$\sin 2\alpha = 2 \sin \alpha \cos \alpha$$

můžeme libovolně mnohokrát rozložit sinus.

$$\begin{aligned} \sin x &= 2 \sin \frac{x}{2} \cos \frac{x}{2} = 2 \left( 2 \sin \frac{x}{2 \cdot 2} \cos \frac{x}{2 \cdot 2} \right) \cos \frac{x}{2} = \\ &= 2^3 \sin \frac{x}{2^3} \cos \frac{x}{2^3} \cos \frac{x}{2^2} \cos \frac{x}{2} \end{aligned}$$

Již ve 3. rozkladu je vidět obecný vzorec pro rozklad.

$$\sin x = 2^n \sin \frac{x}{2^n} \prod_{i=1}^n \cos \frac{x}{2^i} \Rightarrow \prod_{i=1}^n \cos \frac{x}{2^i} = \frac{\sin x}{2^n \sin \frac{x}{2^n}}$$

Pravou stranu nově vzniklé rovnice rozšíříme o  $\frac{x}{x}$ .

$$\prod_{i=1}^n \cos \frac{x}{2^i} = \frac{\sin x}{x} \cdot \frac{\frac{x}{2^n}}{\sin \frac{x}{2^n}} \quad (13)$$

Další úpravy budou za podmínky, že  $n$  se bude limitně blížit nekonečnu. A protože

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{x}{2^n}}{\sin \frac{x}{2^n}} = 1,$$

$$\frac{\sin x}{x} = \lim_{n \rightarrow \infty} \prod_{i=1}^n \cos \frac{x}{2^i}. \quad (14)$$

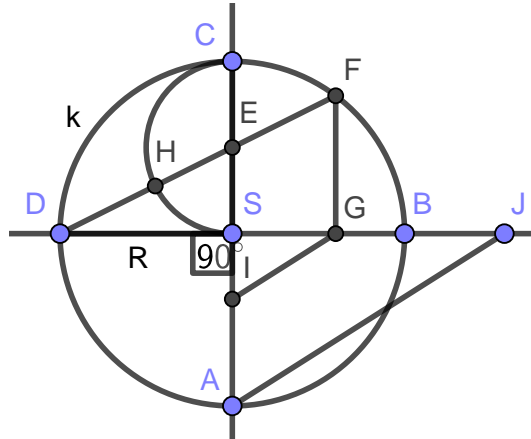
Když za  $x$  dosadíme  $\frac{\pi}{2}$ , vyjde nám:

$$\frac{2}{\pi} = \sqrt{\frac{1}{2}} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{\frac{1}{2}}} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{\frac{1}{2}}}} \cdot \dots, \quad (15)$$

což lze upravit na rovnici 12. Z té samé rovnice lze vyjádřit i samotné  $\pi$ .

$$\pi = 2 \cdot \frac{2}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2}{\sqrt{2 + \sqrt{2}}} \cdot \frac{2}{\sqrt{2 + \sqrt{2 + \sqrt{2}}}} \cdot \dots$$

François Viète během svého života spočítal  $\pi$  na 9 desetinných míst, ale použil k tomu Archimédův algoritmus [11].



Obrázek 14: Viètova geometrická aprogrimace

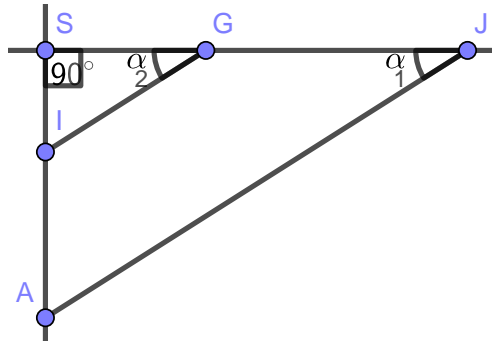
Kromě tohoto algoritmu publikoval v tomtéž díle také geometrickou aproximaci  $\pi$  (obrázek 14). Na obrázku je kružnice  $o_k$  se středem  $S$  a poloměrem  $R$  neboli  $SA$ , úsečka  $AI$ , která je stejně dlouhá jako úsečka  $DH$  a dvě rovnoběžné přímky:  $IG$  a  $AJ$ . Obvod kružnice  $o_k$  je přibližně  $4SJ$ . Pomocí zmíněné aproximací můžeme dopočítat přibližnou hodnotu  $\pi$ .

Protože podle věty uuu je trojúhelník  $SIG$  podobný trojúhelníku  $SAJ$ , můžeme napsat, že

$$\frac{|SI|}{|SA|} = \frac{|SG|}{|SJ|} \Rightarrow |SJ| = \frac{|SA| \cdot |SG|}{|SI|}$$

To lze dokázat pomocí obrázku 15, kde platí:

$$|SI| = |SG| \tan \alpha$$



Obrázek 15: Pravoúhlý trojúhelník SIG a SAJ

$$|SA| = |SJ| \tan \alpha$$

První rovnici můžeme vydělit tou druhou a dostaneme:

$$\frac{|SI|}{|SA|} = \frac{|SG|}{|SJ|}$$

$\pi$  se dá pak vyjádřit:

$$\pi = \frac{o_k}{2R} = \frac{4|SJ|}{2R} = \frac{2 \frac{|SA| \cdot |SG|}{|SI|}}{R} = \frac{2 \frac{R \cdot |SG|}{|SI|}}{R} = 2 \frac{|SG|}{|SI|}$$

K výpočtu  $SI$  použijeme délku úsečky  $DE$  z trojúhelníku  $DSE$ . Podle Pythagorovy věty

$$|DE|^2 = |DS|^2 + |SE|^2 = R^2 + \left(\frac{1}{2}R\right)^2 = R^2 + \frac{1}{4}R^2 = \frac{5}{4}R^2 \Rightarrow |DE| = \frac{\sqrt{5}}{2}R$$

Dále potřebujeme délku úsečky  $DH$ .

$$|DH| = |DE| - |HE| = \frac{\sqrt{5}}{2}R - \frac{1}{2}R = \left(\frac{\sqrt{5}}{2} - \frac{1}{2}\right)R$$

Nyní můžeme spočítat  $SI$ .

$$\begin{aligned} |SI| &= |SA| - |AI| = |SA| - |DH| = R - \left(\frac{\sqrt{5}}{2} - \frac{1}{2}\right)R = \left(\frac{1 - \sqrt{5}}{2} + \frac{1}{2}\right)R = \\ &= \left(\frac{3}{2} - \frac{\sqrt{5}}{2}\right)R = \frac{1}{2}(3 - \sqrt{5})R \end{aligned}$$

Podle věty uuu je trojúhelník  $DSE$  podobný s trojúhelníkem  $DGF$ , proto

$$\frac{|DG|}{|DS|} = \frac{|GF|}{|SE|} \Rightarrow \frac{|DG|}{|GF|} = \frac{|DS|}{|SE|} = \frac{R}{\frac{1}{2}R} = 2 \Rightarrow |DG| = 2|GF|$$

Úsečku  $DG$  můžeme rozdělit na dvě úsečky se společným bodem  $S$ .

$$|DG| = |DS| + |SG| \Rightarrow 2|GF| = R + |SG| \Rightarrow G = \frac{1}{2}(R + |SG|)$$

Podle Pythagorovy věty lze napsat, že

$$\begin{aligned}
 |SG|^2 + |GF|^2 &= |SF|^2 \Rightarrow |SG|^2 + \left(\frac{1}{2}(R + |SG|)\right)^2 = R^2 \\
 &\Rightarrow |SG|^2 + \frac{1}{4}(R^2 + 2R \cdot |SG| + |SG|^2) - R^2 = 0 \\
 \Rightarrow 4|SG|^2 + R^2 + 2R \cdot |SG| + |SG|^2 - 4R^2 &= 0 \Rightarrow 5|SG|^2 + 2R \cdot |SG| - 3R^2 = 0 \\
 \Rightarrow |SG| &= \frac{-2R \pm \sqrt{4R^2 + 60R^2}}{10} = \frac{-2R \pm 8R}{10} = \frac{-R \pm 4R}{5}
 \end{aligned}$$

Protože v tomto případě nemůže být délka záporná, použijeme znaménko +.

$$|SG| = \frac{-R + 4R}{5} = \frac{3}{5}R$$

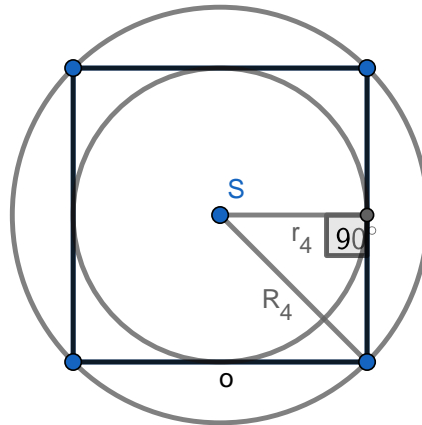
Nyní stačí dosadit do vzorce pro výpočet  $\pi$ .

$$\pi = 2 \frac{|SG|}{|SI|} = 2 \frac{\frac{3}{5}R}{\frac{1}{2}(3 - \sqrt{5})R} = \frac{12}{5(3 - \sqrt{5})} = \frac{9 + 3\sqrt{5}}{5} = \frac{3}{5}(3 + \sqrt{5})$$

Podle Vièteho geometrické aproximace přibližně vychází  $\pi$  3,14164. [14]

### 2.3.2 Descartesův algoritmus

René Descartes (1596-1650), francouzský matematik a filosof, dal světu kartézskou soustavu souřadnic a racionalistickou filosofii, která dala základ klasicismu, vymyslel nový algoritmus, který byl publikován až posmrtně v roce 1701. Spočíval v tom, že  $n$ -úhelník o poloměru  $o$  je obehnan vepsanou a opsanou kružnicí o poloměrech  $r_n$  a  $R_n$  (obrázek 16), a pomocí vzorců lze spočítat poloměry pro  $2n$ -úhelníky o stejném obvodu [11] [17].



Obrázek 16: Descartesův algoritmus

$$r_{2n} = \frac{r_n + R_n}{2} \quad (16)$$

$$R_{2n} = \sqrt{\frac{R_n(r_n + R_n)}{2}} \quad (17)$$

Když použijeme vzorec pro obvod kruhu

$$o = 2\pi r \quad \Rightarrow \quad \pi = \frac{o}{2r},$$

můžeme  $\pi$  vyjádřit nerovností:

$$\frac{o}{2R_n} < \pi < \frac{o}{2r_n} \quad (18)$$

### 2.3.3 Willebrord Snell

Roku 1654 Christiaan Huygens (1629-1695) použil nerovnici od Willebrorda Snella (1580-1626) z roku 1621 k výpočtu přibližné hodnoty  $\pi$ . Nerovnice vypadala takto:

$$\frac{3 \sin \varphi}{2 + \cos \varphi} < \varphi < \tan \frac{\varphi}{3} + 2 \sin \frac{\varphi}{3}, \quad (19)$$

a když do ní dosadil, že  $\varphi = \frac{\pi}{30}$ , dostal, že  $\pi$  je 3,141 592 653... Přesnost byla na 9 desetinných míst [11].

Snell v roce, kdy vydal předchozí nerovnost, vydal v knize „Cyclometria sive de circuli dimensione“ 2 nerovnice zvyšující účinnost Archimédovy metody. Zjistil totiž to, že v jakékoliv fázi iterování pro  $n \geq 3$  je  $\pi$  blíže spodní hranici intervalu  $q_n$  než spodní hranici intervalu  $p_n$  (obrázek 17).



Obrázek 17: Interval z Archimédovy metody

$$\pi - p_n < q_n - \pi$$

Pro jednotlivé  $n \geq 3$  pak mu vyšly 2 stálé nerovnosti.

$$\frac{q_n - \pi}{\pi - p_n} > 2, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{q_n - \pi}{\pi - p_n} = 2 \quad (20)$$

$$\frac{\pi - p_n}{\pi - p_{2n}} < 4, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\pi - p_n}{\pi - p_{2n}} = 4 \quad (21)$$

Když tyto nerovnosti upravíme:

$$\frac{q_n - \pi}{\pi - p_n} > 2 \quad \Rightarrow \quad q_n - \pi > 2\pi - 2p_n \quad \Rightarrow \quad -3\pi > -2p_n - q_n \quad \Rightarrow \quad \pi < \frac{2}{3}p_n + \frac{1}{3}q_n$$

$$\frac{\pi - p_n}{\pi - p_{2n}} < 4 \quad \Rightarrow \quad \pi - p_n < 4\pi - 4p_{2n} \quad \Rightarrow \quad -3\pi < -4p_{2n} + p_n \quad \Rightarrow \quad \pi > \frac{4}{3}p_{2n} - \frac{1}{3}p_n,$$

získáme nerovnice pro výrazné zúžení intervalu z Archimédova algoritmu.

Snell sice tyto nerovnosti objevil, ale dokázal je až Huygens v „De circuli magnitude inventa“ v roce 1654 [15].

### 2.3.4 Wallisův nekonečný součin

John Wallis (1616 – 1703 [11]) v roce 1655 v knize „Arithmetica Infinitorum“ vydává po Viètem 2. nekonečný součin a zároveň historicky 1. algoritmus pro výpočet  $\pi$  obsahující pouze racionální operace [1].

$$\frac{\pi}{2} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 6 \cdot \dots}{1 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 7 \cdot \dots} \quad (22)$$

Ten lze přepsat do moderní obecnější podoby pro  $\pi$ .

$$\pi = \lim_{n \rightarrow \infty} 2 \prod_{i=1}^n \left( \frac{2i}{2i-1} \cdot \frac{2i}{2i+1} \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} 2 \prod_{i=1}^n \frac{4i^2}{4i^2-1} \quad (23)$$

### 2.3.5 Gregoryho algoritmus

James Gregory (1638-1675) představil v roce 1667 veřejnosti nový algoritmu založený na kružnici o poloměru  $r$  opsané a vepsané  $n$ -úhelníkem (obrázek 5). Algoritmus počítá obsah vepsaného  $s$  a opsaného  $S$   $2n$ -úhelníka pomocí vzorců [11]:

$$s_{2n} = \sqrt{s_n S_n} \quad (24)$$

$$S_{2n} = \frac{2s_n S_n}{s_n + s_{2n}}. \quad (25)$$

Když upravíme vzorec pro výpočet obsahu kruhu, dostaneme:

$$S = \pi r^2 \quad \Rightarrow \quad \pi = \frac{S}{r^2},$$

proto můžeme napsat, že obsah vepsaného  $s$  a opsaného  $S$   $2n$ -úhelníka pomocí vzorců [11]:

$$\frac{s_n}{r^2} < \pi < \frac{S_n}{r^2}. \quad (26)$$

### 2.3.6 Brounckerův řetězový zlomek

William Brouncker (1620-1684) objevil nový řetězový zlomek na výpočet  $\pi$ .

$$\frac{4}{\pi} = 1 + \frac{1^2}{2 + \frac{3^2}{2 + \frac{5^2}{2 + \dots}}} \quad (27)$$

Neznáme jeho odvození, ale dochvalo se nám odvození od Leonharda Eulera z roku 1775. Jednotlivé členy Gregoryho-Leibnizovy řady rozložil:

$$\frac{\pi}{4} = 1 + 1 \left( -\frac{1}{3} \right) + 1 \left( -\frac{1}{3} \right) \left( -\frac{1}{5} \right) + 1 \left( -\frac{1}{3} \right) \left( -\frac{3}{5} \right) \left( -\frac{5}{7} \right) + \dots$$

a pomocí vzorce:

$$a_1 + a_1 a_2 + a_1 a_2 a_3 + \dots = \frac{a_1}{1 - \frac{a_2 a_3}{1 + a_2 - \frac{a_3}{1 + a_3 - \dots}}}$$

přepsal na [1]:

$$\frac{\pi}{4} = \frac{1}{1 - \frac{\frac{1}{3}}{1 + (-\frac{1}{3}) - \frac{-\frac{3}{5}}{1 + (-\frac{3}{5}) - \dots}}} = \frac{1}{1 + \frac{\frac{1}{3^2}}{2 + \frac{3^2}{2 + \dots}}} \Rightarrow \frac{4}{\pi} = 1 + \frac{1}{2 + \frac{3^2}{2 + \dots}}$$

Můžeme místo poslední úpravy rovnici vynásobit 4 a dostat rovnici pro samotné  $\pi$ :

$$\pi = \frac{4}{1 + \frac{\frac{1^2}{3^2}}{2 + \frac{5^2}{2 + \dots}}} \quad (28)$$

### 2.3.7 Gregoryho-Leibnizova řada

Tato nekonečná řada byla objevena nezávisle dvěma matematiky: v roce 1671 James Gregory a v roce 1674 Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716).

$$\frac{\pi}{4} = 1 - \frac{1}{3} + \frac{1}{5} - \frac{1}{7} + \dots \quad (29)$$

Gregory pomocí Cavalieriho vzorce a dlouhého dělení v integrandu dosáhl Taylorova rozvoje pro funkci arkus tangens. Taylorův rozvoj lze dnešním zápisem zapsat takto:

$$f(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^n \frac{f^{(i)}(a)}{i!} (x-a)^i$$

Protože známe hodnotu arkus tangens v bodě 0 ( $\arctan(0) = 0$ ), můžeme tuto hodnotu dosadit za  $a$ :

$$\begin{aligned} \arctan(x) &= \frac{\arctan(a)}{1} (x-a)^0 + \frac{\frac{1}{a^2+1}}{1} (x-a)^1 + \frac{\frac{0(a^2+1)-1(2a+0)}{(a^2+1)^2}}{2} (x-a)^2 + \\ &\quad + \frac{\frac{-2(a^2+1)^2 - (-2a)2(a^2+1)2a}{(a^2+1)^4}}{6} (x-a)^3 + \dots \\ \Rightarrow \arctan(x) &= \arctan(a) + \frac{1}{a^2+1} (x-a) + \frac{-2a}{2(a^2+1)^2} (x-a)^2 + \\ &\quad + \frac{-2(a^2+1)^2 + 8a^2(a^2+1)}{6(a^2+1)^4} (x-a)^3 + \dots \\ \Rightarrow \arctan(x) &= \arctan(0) + \frac{1}{0^2+1} (x-0) + \frac{-2 \cdot 0}{2(0^2+1)^2} (x-0)^2 + \\ &\quad + \frac{-2(0^2+1)^2 + 8 \cdot 0^2(0^2+1)}{6(0^2+1)^4} (x-0)^3 + \dots \\ \Rightarrow \arctan(x) &= x + \frac{-2}{6} x^3 + \dots \Rightarrow \arctan(x) = x - \frac{x^3}{3} + \dots \end{aligned}$$

Kdybychom hned ze začátku pracovali s 8 členy namísto 4, řada by vypadala takto:

$$\arctan(x) = x - \frac{x^3}{3} + \frac{x^5}{5} - \frac{x^7}{7} + \dots$$

Nakonec Gregory dosadil  $x = 1$  a dostal řadu v rovnici 29. Po vynásobení 4 dostaneme řadu pro samotné  $\pi$ , která lze zapsat modernějším způsobem [11][1]:

$$\pi = \lim_{n \rightarrow \infty} 4 \sum_{i=0}^n \frac{(-1)^i}{2i+1} \quad (30)$$

### 2.3.8 Kochaňského geometrická aproximace

Roku 1685 Adam Adamandy Kochaňski (1631 Dobrzyniu n. Wisłą-1700 Teplice v Čechách [11][8]), polský matematik, který působil jako jezuita velkou část svého života v Čechách, vypočítal přibližnou hodnotu  $\pi$  pomocí své vlastní konstrukce, která je na obrázku 18, kde platí, že  $\vartheta = 30^\circ$  a úsečka  $CD$  je přibližně polovina obvodu kruhu o poloměru  $r$ .

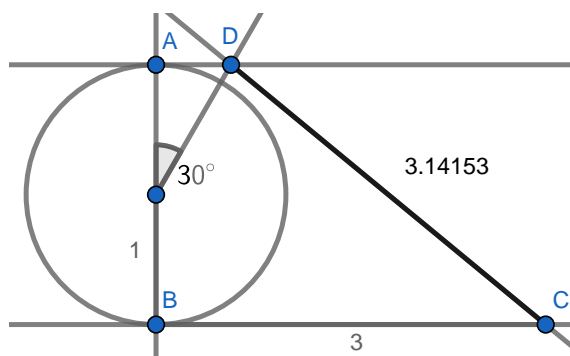
Úsečku  $CD$  lze spočítat pomocí Pythagorovi věty.

$$\begin{aligned} |CD| &= \sqrt{|AB|^2 + (|AD| - |BC|)^2} = \sqrt{(2r)^2 + (3r - r \operatorname{tg} 30^\circ)^2} = \sqrt{4r^2 + \left(3r - \frac{r}{\sqrt{3}}\right)^2} = \\ &= \sqrt{4r^2 + \frac{(3\sqrt{3} - 1)^2}{3}r^2} = r\sqrt{\frac{40 - 6\sqrt{3}}{3}} \end{aligned} \quad (31)$$

Nakonec úsečku stačí tāt do vzorce pro  $\pi$ .

$$\pi = \frac{2r\sqrt{\frac{40-6\sqrt{3}}{3}}}{2r} = \sqrt{\frac{40 - 6\sqrt{3}}{3}} \quad (32)$$

Ze vzorce 32 je jasné, že Kochanski došel k hodnotě  $\pi$  3,141533. [1]



Obrázek 18: Kochaňského konstrukce přibližné poloviny obvodu kruhu s daným poloměrem

### 2.3.9 Newtonovy řady

Sir Issac Newton (1642-1727 [11]), zakladatel integrálního a diferenciálního počtu, objevil hned několik řad. Nejznámější vychází z jím objeveného vzorce:

$$\arcsin x = \int \frac{dx}{\sqrt{1+x}},$$

který jde s použitím jeho objevu binomické věty upravit na:

$$\begin{aligned} \arcsin x &= \int \frac{dx}{\sqrt{1+x}} = \int \left(1 + \frac{1}{2}x^2 + \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}x^4 + \frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6}x^6 + \dots\right)dx = \\ &= x + \frac{1}{2} \frac{x^3}{3} + \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4} \frac{x^5}{5} + \frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6} \frac{x^7}{7} + \dots \end{aligned}$$



Po dosazení  $x = \frac{1}{2}$ , dostaneme vzorec pro výpočet  $\pi$  [1]:

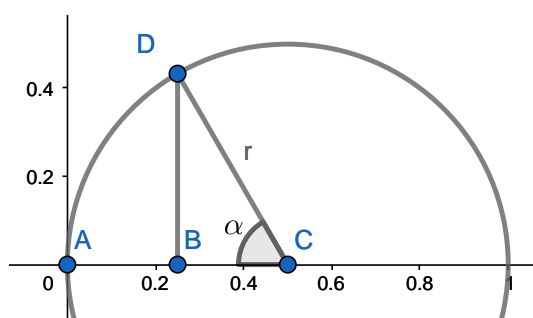
$$\arcsin \frac{1}{2} = \frac{\pi}{6} \Rightarrow \pi = 6 \arcsin \frac{1}{2}$$

$$\Rightarrow \pi = 6 \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{1}{3 \cdot 2^3} + \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4} \frac{1}{5 \cdot 2^5} + \frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6} \frac{1}{7 \cdot 2^7} + \dots \right), \quad (33)$$

který jde moderním způsobem zapsat jako [17]:

$$\pi = \lim_{n \rightarrow \infty} 6 \sum_{i=0}^n \frac{(2i)!}{2^{4i+1} (i!)^2 (2i+1)} \quad (34)$$

Další známou řadu publikoval 1737 v „Treatise on the Method of Fluxions and Infinite Series“.



Obrázek 19: Kružnice  $y = \sqrt{x - x^2}$  s výsečí

Vychází z rovnice kružnice:

$$y = \sqrt{x - x^2},$$

kterou lze vidět na obrázku 19. Pomocí binomické věty vyřešil obsah  $a$  poloviční úseče  $ABD$ :

$$a = \int_0^{\frac{1}{4}} \sqrt{x - x^2} dx = \int_0^{\frac{1}{4}} \sqrt{x} \sqrt{1 - x} dx = \left[ \frac{2}{3} \sqrt{x^3} - \frac{1}{5} \sqrt{x^5} - \frac{1}{28} \sqrt{x^7} - \frac{1}{72} \sqrt{x^9} - \dots \right]_0^{\frac{1}{4}} =$$

$$= \frac{2}{3 \cdot 2^3} - \frac{1}{5 \cdot 2^5} - \frac{1}{28 \cdot 2^7} - \frac{1}{72 \cdot 2^9} - \dots \quad (35)$$

Plocha poloviční úseče je obsah  $S_v$  výseče  $ACD$  bez obsahu  $S_t$  trojúhelníku  $BCD$

$$a = S_v - S_t \quad (36)$$

Nejdříve spočítal úsečku  $|BD|$ :

$$|BD| = \sqrt{\left(\frac{1}{2}\right)^2 - \left(\frac{1}{4}\right)^2} = \sqrt{\frac{4-1}{16}} = \frac{\sqrt{3}}{4},$$

a pak úhel  $\alpha$ :

$$\alpha = \arctg \left( \frac{|BD|}{|BC|} \right) = \arctg \left( \frac{\frac{\sqrt{3}}{4}}{\frac{1}{4}} \right) = \arctg \sqrt{3} = 60^\circ.$$

Z úhlu  $\alpha$  je jasné, že  $a$  je  $\frac{1}{6}$  obsahu kruhu. S těmito znalosti lze spočítat vzorec 36.

$$a = S_v - S_t = \frac{\pi r^2}{6} - \frac{|BD| \cdot |BC|}{2} = \frac{\pi \frac{1}{4}}{6} - \frac{\frac{1}{4} \frac{\sqrt{3}}{4}}{2} = \frac{\pi}{24} - \frac{\sqrt{3}}{32} \Rightarrow \pi = 24 \left( \frac{\sqrt{3}}{32} + a \right) \quad (37)$$

Do vzorce 37 dosadil za  $a$  vzorec 35 [1].

$$\pi = \frac{3\sqrt{3}}{4} + 24 \left( \frac{1}{12} - \frac{1}{5 \cdot 2^5} - \frac{1}{28 \cdot 2^7} - \frac{1}{72 \cdot 2^9} - \dots \right) \quad (38)$$

Vzorec 38 lze zapsat moderním způsobem jako [17]:

$$\pi = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{3\sqrt{3}}{4} + 24 \sum_{i=0}^n \frac{(2i)!}{2^{4i+2}(i!)^2(2i-1)(2i+3)} \quad (39)$$

### 2.3.10 Sharpova řada

Abraham Sharp (1651-1742) zrychlil Gregoryho-Leibnizovu řadu tím, že do Teylorova rozvoje pro  $\arctg(x)$  dosadil za  $x$   $\frac{1}{\sqrt{3}}$  [1].

$$\begin{aligned} \arctan(x) &= x - \frac{x^3}{3} + \frac{x^5}{5} - \frac{x^7}{7} + \dots \Rightarrow \frac{\pi}{6} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left( 1 - \frac{1}{3^1 \cdot 3} + \frac{1}{3^2 \cdot 5} - \frac{1}{3^3 \cdot 7} + \dots \right) \\ \Rightarrow \pi &= 2\sqrt{3} \left( 1 - \frac{1}{3^1 \cdot 3} + \frac{1}{3^2 \cdot 5} - \frac{1}{3^3 \cdot 7} + \dots \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} 2\sqrt{3} \sum_{i=0}^n \frac{(-1)^i}{3^i(2i+1)} \end{aligned} \quad (40)$$

### 2.3.11 Leonhard Euler

Leonhard Euler (1707-1783) sjednotil matematický zápis a symboliku do dnešní podoby, např.:  $f(x)$ ,  $\int dx$ ,  $i$ ,  $e$ ,  $\sum$ . Od jeho doby se řeckým písmenem  $\pi$  označuje konstanta, o které je tato práce.

Dalším výsledkem jeho celoživotní práce je objev několika nekonečných řad vedoucích k  $\pi$ , z nichž je neznámější vyřešení v roce 1736 řady převrácených dvojmocí, kterou před tím se marně snažilo vyřešit celá desetiletí spousta matematiků, např. G. W. Leibniz nebo J. Bernaulli I. Použil k tomu řadu pro  $\sin x$  (Taylorův rozvoj), která byla známa už za Newtona.

$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \dots$$

Řadu řešil pro  $\sin x = 0$ , vydělil ji  $x$  ( $x \neq 0$ ) a následně substituoval  $y = x^2$ .

$$0 = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \dots \Rightarrow 0 = 1 - \frac{x^2}{3!} + \frac{x^4}{5!} - \frac{x^6}{7!} + \dots \Rightarrow 0 = 1 - \frac{y}{3!} + \frac{y^2}{5!} - \frac{y^3}{7!} + \dots \quad (41)$$

Jestliže rovnice 41 měla před úpravou dělením kořeny:  $x = n\pi$ ,  $n \in \mathbb{Z}$ , tak po substituci má kořeny:  $y = (n\pi)^2$ ,  $n \in \mathbb{N}$ . Pomocí teorie rovnic vymyslel úpravu rovnice, dnes známou jako

Viětovy vztahy, která zní: součet převrácených hodnot kořenů  $(\frac{1}{(n\pi)^2}, n \in \mathbb{N})$  je roven záporně vzatému podílu lineárního a absolutního členu  $(\frac{1}{3!})$  [1].

$$\frac{1}{3!} = \frac{1}{\pi^2} + \frac{1}{(2\pi)^2} + \frac{1}{(3\pi)^2} + \dots \Rightarrow \frac{\pi^2}{6} = \frac{1}{1^2} + \frac{1}{2^2} + \frac{1}{3^2} + \dots \quad (42)$$

Vzorec 42 lze přepsat pro samotné  $\pi$

$$\pi = \sqrt{6} \sqrt{\frac{1}{1^2} + \frac{1}{2^2} + \frac{1}{3^2} + \dots} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{6 \sum_{i=1}^n \frac{1}{i^2}} \quad (43)$$

Stejným způsobem odvodil řadu pomocí funkce  $\cos x$ .

$$\cos x = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \frac{x^6}{6!} + \dots \Rightarrow 0 = 1 - \frac{y}{2!} + \frac{y^2}{4!} - \frac{y^3}{6!} + \dots$$

$$\Rightarrow \frac{1}{2!} = \frac{1}{(0,5\pi)^2} + \frac{1}{(1,5\pi)^2} + \frac{1}{(2,5\pi)^2} + \dots \Rightarrow \frac{\pi^2}{8} = \frac{1}{1^2} + \frac{1}{3^2} + \frac{1}{5^2} + \dots \quad (44)$$

Odečtením rovnice 42 od dvojnásobku 44 dostal další řadu:

$$\frac{2\pi^2}{8} - \frac{\pi^2}{6} = \frac{2}{1^2} - \frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} + \frac{2}{3^2} - \frac{1}{3^2} - \dots \Rightarrow \frac{\pi^2}{12} = \frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} + \frac{1}{3^2} - \dots \quad (45)$$

Z rovnic 44 a 45 jde vyjádřit  $\pi$ .

$$\pi = \lim_{n \rightarrow \infty} 2 \sqrt{2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{(2i-1)^2}} \quad (46)$$

$$\pi = \lim_{n \rightarrow \infty} 2 \sqrt{3 \sum_{i=1}^n \frac{(-1)^{i+1}}{i^2}} \quad (47)$$

### 2.3.12 Legendreho algoritmus

Adrien Legendry (1752-1833) v roce 1794 publikoval dílo „Éléments de géométrie“ podobným algoritmem jako M. Kusánský jen s rozdílem, že kromě poloměru opsané a vepsané kružnice  $R$  a  $r$  k  $2n$ -úhelníku počítá ještě koeficient  $s$ .

$$R_{n+1} = \frac{r_n + R_n}{2} \quad (48)$$

$$r_{n+1} = \sqrt{r_n R_n} \quad (49)$$

$$s_{n+1} = s_n - 2^n (R_n - R_{n+1})^2 \quad (50)$$

Za počáteční hodnoty zvolíme  $R_0 = 1$ ,  $r_0 = \frac{\sqrt{2}}{2}$  a  $s_0 = \frac{1}{4}$ .

Nyní stačí pro výpočet  $\pi$  použít následující vzorec [11][16]:

$$\frac{R_{2n}^2}{s_n} < \pi < \frac{R_n^2}{s_n}. \quad (51)$$

## 2.4 Moderní algoritmy s využití počítačů

V září roku 1949 v Laboratořích balistického výzkumu v Pensylvánii byl zřejmě proveden historicky první výpočet hodnoty  $\pi$ . Počítač ENIAC spočítal pomocí Machinova vzorce

$$\pi = 16 \operatorname{arctg} \frac{1}{5} - 4 \operatorname{arctg} \frac{1}{239} \quad (52)$$

za 70 hodin  $\pi$  s přesností na 2037 desetinných míst. Tento rekord byl několikrát překonán. Poprvé 1954/1955 v Dahlgrenu ve Virginii, kdy počítač NORC spočítal za 13 minut  $\pi$  na 3089 platných míst.

Pro změnu jiný vzorec byl použit v březnu 1957 v Počítačovém centru v Londýně. Za 53 hodin zvládl počítač Pegasus výpočet  $\pi$  s užitím Strassenitzkého vzorce

$$\pi = \operatorname{arctg} \frac{1}{2} + \operatorname{arctg} \frac{1}{5} + \operatorname{arctg} \frac{1}{8} \quad (53)$$

na 10 021 desetinných míst. Bohužel od 7480. místa byla chyba, protože vzorec v počítači nebyl identický. Na jaře dalšího roku byl výpočet zopakován správně.

Na kombinaci Machinava a Gregoryho vzorce

$$\pi = \lim_{n \rightarrow \infty} 16 \sum_{i=0}^n \frac{(-1)^i}{(2i+1) \cdot 5^{2i+1}} - 4 \sum_{i=0}^n \frac{(-1)^i}{(2i+1) \cdot 239^{2i+1}} \quad (54)$$

vsadili v červenci 1960 v Data Processing Centre v Paříži a z počítače IBM704 získali prvních 10 000 desetinných míst za 1 hodinu 40 minut.

Poslední vzorec zde popsany bude Strömerův:

$$\pi = 24 \operatorname{arctg} \frac{1}{8} + 8 \operatorname{arctg} \frac{1}{57} + 4 \operatorname{arctg} \frac{1}{239} \quad (55)$$

Byl použit v červenci 1961 na počítači IBM 7090 v IBM Processing Centre v New Yorku a za 8 hodin a 43 minu měli  $\pi$  na 100 265 platných míst. Ten samý vzorec spolu s Shanksonovo-Wrenchovou metodou byl základem výpočtu  $\pi$  na 500 000 desetinných míst v KPAE v Paříži počítačem CDC6600 v únoru 1967. [1][20]

## 3 METODA MONTE CARLO

Monte Carlo, zkráceně MC, je metoda numerického výpočtu pomocí generování náhodné veličiny<sup>10</sup>. Použití našla hlavně s rozvoje výpočetní techniky, protože do té doby jsme nemohli generovat pseudonáhodná čísla jinak než ručními výpočty, což mělo za následek nedostatek hodnot pro seriózní výsledek za rozumný čas. Pro generování jde sice použít i fyzikální experiment, např. hod kostkou, ale i ten není čistě náhodný, protože je ovlivněn, jak házíme. V dnešní době metoda nachází hlavní užití pro fyzikální simulace pravděpodobnostních jevu, např. v kvantové fyzice, nebo k výpočtu poměru obsahů. [1][19]

<sup>10</sup>Náhodná veličina je veličina s přiřazenou náhodnou hodnotou. Protože většinou je získávána pomocí algoritmu, nikoliv dílem náhody, označuje se jako pseudonáhodná.

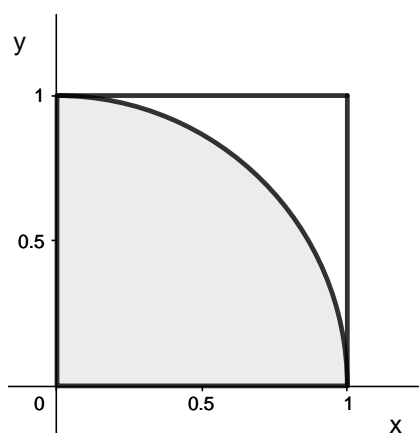
### 3.1 Obsah kruhu

Pomocí MC sice přímo nemůžeme spočítat určitý integrál, ale můžeme si vyjádřit obsah plochy pod křivkou z daného poměru. Pokud budu znát obsah výseče, která zaujímá čtvrtinu kruhu (obrázek 20), mohu si  $\pi$  spočítat.

Principem této metody je, že budeme generovat pseudonáhodné body na určité ploše o obsahu  $S_1$  a budeme zjišťovat, jestli bod leží pod křivkou na ploše o obsahu  $S_2$ . Poměr počtu všech bodů na pod křivkou  $m$  s celkovým počtem bodů  $n$  je pro velké  $n$  rovný poměru obsahu  $S_1$  s  $S_2$ .

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{n}{m}, \quad n \rightarrow \infty \quad (56)$$

Protože s rovnicí kruhu budeme zacházet jako s funkcí



Obrázek 20: Integrace  $\frac{1}{4}$  kruhu  $y^2 = 1 - x^2$

$$y(x) = \sqrt{1 - x^2},$$

budeme pracovat s částí nad osou  $x$ , přesněji v 1. kvadrantu. Plocha, ve které budeme generovat body, má tvar čtverce o straně  $a$  rovné 1, protože kruh o rovnici  $y^2 = 1 - x^2$  má poloměr  $r$  rovný 1, proto generované body mají tvar  $X_i[x_i, y_i]$ , kde  $x_i$  a  $y_i$  jsou pseudonáhodná čísla od 0 do 1. Body, jestli leží ve výseči, prověříme pomocí funkce:

$$y_i \leq y(x_i) \quad \Rightarrow \quad y_i \leq \sqrt{1 - x_i^2}$$

Po vygenerování velkého množství bodů dostaneme čísla  $n$  a  $m$ , ze kterých si vyjádříme  $\pi$ .

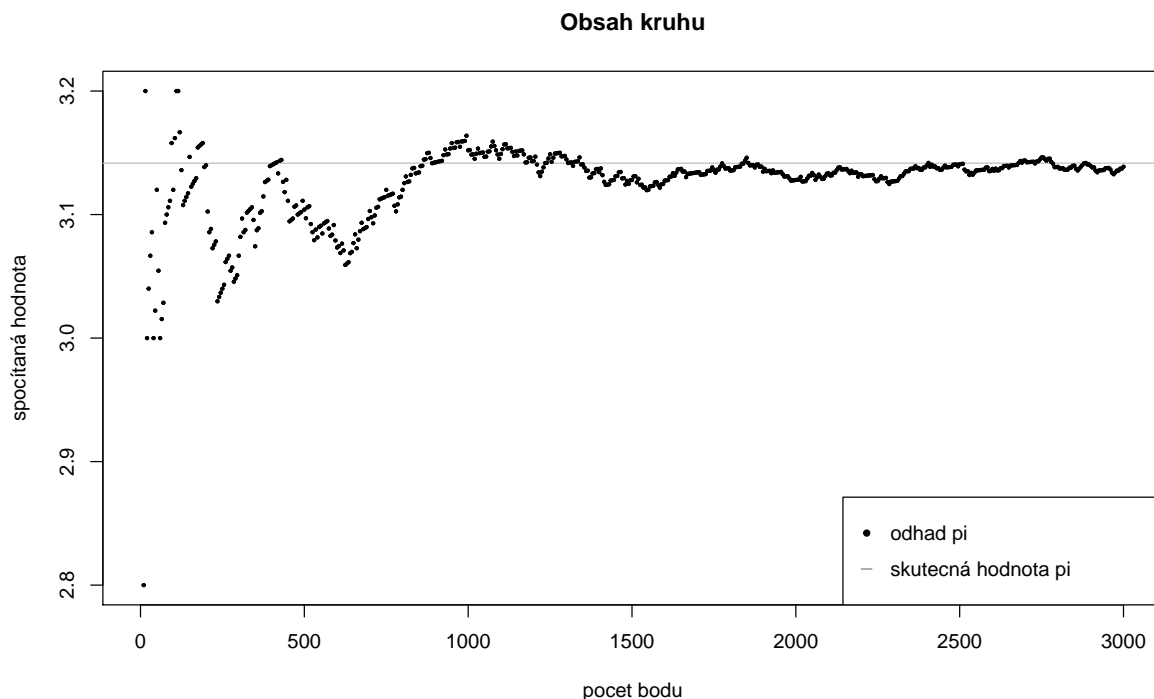
$$\frac{n}{m} = \frac{S_2}{S_1} = \frac{\frac{1}{4}\pi r^2}{a^2} = \frac{\pi}{4} \quad \Rightarrow \quad \pi = \frac{4n}{m} \quad (57)$$

Na obrázku 21 je výstup z počítače, který počítal  $\pi$  pomocí výše popsaného algoritmu.

### 3.2 Buffonova jehla

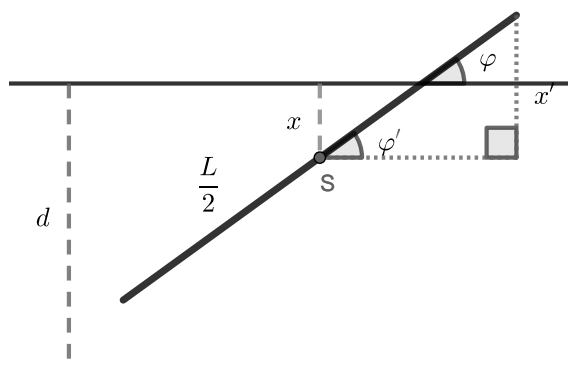
Georges Louis Leclerc, kníže de Buffon, známý svým šokujícím sdělením o stáří světa<sup>11</sup>, navrhl experiment vedoucí k hodnotě  $\pi$  pomocí pravděpodobnosti. Experiment, ilustrovaný na obrázku

<sup>11</sup>Svým tvrzením, že svět je starý 75000 let, šokoval vzdělance té doby. V 18. století se stále věřilo, že svět není starší více jak 6000 let.



Obrázek 21: Výpočet obsahu kruhu metodou Monte Carlo

22, spočívá v házení jehel o délce  $L$  se středem v bodě  $S$  na rovnou plochu rozdělenou rovnoběžnými přímkami ve vzdálenosti  $d$ , která nepřekračuje délku samotné jehly. Pravděpodobnost



Obrázek 22: Buffonův experiment s jehlou

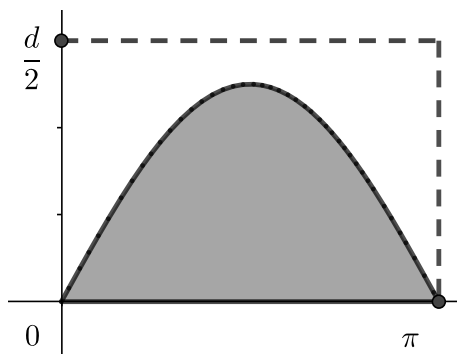
$P$ , že špejle protne přímkou, lze vyjádřit vztahem:

$$P = \frac{2L}{d\pi} \quad (58)$$

Vztah 54 jde odvodit pomocí jednoho integrálu. Jestliže  $S$  je vzdálen od přímkou vzdáleností  $x$ , platí, že, když je  $x$  menší než vzdálenost  $x'$  od  $S$  na ose kolmé k přímkám, jehla protne přímkou.

$$x < x' \Rightarrow x < \frac{1}{2}L \sin \varphi$$

Protože je stejně pravděpodobné, jakou jehla protne přímku, stačí spočítat pravděpodobnost protnutí jedné konkrétní přímky. Jestliže úhel náklonu jehly  $\varphi$  je v rozsahu od 0 do  $\pi$  (z obou stran je stejná) a  $x$  je v rozsahu od 0 do  $\frac{d}{2}$ , mohu všechny možnosti dopadu interpretovat grafem na obrázku 23. Plocha  $S_1$  pod křivkou, představující rovnici  $x = \frac{1}{2}L \sin \varphi$ , znázorňuje všechny



Obrázek 23: Graf protnutí přímky

případy protnutí přímky jehlou. Pravděpodobnost protnutí se dá spočítat z podílu  $S_1$  a plchy  $S_2$ , znázorňující všechny případy hodu:

$$P = \frac{S_1}{S_2} = \frac{\int_0^\pi \frac{1}{2}L \sin \varphi d\varphi}{\frac{1}{2}d\pi} = \frac{L \left[ -\cos \varphi \right]_0^\pi}{d\pi} = \frac{L(1+1)}{d\pi} = \frac{2L}{d\pi}$$

Ze vztahu 54 lze vyjádřit  $\pi$ . [1]

$$\pi = \frac{2L}{dP} \quad (59)$$

Buffonův experiment lze také nasimulovat na počítači, o čemž se dá přesvědčit na obrázku 24. V grafu je uvedena nejistota  $3\sigma^{12}$ , která byla vypočítaná podle vzorce na nejistotu pro  $\sigma$  [19]:

$$u = \frac{1}{\sqrt{n}},$$

kde  $n$  je počet hodů.

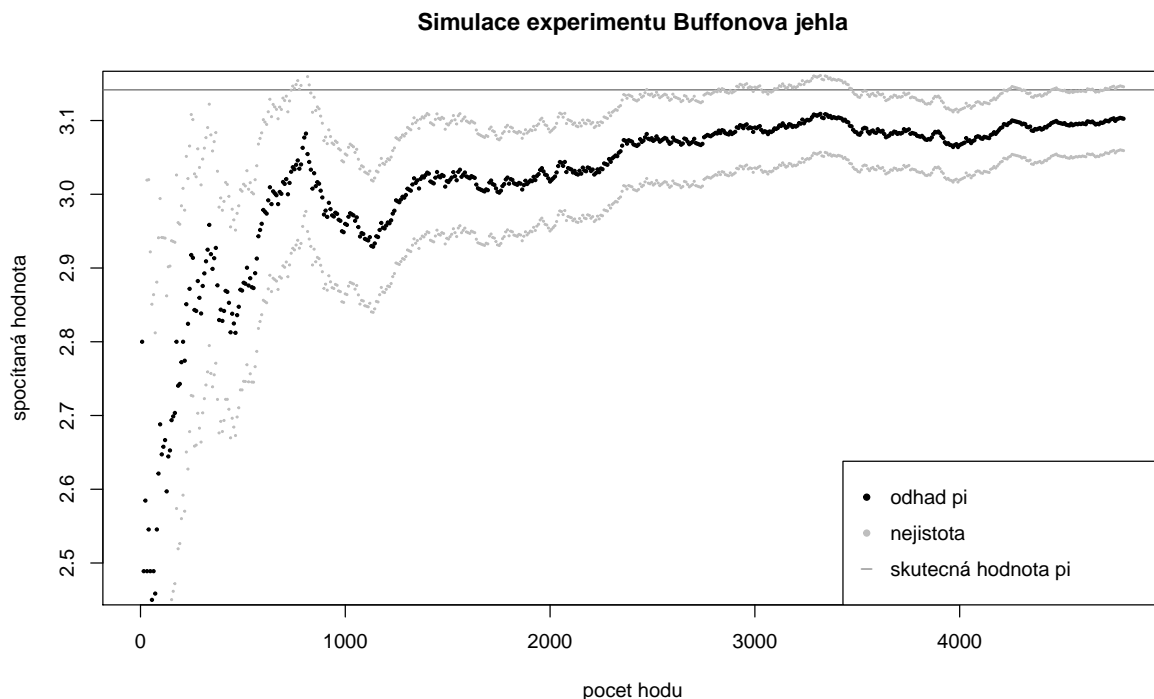
## 4 SROVNÁNÍ METOD

V této kapitole budeme srovnávat efektivitu algoritmů zmíněných v předchozích kapitolách podle mnou definované veličiny  $\mathfrak{N}$ . Protože  $\mathfrak{N}$  závisí na rychlosti konvergence algoritmu  $\beta(n)$ , která je nespojitá funkce závislá na počtu iterací  $n$ , kde  $n$  náleží přirozeným číslům, použijeme sumaci v intervalu všech iterací, a tím dostaneme hodnotu veličiny nezávislou na aktuální iteraci.

$$\mathfrak{N} = \lim_{a \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^a \beta(n)$$

Vzhledem k tomu, že chceme, aby platilo, čím nižší hodnota, tím lepší algoritmus, definujeme si rychlosti konvergence algoritmu pomocí exponenciální funkce 2 na součin difference počtu

<sup>12</sup>Nejistota na  $3\sigma$  znamená, že pravděpodobnost, že skutečná hodnota leží v intervalu ohraničeném nejistotou, je 99,7%,



Obrázek 24: Simulace experimentu Buffonova jehla

operací  $\Delta O_n$ <sup>13</sup> od které je odečteno číslo 1:

$$\beta(n) = 2^{\Delta O_n p_n} - 1 = 2^{(O_{n+1} - O_n)p_n} - 1$$

Důvod použití čísla 2 v definici je, že  $2^x$  lze považovat za elementární funkci stejně jako  $e^x$  jen s rozdílem, že je jednodušší výpočet funkční hodnoty. Za předpokladu, že algoritmus konverguje k hledané přibližné hodnotě konstanty, bude exponent 2 konvergovat k nule, a proto je ve vzorci -1, jinak by přírůstek po určitém počtu iterací se neblížil 0 a  $\mathfrak{N}$  by nemělo limitu, která by nebyla v nekonečnu.

$$\mathfrak{N} = \lim_{a \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^a 2^{(O_{n+1} - O_n)p_n} - 1 \quad (60)$$

**Míra konvergence** Míru konvergence  $p_n$  si zavedeme jako matematikou veličinu vyjadřující vzdálenost odhadu čísla  $x_n$  v  $n$ -té iteraci od nějaké hodnoty čísla  $x$ , kterou považujeme za skutečnou hodnotu limity dané posloupnosti, v tomto případě  $\pi$ .

$$p_n = |x_n - x|, \quad x = \lim_{n \rightarrow \infty} x_n$$

Uvedený vzorec je použit v tabulce 1, 2 a 3 na všech dosud představených algoritmech pro prvních 10 iterací. V příloze A „Míra konvergence“ jsou tabulky rozšířeny na 30 iterací.

Hodnoty jednotlivých algoritmu jsou ještě prezentovány v grafech na obrázcích 25 a 26. Větší měřítko těchto grafů se nachází v příloze A.

<sup>13</sup>V této práci  $O(n)$  neznamena složitost algoritmu, ale počet operací provedených od počátku výpočtu až do  $n$ -té iterace a míry konvergence  $p_n$  v dané iteraci



číslo iterace	Archimedes		Descartes		Kusánský		Gregory	
	spodní	horní	spodní	horní	spodní	horní	spodní	horní
1	3.13e-1	8.58e-1	3.13e-1	8.58e-1	3.13e-1	8.58e-1	1.14e+0	8.58e-1
2	8.01e-2	1.72e-1	8.01e-2	1.72e-1	8.01e-2	1.72e-1	3.13e-1	1.72e-1
3	2.01e-2	4.10e-2	2.01e-2	4.10e-2	2.01e-2	4.10e-2	8.01e-2	4.10e-2
4	5.04e-3	1.01e-2	5.04e-3	1.01e-2	5.04e-3	1.01e-2	2.01e-2	1.01e-2
5	1.26e-3	2.53e-3	1.26e-3	2.53e-3	1.26e-3	2.53e-3	5.04e-3	2.53e-3
6	3.15e-4	6.31e-4	3.15e-4	6.31e-4	3.15e-4	6.31e-4	1.26e-3	6.31e-4
7	7.89e-5	1.58e-4	7.89e-5	1.58e-4	7.89e-5	1.58e-4	3.15e-4	1.58e-4
8	1.97e-5	3.94e-5	1.97e-5	3.94e-5	1.97e-5	3.94e-5	7.89e-5	3.94e-5
9	4.93e-6	9.86e-6	4.93e-6	9.86e-6	4.93e-6	9.86e-6	1.97e-5	9.86e-6
10	1.23e-6	2.46e-6	1.23e-6	2.46e-6	1.23e-6	2.46e-6	4.93e-6	2.46e-6

Tabulka 1: Míra konvergence

č. iterace	Snell		Legendry		Ptolem.	Viete	Wallis	Brounck.
	spodní	horní	spodní	horní	spodní	horní	spodní	horní
1	2.45e-3	7.74e-2	2.27e-1	8.58e-1	3.13e-1	1.14e+0	4.75e-01	8.58e-01
2	1.55e-4	3.96e-3	1.01e-3	4.61e-2	8.01e-2	3.13e-1	2.97e-01	4.75e-01
3	9.72e-6	2.37e-4	7.38e-9	8.76e-5	2.01e-2	8.01e-2	2.16e-01	3.25e-01
4	6.08e-7	1.46e-5	4.98e-18	3.06e-10	5.04e-3	2.01e-2	1.69e-01	2.46e-01
5	3.80e-8	9.13e-7	4.80e-18	4.79e-18	1.26e-3	5.04e-3	1.39e-01	1.98e-01
6	2.37e-9	5.70e-8	4.80e-18	4.80e-18	3.15e-4	1.26e-3	1.18e-01	1.66e-01
7	1.48e-10	3.56e-9	4.80e-18	4.80e-18	7.89e-5	3.15e-4	1.03e-01	1.42e-01
8	9.28e-12	2.23e-10	4.80e-18	4.80e-18	1.97e-5	7.89e-5	9.10e-02	1.25e-01
9	5.80e-13	1.39e-11	4.80e-18	4.80e-18	4.93e-6	1.97e-5	8.16e-02	1.11e-01
10	3.65e-14	8.70e-13	4.80e-18	4.80e-18	1.23e-6	4.93e-6	7.39e-02	9.98e-02

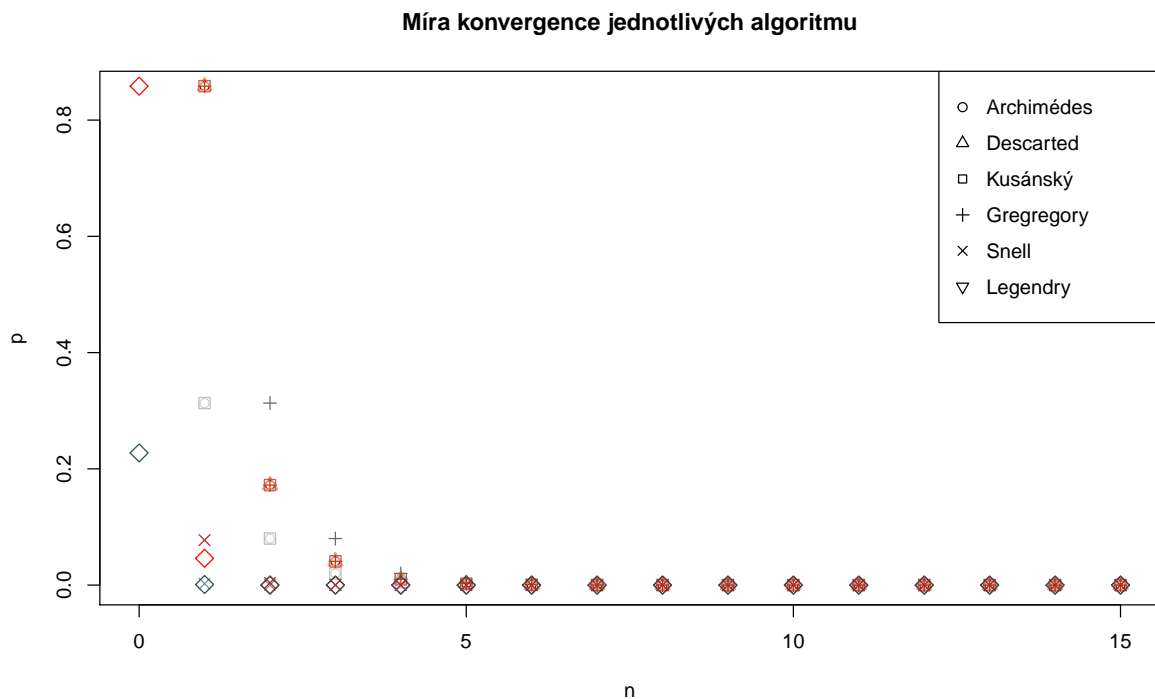
Tabulka 2: Míra konvergence 2

č. iterace	Leibniz	Newton	Sharp	Euler	Euler 2	Euler 3
1	8.58e-01	1.42e-1	3.23e-1	6.92e-01	3.13e-01	3.23e-01
2	4.75e-01	1.66e-2	6.24e-2	4.03e-01	1.60e-01	1.42e-01
3	3.25e-01	2.53e-3	1.46e-2	2.84e-01	1.07e-01	7.30e-02
4	2.46e-01	4.38e-4	3.74e-3	2.19e-01	8.02e-02	4.59e-02
5	1.98e-01	8.15e-5	1.01e-3	1.78e-01	6.41e-02	3.07e-02
6	1.66e-01	1.59e-5	2.84e-4	1.50e-01	5.34e-02	2.23e-02
7	1.42e-01	3.23e-6	8.17e-5	1.30e-01	4.57e-02	1.67e-02
8	1.25e-01	6.71e-7	2.39e-5	1.14e-01	4.00e-02	1.31e-02
9	1.11e-01	1.42e-7	7.12e-6	1.02e-01	3.55e-02	1.05e-02
10	9.98e-02	3.07e-8	2.14e-6	9.22e-02	3.20e-02	8.62e-03

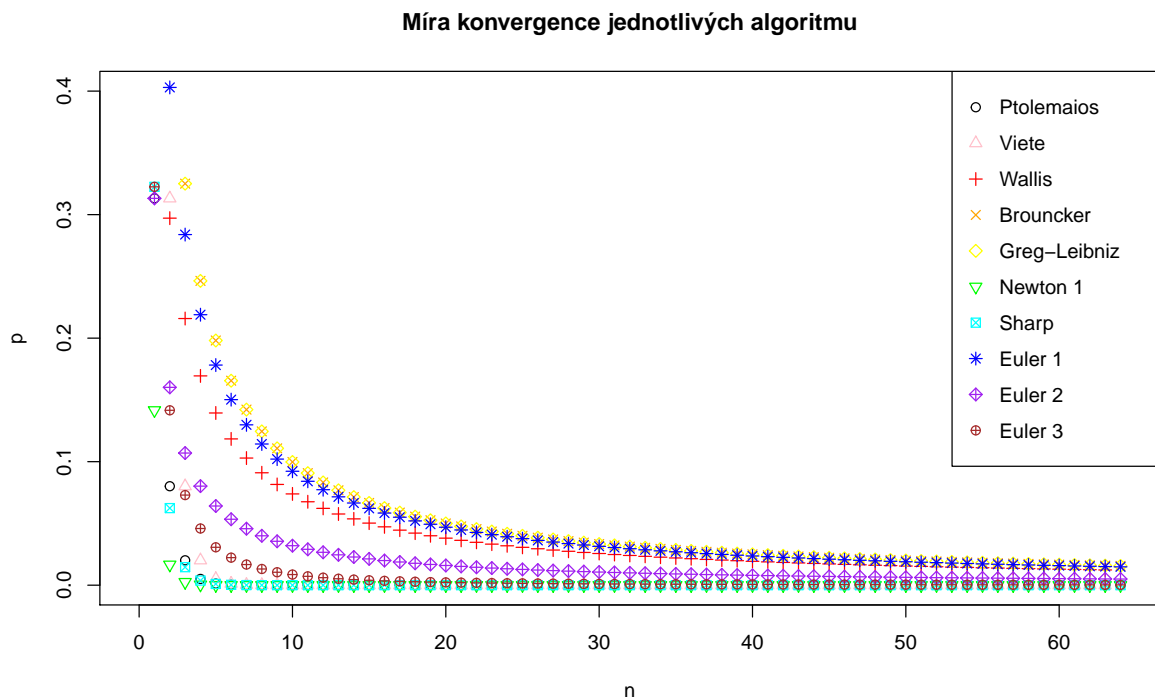
Tabulka 3: Míra konvergence 3

## 4.1 Závislost počtu operací

Počet operací  $O_n$  si zavedeme jako matematikou veličinu vyjadřující počet operací (sčítání, odčítání, násobení, dělení, umocňování a odmocňování) od počátku výpočtu až do  $n$ -té iterace.



Obrázek 25: Graf míry konvergence zde popsáných algoritmů s intervalovým výstupem (čern.-sh, červ.-hh)



Obrázek 26: Graf míry konvergence zbytku algoritmů popsáných v této práci

Faktoriál z  $x$ , pokud  $x$  nebude 0, budeme počítat za  $x$  operací, protože pro nenulové  $x$  platí, že:

$$x! = \prod_{i=1}^x i,$$

v opačném případě budeme  $x!$  ( $0!$ ) počítat za 1 operaci.

$n$	1	2	3
$O_{sh}(n)$	5+3	10+3	15+3
$O_{hh}(n)$	6+3	12+3	18+3

Tabulka 4: Počet operací - Archimédův algoritmus (podle vzorce 6, 9 a 10)

**Archimedes** Při každé iteraci, viz 4. tabulka, se musí vykonat 5 operací pro výpočet 1 strany vepsaného  $k$ -úhelníku a 6 operací pro výpočet 1 strany opsaného  $k$ -úhelníku. Pro výpočet spodní nebo horní hranice ( $sh$  a  $hh$ )  $\pi$  je potřeba provést ještě 3 operace. Výsledné vzorce pro počet operací Archimédova algoritmu jsou:

$$O_{sh}(n) = 5n + 3$$

$$O_{hh}(n) = 6n + 3$$

**Ptolemaios** Vzorec algoritmu:

$$x_{n+1} = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{1 - x_n}}{2}} \Rightarrow O(n) = 5n + a$$

$$\pi_n = \frac{2^{2+n}x_n}{2} = 2^{1+n}x_n \Rightarrow a = 3$$

Vzorec pro výpočet počtu operací v Ptolemaiově algoritmu:

$$O(n) = 5n + 3$$

**Kusánský** Vzorec algoritmu:

$$r_{n+1} = \frac{R_n + r_n}{2}$$

$$R_{n+1} = \sqrt{R_n r_{n+1}}$$

Protože  $r$  je závislý i na  $R$  a naopak, musíme počet operací v 1 iteraci pro  $r$  a  $R$  počítat z obou vzorců. Z  $r$  a  $R$  se na hranice intervalu pro  $\pi$  dostaneme 2 operacemi. Vzorec pro výpočet počtu

$n$	1	2	3
$O_{sh}(n)$	2+2	6+2	10+2
$O_{hh}(n)$	4+2	8+2	12+2

Tabulka 5: Počet operací - Kusánského algoritmus

operací v Kusánském algoritmu z tabulky č. 5:

$$O_{sh}(n) = 4(n - 1) + 2 + 2 = 4n$$

$$O_{hh}(n) = 4(n - 1) + 4 + 2 = 4n + 2$$

$n$	1	2	3	4
$O(n)$	1	4	9	16
zpět. difference	-	3	5	7

Tabulka 6: Počet operací - Vièteho algoritmus

**Viète** Jako 1 iteraci beru výpočet zlomku a jeho vynásobení s již vypočítaným odhadem  $\pi$  z předchozí iterace, pokud to není 1. iterace, kdy se ničím nenásobí. Ze 6. tabulky plyne, že složitost algoritmu tvoří posloupnost:

$$O(n) = n^2.$$

**Descartes** Použijeme stejný systém výpočtu počtu operací jako u Kusánského algoritmu. Vzorce pro složitost algoritmu z tabulky č. 7:

$n$	1	2	3
$O_{sh}(n)$	2+2	8+2	14+2
$O_{hh}(n)$	4+2	10+2	16+2

Tabulka 7: Počet operací - Descartův algoritmus (podle vzorce 20, 21 a 22)

$$O_{sh}(n) = 6(n - 1) + 2 + 2 = 6n - 2$$

$$O_{hh}(n) = 6(n - 1) + 4 + 2 = 6n$$

**Snell** Spodní hranice intervalu závisí na Archimédově spodní hranici odhadu  $\pi$  s využitím  $n$ -a  $2n$ -úhelníka ( $2 * (5 * 1 + 3) = 10 + 6$ ) a pro každou další iteraci stačí spočítat o jedničku vyšší mocninu  $2^i n$ -úhelníku ( $5(n - 1) + 16 = 5n + 11$ ). Samotná Snelliho nerovnost 21 pro výpočet  $\pi$  přidává 3 operace, a proto  $O_{sh} = 5n + 14$ . Horní hranice intervalu závisí na Archimédově spodní a horní hranici odhadu  $\pi$  s využitím  $n$ -úhelníka ( $5n + 3 + 6n + 3 = 11n + 6$ ). Samotná Snelliho nerovnost 20 přidává 3 operace, a proto  $O_{sh} = 11n + 9$ .

**Gregory** Opět je stejný systém výpočtu složitosti jako u Descartova a Kusánského algoritmu. Vzorce pro složitost algoritmu z tabulky č. 8:

$n$	1	2	3
$O_{sh}(n)$	2+2	8+2	14+2
$O_{hh}(n)$	6+2	12+2	18+2

Tabulka 8: Počet operací - Gregoryho algoritmus (podle vzorce 23, 24 a 25)

$$O_{sh}(n) = 6(n - 1) + 2 + 2 = 6n - 2$$

$$O_{hh}(n) = 6n$$

**Wallis** Ze 9. tabulky plyne, že složitost algoritmu tvoří posloupnost:

$$O(n) = 7n.$$

$n$	1	2	3
$O(n)$	6+1	13+1	20+1

Tabulka 9: Počet operací - Wallisův algoritmus

$n$	1	2	3
$O(n)$	1	4	7

Tabulka 10: Počet operací - Brounckerův algoritmus

**Brouncker** Jako 1. iteraci je brána  $\frac{4}{1}$  a každá další zlomek  $(+\frac{i^2}{2})$  Ze 10. tabulky plyne, že složitost algoritmu tvoří posloupnost:

$$O(n) = 3(n - 1) + 1 = 3n - 2.$$

$n$	1	2	3
$O(n)$	4+1	9+1	14+1

Tabulka 11: Počet operací - Gregoryho-Leibnizův algoritmus

**Gregory-Leibniz** Ze 11. tabulky plyne, že složitost algoritmu tvoří posloupnost:

$$O(n) = 5n.$$

$n$	1	2	3	4
$O(n)$	14	34	60	92
zpět. difference	-	20	26	32

Tabulka 12: Počet operací - Newtonův 1. algoritmus

**Newton 1** Ze 12. tabulky plyne, že složitost algoritmu tvoří posloupnost:

$$O(n) = 3n^2 + 11n.$$

Zpětná difference z tabulky 12 dává posloupnost:

$$d(O(n)) = 6n + 8.$$

**Newton 2** Druhý Newtonův algoritmus bohužel k 0.54, nikoliv k  $\pi$ . Pravděpodobně je v zápisu připsaného z literatury chyba, a proto nemá smysl se zabývat jeho vlastnostmi.

**Sharp** Ze vzorce 40 lze sestavit tabulku celkového počtu operací v závislosti na iteraci. Z 13.

$n$	1	2	3
$O(n)$	7+2	14+2	21+2

Tabulka 13: Počet operací - Sharpův algoritmus

tabulky plyne, že složitost algoritmu tvoří posloupnost:

$$O(n) = 7n + 2.$$

**Euler** Ze sumace ve vzorci 43 lze vydedukovat, že pro  $i + 1$  je potřeba provést 2 operace ve zlomku (dělení a umocňování) a k tomu ještě přičtení hodnoty zlomku k doposud vypočítané hodnotě ( $O(n) = 3n + b$ ). Pro získání samotného  $\pi$  je třeba výsledek ještě odmocnit ( $b = 1$ ). Vzorec 1. algoritmu pro počet operací provedených do  $n$ -té iterace je:

$$O(n) = 3n + 1.$$

U druhého algoritmu se ve zlomku vyskytují 4 operace plus přičtení zlomku ( $O(n) = 5n + b$ ). Samotné  $\pi$  se získá odmocněním a vynásobením dvěma ( $b = 2$ ). Vzorec 2. algoritmu pro počet operací je:

$$O(n) = 5n + 2.$$

Ve zlomku 3. algoritmu jsou opět 4 operace a následné osamocení  $\pi$  si vyžádá další 2 operace, proto vzorec 3. algoritmu pro počet operací je:

$$O(n) = 5n + 2.$$

**Legendry** Stejný systém výpočtu počtu operací jako u Kusánského algoritmu. Vzorce pro

$n$	1	2	3
$O_{sh}(n)$	9+2	18+2	27+2
$O_{hh}(n)$	7+2	16+2	25+2

Tabulka 14: Počet operací - Legendryho algoritmus (podle vzorce 48-51)

složitost algoritmu z tabulky č. 14:

$$O_{sh}(n) = 9n + 2$$

$$O_{hh}(n) = 9n$$

algoritmus	závislost počtu operací $O(n)$	zpětná diference
Archimedův (s. / h.)	$5n + 3 / 6n + 3$	5 / 6
Ptolemaiův	$5n + 3$	5
Kusánského (s. / h.)	$4n / 4n + 2$	4 / 4
Vièteho	$n^2$	$2n - 1$
Descartesův (s. / h.)	$6n - 2 / 6n$	6 / 6
Gregoryho (s. / h.)	$6n - 2 / 6n + 2$	6 / 6
Snellův (s. / h.)	$5n + 14 / 11n + 9$	5 / 11
Wallisův	$7n$	7
Brounckerův	$3n - 1$	3
Gregorho-Leibnizův	$5n$	5
Newtonův 1	$3n^2 + 11n$	$6n + 8$
Sharp	$7n + 2$	7
Euler 1	$3n + 1$	3
Euler 2	$5n + 2$	5
Euler 3	$5n + 2$	5
Legendryho (s. / h.)	$9n+2/9n$	9/9

Tabulka 15: Počet operací v závislosti na iteraci v jednotlivých algoritmech

algoritmus	efektivita algoritmu $\mathfrak{N}$
Archimedův (s. / h.)	<b>2.38/35.8</b>
Ptolemaiův	<b>2.38</b>
Kusánského (s. / h.)	10.6/ <b>1.71</b>
Vièteho	<b>2.59</b>
Descartesův (s. / h.)	35.8/3.19
Gregoryho (s. / h.)	35.8/118
Snellův (s. / h.)	<b>0.998/0.825</b>
Wallisův	>40.4
Brounckerův	32.2
Gregorho-Leibnizův	>86.3
Newtonův 1	6.54
Sharp	4.23
Euler 1	>55.9
Euler 2	>80.6
Euler 3	3.82
Legendry (s. / h.)	211/3.14

Tabulka 16: Srovnání efektivity algoritmů podle  $\mathfrak{N}$

## 5 ZÁVĚR

V práci jsme nahlédli do historického průřezu jednotlivých algoritmů a jiných způsobů výpočtu  $\pi$ . Sledovali jsme jejich vývoj. Každý algoritmus byl zhodnocen z několika pohledů, jak moc rychle konverguje k  $\pi$  a jak moc jsou složité v počtu operací. Dále jsme si zavedli mnou vytvořenou veličinu  $\mathfrak{N}$ , která tyto dvě vlastnosti spojuje. Dále jsme se dozvěděli, jak se  $\pi$  počítalo na prvních počítačích v polovině 20. století. K tomu jsme si přidali metodu Monte Carlo, která sice k výpočtu  $\pi$  primárně nikdy nesloužila<sup>14</sup>, ale je to jeden ze způsobů, jak  $\pi$  počítat v dnešní době s použitím počítačů.

Z pohledu rychlosti s jakou algoritmus konvergoval k  $\pi$ , byl nejlepší Legrenyho algoritmus, který už po 4. iteraci se lišila spodní hranice intervalu o méně jak  $5 \cdot 10^{-8}$ . Dalším o něco méně rychlejším algoritmem, ale výrazně rychlejším než zbytek algoritmů, by Snellův algoritmus. Problém s porovnáním algoritmů podle míry konvergence byl, že počítače mají zaokrouhlovací chybu na 16. desetinném místě, a proto jsme se přes hranici  $2 \cdot 10^{-16}$  většinou nedostali.

Brounckerův a první Eulerův algoritmus byly nejlepší z pohledu počtu operací nejlepší, protože s každou iterací vzroste počet operací o 3. U všech algoritmů byla závislost na počtu operací lineární až na Vièteův a Newtonův algoritmus, kde byla exponenciální. Nedostatek tohoto porovnávání je, že se předpokládá, že každá operace je stejně náročná, jak s pohledu počítáře, tak z pohledu procesoru v počítači.

Podle veličiny  $\mathfrak{N}$  je nejlepší Snellovo vylepšení Archimedovy metody, a to v obou směrech, a horní hranice intervalu Kusánského algoritmu (tabulka 16). Oba algoritmy zkombinovaly rychlost, se kterou se blíží k  $\pi$ , a nízkou náročnost na počet operací. Těsně za nimi byl Vièteův nekonečný součin a Archimedova metoda pro spodní hranici intervalu. Nejhuře v tomto porovnávání dopadl Wallisův nekonečný součin, Gregoryho-Leibnizova řada a první dvě Eulerovy řady. Protože jejich míra konvergence klesá s počtem operací velmi pomalu, je nalezení jejich hodnoty  $\mathfrak{N}$  velmi časově a výpočetně náročné, a proto jsme zjistili jen hodnotu, pro kterou víme, že je určitě nižší než jejich skutečná hodnota  $\mathfrak{N}$ , i tak nám to stačí pro určení, že se jedná o nejhorší porovnávané algoritmy spolu se spodní hranicí Legendryho algoritmu, kde jsme hodnotu  $\mathfrak{N}$  sice našli, ale byla velmi vysoká.

Jak již bylo zmíněno,  $\mathfrak{N}$  je nástroj vhodný k porovnávání algoritmů z pohledu celkové efektivity, ale musíme brát na vědomí, že je to jen jeden z mnoha nástrojů a každý si může vytvořit svůj vlastní. Jedno z hlavních kritérií je, jestli dáme stejnou váhu rychlosti konvergence a počtu potřebných operací k výpočtu 1 iterace nebo dáme něčemu přednost. V našem případě mají oba parametry stejnou váhu. Nedostatek v tomto způsobu srovnávání můžeme vidět, že když budeme mít 2 algoritmy a jeden ze začátku bude konvergovat huře než druhý, ale po určitém počtu operacích se to otočí a s ještě větším rozdílem bude konvergovat první lépe, nástroj vyhodnotí lépe druhý algoritmus, protože na začátku kvůli vyšší míře konvergence naskakovaly větší přírůstky od  $\mathfrak{N}$ .

---

<sup>14</sup>V té době existovaly mnohem lepší algoritmy.



## 6 REFERENCE

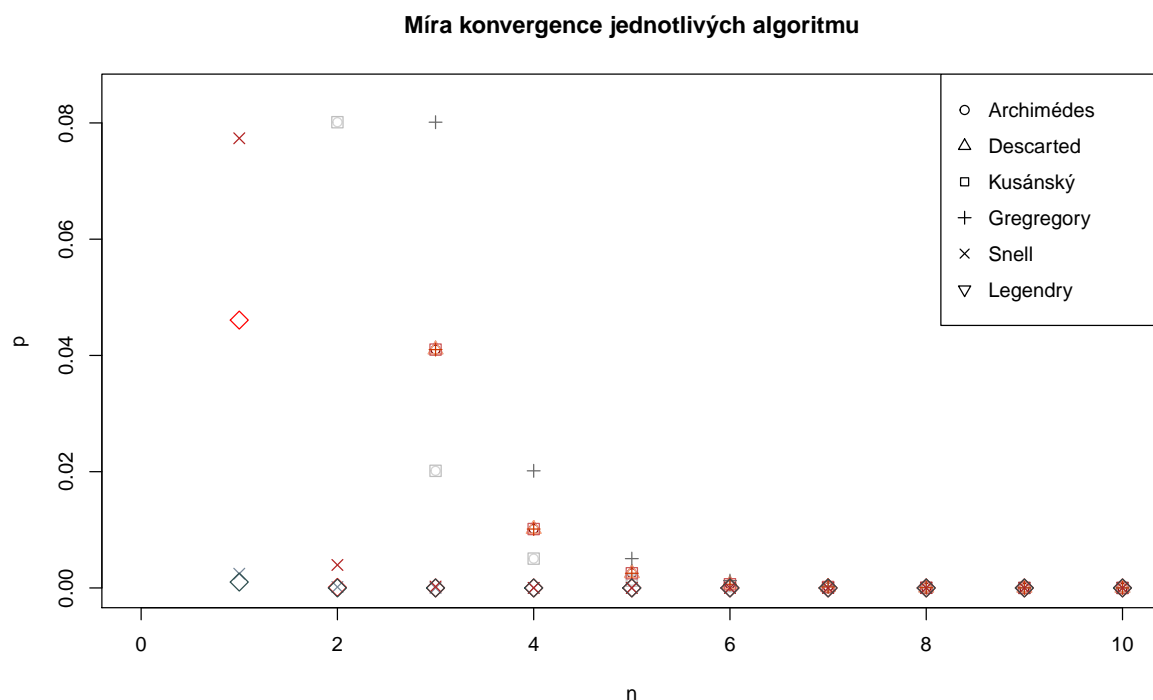
- [1] BECKMANN, Petr. Historie čísla  $\pi$ . Praha: Academia, 1998. ISBN 80-200-0655-9.
- [2] THUMSHIRN, Christian. Der Schweizer, der 22,4 Billionen Dezimalstellen von  $\pi$  berechnet hat. Neue Zürcher Zeitung [online]. Zürich, 2017, 21.3.2017, , 1 [cit. 2018-06-21]. Dostupné z: <https://www.nzz.ch/wissenschaft/video-serie-nerdzz-der-wahrscheinlich-laengste-rekord-der-welt-ld.152445-november-2016/>
- [3] KOLMAN, Arnošt a Marcela HEDRLÍNOVÁ. Dějiny matematiky ve starověku. Praha: Academia, 1968. ISBN 978-80-87287-77-4.
- [4] Bible kralická: Písmo svaté Starého a Nového zákona : podle posledního vydání z roku 1613. 5. vyd. v ČBS. Praha: Česká biblická společnost, 2014. ISBN 978-80-87287-77-4.
- [5] BEČVÁŘ, Jindřich, Martina BEČVÁŘOVÁ a Hana VYMAZALOVÁ. Matematika ve starověku: Egypt a Mezopotámie. Praha: Prometheus, 2003. Dějiny matematiky. ISBN 80-7196-255-4.
- [6] VEJCHODSKÝ, Tomáš. Archimédův výpočet čísla  $\pi$  [přednáška]. Praha: Akademie věd České republiky, 11.11.2016. In: Youtube.com [online]. [vid. 17. 5. 2018]. Záznam dostupný z: <https://www.youtube.com/watch?v=8XaM9ZYxCqU>
- [7] WILLERS, Michael. Algebra bez (m)učení: Od arabských matematiků k tajným šifrám: matematika v každodenním životě : fascinující čísla a rovnice. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-4123-9.
- [8] Adam Adamandy Kochański. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Adam-Adamandy-Kocha%C5%84ski>
- [9] POSAMENTIER, Alfred S. a Ingmar LEHMANN. [Pi]: A Biography of the World's Most Mysterious Number. II.Title. Amherst, N.Y.: Prometheus Books, 2004. ISBN 15-910-2200-2.
- [10] BEČVÁŘ, Jindřich. Matematika ve středověké Evropě. Praha: Prometheus, 2001. Dějiny matematiky. ISBN 80-7196-232-5.
- [11] BEČVÁŘ, Jindřich, FUCHS, Eduard, ed. Matematika v 16. a 17. století: Seminář Historie matematiky III. Praha: Prometheus, 1999. ISBN 80-7196-150-7.
- [12] JÁCHIM, František. Jak viděli vesmír: [po stopách velkých astronomů]. Olomouc: Rubico, 2003. ISBN 80-85839-48-2.
- [13] BEČVÁŘOVÁ, Martina, Jindřich BEČVÁŘ, Magdalena HYKŠOVÁ, Oldřich HYKŠ, Martin MELCER, Martina ŠTĚPÁNOVÁ, Miroslava OTAVOVÁ a Irena SÝKOROVÁ. Matematika ve středověké Evropě: pozdní středověk a renesance. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2018. Dějiny matematiky. ISBN 978-80-01-06403-0.

- [14] FUCHS, Eduard, ed. Mathematics throughout the ages. Prague: Prometheus, 2001. History of mathematics. ISBN 80-7196-219-8.
- [15] BEČVÁŘ, Jindřich a Eduard FUCHS, ed. Matematika v proměnách věků III. Praha: Výzkumné centrum pro dějiny vědy, 2004. Dějiny matematiky. ISBN 80-728-5040-7.
- [16] BRENT, Richard P. The Borwein Brothers, Pi and the AGM [online]. Mathematical Sciences Institute, Australian National University, Canberra a University of Newcastle, Callaghan, 8. 8. 2018, , 7-8 [cit. 2018-11-03]. Dostupné z: <https://arxiv.org/abs/1802.07558>
- [17] GOURÉVITCH, Boris. Newton's Formula. The world of pi [online]. [cit. 2018-11-03]. Dostupné z: <http://www.pi314.net/eng/newton.php>
- [18] PROKOP, Vladimír. Dějiny literatury od starověku do počátku 19. století: aneb od Mezopotámie po naše národní obrození. Sokolov: O.K.-Soft, 2001.
- [19] VIRIUS, Miroslav. Metoda Monte Carlo. V Praze: České vysoké učení technické, 2010. ISBN 978-80-01-04595-4.
- [20] ENIAC: Electronic Numerical Integrator and Computer. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/ENIAC>
- [21] Pi in the sky: Calculating a record-breaking 31.4 trillion digits of Archimedes' constant on Google Cloud. In: Google Cloud [online]. Google, 2019, 14.3.2019 [cit. 2019-03-27]. Dostupné z: <https://cloud.google.com/blog/products/compute/calculating-31-4-trillion-digits-of-archimedes-constant-on-google-cloud>

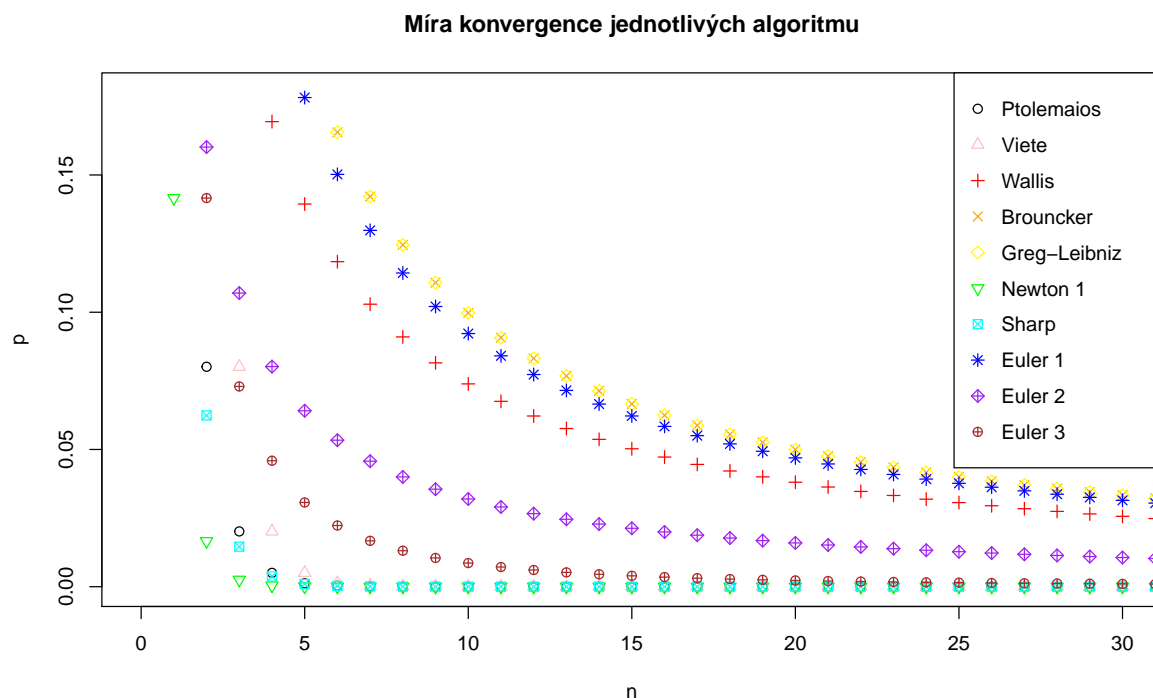
## **7 SEZNAM OBRÁZKŮ**

## **8 SEZNAM TABULEK**

# PŘÍLOHA A: MÍRA KONVERGENCE



Obrázek 27: Graf míry konvergence popsaných s intervalovým výstupem (čern.-sh, červ.-hh) ve větším měřítku



Obrázek 28: Graf míry konvergence zbytku algoritmů popsaných v této práci ve větším měřítku

číslo iterace hr. intervalu	Archimedes		Descartes		Kusánský		Gregory	
	spodní	horní	spodní	horní	spodní	horní	spodní	horní
1	3.13e-1	8.58e-1	3.13e-1	8.58e-1	3.13e-1	8.58e-1	1.14e+0	8.58e-1
2	8.01e-2	1.72e-1	8.01e-2	1.72e-1	8.01e-2	1.72e-1	3.13e-1	1.72e-1
3	2.01e-2	4.10e-2	2.01e-2	4.10e-2	2.01e-2	4.10e-2	8.01e-2	4.10e-2
4	5.04e-3	1.01e-2	5.04e-3	1.01e-2	5.04e-3	1.01e-2	2.01e-2	1.01e-2
5	1.26e-3	2.53e-3	1.26e-3	2.53e-3	1.26e-3	2.53e-3	5.04e-3	2.53e-3
6	3.15e-4	6.31e-4	3.15e-4	6.31e-4	3.15e-4	6.31e-4	1.26e-3	6.31e-4
7	7.89e-5	1.58e-4	7.89e-5	1.58e-4	7.89e-5	1.58e-4	3.15e-4	1.58e-4
8	1.97e-5	3.94e-5	1.97e-5	3.94e-5	1.97e-5	3.94e-5	7.89e-5	3.94e-5
9	4.93e-6	9.86e-6	4.93e-6	9.86e-6	4.93e-6	9.86e-6	1.97e-5	9.86e-6
10	1.23e-6	2.46e-6	1.23e-6	2.46e-6	1.23e-6	2.46e-6	4.93e-6	2.46e-6
11	3.08e-7	6.16e-7	3.08e-7	6.16e-7	3.08e-7	6.16e-7	1.23e-6	6.16e-7
12	7.70e-8	1.54e-7	7.70e-8	1.54e-7	7.70e-8	1.54e-7	3.08e-7	1.54e-7
13	1.93e-8	3.85e-8	1.93e-8	3.85e-8	1.93e-8	3.85e-8	7.70e-8	3.85e-8
14	4.81e-9	9.63e-9	4.81e-9	9.63e-9	4.81e-9	9.63e-9	1.93e-8	9.63e-9
15	1.20e-9	2.41e-9	1.20e-9	2.41e-9	1.20e-9	2.41e-9	4.81e-9	2.41e-9
16	3.01e-10	6.02e-10	3.01e-10	6.02e-10	3.01e-10	6.02e-10	1.20e-9	6.02e-10
17	7.52e-11	1.50e-10	7.52e-11	1.50e-10	7.52e-11	1.50e-10	3.01e-10	1.50e-10
18	1.88e-11	3.76e-11	1.88e-11	3.76e-11	1.88e-11	3.76e-11	7.52e-11	3.76e-11
19	4.70e-12	9.40e-12	4.70e-12	9.40e-12	4.70e-12	9.40e-12	1.88e-11	9.40e-12
20	1.18e-12	2.35e-12	1.18e-12	2.35e-12	1.17e-12	2.35e-12	4.70e-12	2.35e-12
21	2.94e-13	5.88e-13	2.94e-13	5.87e-13	2.94e-13	5.88e-13	1.17e-12	5.88e-13
22	7.37e-14	1.47e-13	7.35e-14	1.47e-13	7.33e-14	1.47e-13	2.94e-13	1.47e-13
23	1.86e-14	3.68e-14	1.84e-14	3.67e-14	1.82e-14	3.68e-14	7.33e-14	3.68e-14
24	4.82e-15	9.30e-15	4.62e-15	9.15e-15	4.47e-15	9.30e-15	1.82e-14	9.30e-15
25	1.38e-15	2.42e-15	1.18e-15	2.26e-15	1.02e-15	2.42e-15	4.47e-15	2.42e-15
26	5.19e-16	6.96e-16	3.20e-16	5.40e-16	1.64e-16	6.96e-16	1.02e-15	6.96e-16
27	3.04e-16	2.66e-16	1.05e-16	1.10e-16	5.07e-17	2.66e-16	1.64e-16	2.66e-16
28	2.50e-16	1.58e-16	5.15e-17	2.25e-18	1.05e-16	1.58e-16	5.07e-17	1.58e-16
29	2.37e-16	1.31e-16	3.81e-17	2.46e-17	1.18e-16	1.31e-16	1.05e-16	1.31e-16
30	2.33e-16	1.25e-16	3.47e-17	3.14e-17	1.21e-16	1.25e-16	1.18e-16	1.25e-16

Tabulka 17: Míra konvergence (rozšířená verze)

č. iterace hr. intervalu	Snell		Legendry		Ptolem.	Viete	Wallis	Brounck.
	spodní	horní	spodní	horní	spodní	horní	spodní	horní
1	2.45e-3	7.74e-2	2.27e-1	8.58e-1	3.13e-1	1.14e+0	4.75e-01	8.58e-01
2	1.55e-4	3.96e-3	1.01e-3	4.61e-2	8.01e-2	3.13e-1	2.97e-01	4.75e-01
3	9.72e-6	2.37e-4	7.38e-9	8.76e-5	2.01e-2	8.01e-2	2.16e-01	3.25e-01
4	6.08e-7	1.46e-5	4.98e-18	3.06e-10	5.04e-3	2.01e-2	1.69e-01	2.46e-01
5	3.80e-8	9.13e-7	4.80e-18	4.79e-18	1.26e-3	5.04e-3	1.39e-01	1.98e-01
6	2.37e-9	5.70e-8	4.80e-18	4.80e-18	3.15e-4	1.26e-3	1.18e-01	1.66e-01
7	1.48e-10	3.56e-9	4.80e-18	4.80e-18	7.89e-5	3.15e-4	1.03e-01	1.42e-01
8	9.28e-12	2.23e-10	4.80e-18	4.80e-18	1.97e-5	7.89e-5	9.10e-02	1.25e-01
9	5.80e-13	1.39e-11	4.80e-18	4.80e-18	4.93e-6	1.97e-5	8.16e-02	1.11e-01
10	3.65e-14	8.70e-13	4.80e-18	4.80e-18	1.23e-6	4.93e-6	7.39e-02	9.98e-02
11	2.50e-15	5.42e-14	4.80e-18	4.80e-18	3.08e-7	1.23e-6	6.75e-02	9.07e-02
12	3.74e-16	3.28e-15	4.80e-18	4.80e-18	7.70e-8	3.08e-7	6.22e-02	8.32e-02
13	2.41e-16	9.84e-17	4.80e-18	4.80e-18	1.93e-8	7.70e-8	5.76e-02	7.68e-02
14	2.33e-16	1.01e-16	4.80e-18	4.80e-18	4.81e-9	1.93e-8	5.37e-02	7.13e-02
15	2.32e-16	1.13e-16	4.80e-18	4.80e-18	1.20e-9	4.81e-9	5.03e-02	6.66e-02
16	2.32e-16	1.14e-16	4.80e-18	4.80e-18	3.01e-10	1.20e-9	4.72e-02	6.24e-02
17	2.32e-16	1.14e-16	4.80e-18	4.80e-18	7.52e-11	3.01e-10	4.46e-02	5.88e-02
18	2.32e-16	1.14e-16	4.80e-18	4.80e-18	1.88e-11	7.52e-11	4.22e-02	5.55e-02
19	2.32e-16	1.14e-16	4.80e-18	4.80e-18	4.70e-12	1.88e-11	4.00e-02	5.26e-02
20	2.32e-16	1.14e-16	4.80e-18	4.80e-18	1.18e-12	4.70e-12	3.81e-02	5.00e-02
21	2.32e-16	1.14e-16	4.80e-18	4.80e-18	2.94e-13	1.17e-12	3.63e-02	4.76e-02
22	2.32e-16	1.14e-16	4.80e-18	4.80e-18	7.38e-14	2.94e-13	3.47e-02	4.54e-02
23	2.32e-16	1.14e-16	4.80e-18	4.80e-18	1.87e-14	7.33e-14	3.32e-02	4.35e-02
24	2.32e-16	1.14e-16	4.80e-18	4.80e-18	4.91e-15	1.82e-14	3.19e-02	4.16e-02
25	2.32e-16	1.14e-16	4.80e-18	4.80e-18	1.47e-15	4.47e-15	3.06e-02	4.00e-02
26	2.32e-16	1.14e-16	4.80e-18	4.80e-18	6.08e-16	1.02e-15	2.95e-02	3.84e-02
27	2.32e-16	1.14e-16	4.80e-18	4.80e-18	3.93e-16	1.64e-16	2.84e-02	3.70e-02
28	2.32e-16	1.14e-16	4.80e-18	4.80e-18	3.40e-16	5.07e-17	2.74e-02	3.57e-02
29	2.32e-16	1.14e-16	4.80e-18	4.80e-18	3.26e-16	1.05e-16	2.65e-02	3.45e-02
30	2.32e-16	1.14e-16	4.80e-18	4.80e-18	3.23e-16	1.18e-16	2.56e-02	3.33e-02

Tabulka 18: Míra konvergence 2 (rozšířená verze)

č. iterace	Leibniz	Newton	Sharp	Euler	Euler 2	Euler 3
1	8.58e-01	1.42e-1	3.23e-1	6.92e-01	3.13e-01	3.23e-01
2	4.75e-01	1.66e-2	6.24e-2	4.03e-01	1.60e-01	1.42e-01
3	3.25e-01	2.53e-3	1.46e-2	2.84e-01	1.07e-01	7.30e-02
4	2.46e-01	4.38e-4	3.74e-3	2.19e-01	8.02e-02	4.59e-02
5	1.98e-01	8.15e-5	1.01e-3	1.78e-01	6.41e-02	3.07e-02
6	1.66e-01	1.59e-5	2.84e-4	1.50e-01	5.34e-02	2.23e-02
7	1.42e-01	3.23e-6	8.17e-5	1.30e-01	4.57e-02	1.67e-02
8	1.25e-01	6.71e-7	2.39e-5	1.14e-01	4.00e-02	1.31e-02
9	1.11e-01	1.42e-7	7.12e-6	1.02e-01	3.55e-02	1.05e-02
10	9.98e-02	3.07e-8	2.14e-6	9.22e-02	3.20e-02	8.62e-03
11	9.07e-02	6.71e-9	6.51e-7	8.41e-02	2.91e-02	7.17e-03
12	8.32e-02	1.48e-9	1.99e-7	7.73e-02	2.66e-02	6.09e-03
13	7.68e-02	3.31e-10	6.14e-8	7.15e-02	2.46e-02	5.21e-03
14	7.13e-02	7.45e-11	1.90e-8	6.65e-02	2.28e-02	4.53e-03
15	6.66e-02	1.69e-11	5.93e-9	6.22e-02	2.13e-02	3.96e-03
16	6.24e-02	3.84e-12	1.86e-9	5.84e-02	2.00e-02	3.50e-03
17	5.88e-02	8.80e-13	5.83e-10	5.50e-02	1.88e-02	3.11e-03
18	5.55e-02	2.03e-13	1.84e-10	5.20e-02	1.77e-02	2.79e-03
19	5.26e-02	4.67e-14	5.80e-11	4.93e-02	1.68e-02	2.51e-03
20	5.00e-02	1.08e-14	1.84e-11	4.69e-02	1.60e-02	2.27e-03
21	4.76e-02	2.42e-15	5.84e-12	4.47e-02	1.52e-02	2.06e-03
22	4.54e-02	4.77e-16	1.86e-12	4.27e-02	1.45e-02	1.88e-03
23	4.35e-02	2.37e-17	5.93e-13	4.09e-02	1.39e-02	1.73e-03
24	4.16e-02	8.25e-17	1.90e-13	3.92e-02	1.33e-02	1.59e-03
25	4.00e-02	1.07e-16	6.06e-14	3.77e-02	1.28e-02	1.47e-03
26	3.84e-02	1.13e-16	1.95e-14	3.62e-02	1.23e-02	1.36e-03
27	3.70e-02	1.15e-16	6.19e-15	3.49e-02	1.18e-02	1.26e-03
28	3.57e-02	1.15e-16	2.07e-15	3.37e-02	1.14e-02	1.17e-03
29	3.45e-02	1.15e-16	5.87e-16	3.25e-02	1.10e-02	1.10e-03
30	3.33e-02	1.15e-16	2.68e-16	3.15e-02	1.06e-02	1.03e-03

Tabulka 19: Míra konvergence 3 (rozšířená verze)