

# AUTOMATIZOVANÁ ANALÝZA OVÁLNOSTI SEGMENTOVÝCH PRSTENCŮ RAZICÍCH ŠTÍTŮ

T.Langar & P.Matter

*Amberg Engineering a.s., Amberg Technologies AG*

L.Hannan

*Amberg Technologies AG*

**ABSTRAKT:** V současnosti je po celém světě v provozu několik stovek razicích štítů (TBM) využívaných při realizaci infrastrukturních projektů. Přibližně 70 % z nich razí tunely se segmentovým prstencovým ostěním, u kterého je nezbytné posuzovat jeho geometrickou kvalitu, zejména oválnost, přechody mezi prstenci a jejich natočení. Tradiční metody měření a vyhodnocení těchto parametrů jsou časově náročné a obvykle zahrnují kombinaci více softwarových nástrojů a manuálních kroků. Tento článek představuje novou plně automatizovanou metodu analýzy oválnosti segmentových prstenců založenou na datech z 3D laserového skenování. Metoda byla úspěšně aplikována na projektu Eglinton Crosstown West Extension v Torontu, kde umožnila analyzovat celkem 1 488 prstenců v souladu s doporučeními International Tunnelling Association (ITA) a zároveň ušetřila stovky pracovních hodin. Automatizovaný postup zahrnuje extrakci profilů z mračna bodů, detekci a odstranění odlehlých hodnot, proložení elipsy a výpočet všech požadovaných parametrů, včetně vnitřních průměrů a odchylek od teoretické osy. Výsledky jsou prezentovány prostřednictvím přehledných grafických výstupů a exportovány do standardizovaných formátů pro další využití.

## 1. NORMATIVNÍ POŽADAVKY A STANDARDY

Existuje několik národních i mezinárodních předpisů, které definují přípustné geometrické odchylky segmentových prstenců. Následující kapitoly shrnují vybrané standardy běžně používané v praxi.

### 1.1 BRITISH TUNNELLING SOCIETY

Podle BTS musí maximální a minimální naměřené průměry v každém prstenci být v rozmezí 1 % teoretického návrhového průměru prstence měřeného po dokončení výroby prstence a injektáže, nebo takové jiné tolerance uvedené ve zvláštní specifikaci.

### 1.2 INTERNATIONAL TUNNELING ASSOCIATION

ITA definuje konstrukční toleranci pro tvar prstence (ovalizaci) na průměru v rozmezí  $\pm 0,25$  % až  $\pm 0,5$  % vnitřního průměru v závislosti na velikosti prstence a počtu segmentů na prsten.

### 1.3 SINGAPURSKÁ LAND TRANSPORT AUTHORITY

Podle singapurských předpisů se střed prstence segmentů nesmí odchýlit od své konstrukční polohy o více než 42,5 mm a každý vnitřní průměr se nesmí lišit od konstrukčního průměru o více než 25 mm.

### 1.4 SEVEROAMERICKÉ PROJEKTOVÉ SPECIFIKACE

Severoamerické projekty často vyžadují měření horizontálních odchylek od teoretické osy k vnitřní ploše tunelu, vertikální odchylky kaloty a dna měřené od teoretické osy a horizontální staničení bodů, kde jsou prováděna měření.

### 1.5 VZORCE PRO VÝPOČET OVALITY

Pro výpočet a prezentaci ovality existují různé vzorce, které se liší podle použité metodiky a požadavků konkrétního projektu. Pro výpočet a vyhodnocení všech výše uvedených specifikací je nutné mít k dispozici naměřený profil každého prstence. Prsten je typicky 1,5 až 1,8 m široký. U segmentově obloženého tunelu o délce 6,4 km je třeba změřit, analyzovat a zpracovat přibližně 4 200 prstenců.

### 1.5.1 Standardní vzorec pro oválnost

Tento vzorec vypočítá procentuální odchylku na základě maximálního a minimálního vnitřního průměru tunelového prstence podle vztahu (1):

$$\theta = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{nominal}} * 100\% \quad (1)$$

Kde  $D_{max}$  je maximální naměřený vnitřní průměr,  $D_{min}$  je minimální naměřený vnitřní průměr a  $D_{nominal}$  je konstrukční nebo jmenovitý vnitřní průměr.

### 1.5.2 Vzorec ITA pro maximální a minimální procentuální odchylku

Mezinárodní tunelářská asociace používá metodu k vyjádření procentuální odchylky od návrhového průměru. Tato metoda bere v úvahu jak expanzní, tak kompresní efekty, což umožňuje kladnou nebo zápornou oválnost podle vztahu (2):

$$\theta = \frac{D_{AbsMax}}{D_{nominal}} * 100\% \quad (2)$$

kde  $D_{AbsMax}$  představuje absolutní maximální odchylku od jmenovitého průměru. Tento vzorec zachycuje největší odchylku, ať už se jedná o expanzi (kladnou) nebo kompresi (zápornou).

### 1.5.3 Vzorec založený na elipse

Tato metoda využívá hlavní a vedlejší osy elipsy k určení ovality. Porovnává rozdíl mezi osami s návrhovým průměrem podle vztahu (3):

$$\theta = \frac{a-b}{D_{nominal}} * 100\% \quad (3)$$

kde  $a$  je délka hlavní osy proložené elipsy a  $b$  je délka vedlejší osy proložené elipsy.

### 1.5.4 Maximální rozdíl průměrů

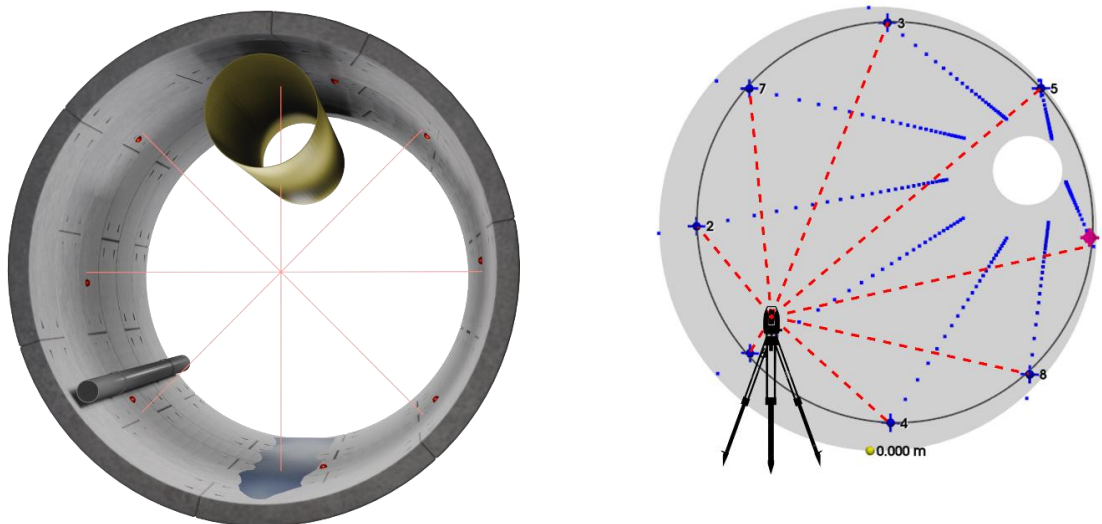
Tato metoda vypočítává maximální odchylku od návrhového průměru v absolutní vzdálenosti spíše než v procentech. Identifikuje, zda největší odchylka je expanze nebo komprese podle vztahu (4):

$$\theta = D_{AbsMax} - D_{nominal} \quad (3)$$

kde  $D_{AbsMax}$  je průměr s největší absolutní odchylkou od jmenovitého průměru a  $D_{nominal}$  je návrhový nebo jmenovitý průměr.

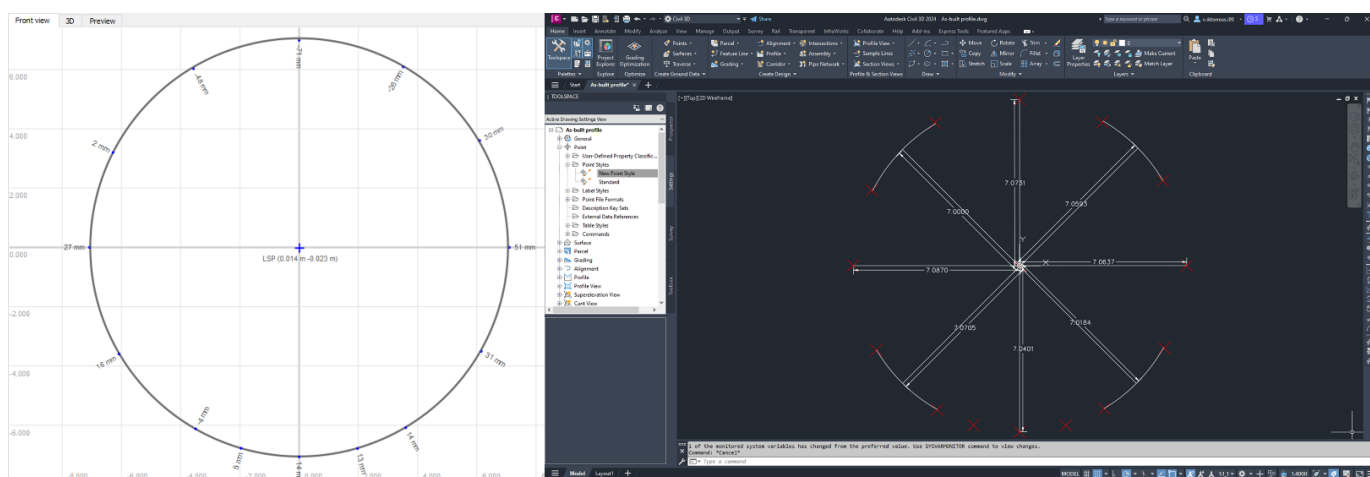
## 2. TRADIČNÍ PŘÍSTUP KE SBĚRU PROFILŮ PRSTENCŮ

Metoda sběru dat pomocí totální stanice je zdoluhavý úkol, kdy operátor pomocí totální stanice změří 8–16 bodů rovnoměrně rozmístěných na daném prstenci. Následuje manuální pracovní postup k určení ovalizace segmentově obloženého tunelu při použití různých softwarových nástrojů.



Obrázek 1: Typické rozmístění 8–16 bodů měřených na každém prstenci

Analýza zachycených profilů, tedy určení vedlejší a hlavní osy elipsy pro získání skutečné osy a skutečného středového bodu daného prstence, vyžaduje proložení poloměru mezi naměřenými body, což se typicky provádí v CAD systému a zabírá hodně času. Jedná se o frustrující práci, která musí být provedena pro požadovaný počet prstenců. V dalším kroku je třeba hodnoty ručně analyzovat v programu Excel. To může snadno trvat týdny, ne-li měsíce, v závislosti na velikosti počtu prstenců a délce tunelu.



Obrázek 2: Ukázka naměřených bodů a zpracování v CAD systému

Ring	Stationing	D_min	D_max	D_nom.	0°	22.5°	45°	67.5°	90°	112.5°	135°	157.5°	0°	22.5°	45°	67.5°	90°	112.5°	135°	157.5°	Max	Result
320	10,064,876	6,946	7,033	7,000	6,936	6,989	7,011	7,053	7,047	7,018	6,978	6,952	90%	10%	35%	88%	78%	30%	35%	80%	25%	OK
330	10,078,402	6,988	7,015	7,000	7,013	7,015	7,005	7,002	6,989	6,988	6,993	6,997	22%	25%	8%	3%	19%	21%	12%	6%	25%	OK
340	10,093,431	6,988	7,012	7,000	6,996	6,997	7,004	7,008	7,012	6,998	6,994	6,988	7%	4%	7%	14%	20%	3%	11%	20%	20%	OK
350	10,108,451	6,991	7,008	7,000	7,008	7,006	6,997	6,991	6,993	6,993	6,996	7,002	13%	9%	5%	15%	12%	11%	6%	3%	13%	OK
360	10,123,469	6,988	7,015	7,000	6,988	6,994	7,001	7,011	7,015	7,009	6,993	6,992	18%	20%	2%	13%	25%	15%	12%	13%	25%	OK
370	10,138,503	6,984	7,015	7,000	6,984	6,986	6,988	7,002	7,015	7,012	7,006	6,992	27%	24%	19%	4%	25%	20%	11%	13%	27%	OK
380	10,153,523	6,983	7,008	7,000	6,999	6,999	6,993	6,983	6,991	7,001	7,003	7,005	13%	1%	12%	28%	15%	2%	6%	8%	28%	OK
390	10,168,556	6,994	7,014	7,000	7,014	7,009	6,999	6,994	6,996	6,997	6,995	7,007	23%	13%	2%	10%	7%	4%	8%	12%	23%	OK
400	10,183,577	6,990	7,010	7,000	7,004	7,001	6,994	6,990	6,990	7,000	7,003	7,010	7%	2%	10%	17%	18%	1%	5%	16%	12%	OK
410	10,198,598	6,980	7,010	7,000	6,987	7,010	7,010	6,982	6,982	7,002	7,007	7,017	17%	16%	5%	20%	14%	9%	12%	15%	25%	OK
420	10,213,627	6,985	7,009	7,000	7,009	7,002	6,991	6,985	6,994	6,998	7,009	7,009	14%	4%	15%	25%	11%	3%	15%	15%	21%	OK
430	10,228,640	6,989	7,012	7,000	7,012	7,006	6,999	6,995	6,989	6,997	6,998	7,011	21%	10%	3%	8%	18%	5%	3%	18%	21%	OK
440	10,243,172	6,995	7,004	7,000	7,004	7,000	7,001	6,997	7,000	6,995	6,997	7,003	6%	0%	1%	5%	1%	9%	6%	6%	25%	OK
450	10,258,705	6,995	7,011	7,000	7,019	7,012	7,002	6,998	6,999	6,996	7,005	7,011	12%	20%	4%	4%	8%	6%	8%	24%	25%	OK
460	10,273,731	7,003	7,012	7,000	7,012	7,005	7,003	7,003	7,008	7,003	7,006	7,009	20%	9%	6%	6%	14%	4%	10%	14%	20%	OK
470	10,288,754	6,984	7,024	7,000	7,024	7,018	7,011	6,993	6,984	6,994	7,005	7,022	39%	30%	1%	12%	27%	11%	9%	37%	25%	OK
480	10,303,772	6,993	7,010	7,000	7,006	7,009	7,010	7,002	7,005	7,001	6,993	6,996	10%	16%	17%	4%	8%	1%	12%	6%	17%	OK
490	10,318,796	6,988	7,009	7,000	7,009	7,007	6,999	6,991	6,988	6,988	6,997	7,005	12%	11%	3%	15%	15%	20%	3%	8%	20%	OK
500	10,333,831	7,001	7,012	7,000	7,012	7,012	7,011	7,001	7,001	7,005	7,001	7,011	20%	19%	18%	2%	1%	8%	1%	18%	20%	OK
510	10,348,851	6,976	7,014	7,000	7,014	7,014	6,999	6,992	6,976	6,992	6,997	7,005	24%	24%	1%	13%	40%	14%	4%	9%	20%	OK
520	10,363,869	6,990	7,018	7,000	7,018	7,015	6,996	6,991	6,990	6,995	7,002	7,014	30%	25%	6%	16%	16%	8%	3%	24%	25%	OK
530	10,378,900	6,987	7,017	7,000	7,017	7,017	6,997	6,994	6,987	6,996	7,000	7,013	29%	28%	6%	10%	21%	7%	6%	22%	25%	OK

Obrázek 3: Ukázka zpracování v programu MS Excel

Nyní existuje způsob, jak provést všechny výpočty ovality automaticky. V následujícím textu vysvětlíme, jak byla tato nová metoda úspěšně implementována a ušetřila stovky pracovních hodin na konkrétním projektu.

### 3. PROJEKT EGLINTON CROSTOWN WEST EXTENSION V TORONTU

Tento projekt West End Connector v Torontu poskytuje vhled do automatizovaného pracovního postupu.

#### 3.1 POPIS PROJEKTU

Projekt Eglinton Crosstown West Extension (ECWE) Advance Tunnel je první fází prací na 9,2kilometrovém prodloužení tramvajové tratě Eglinton Crosstown LRT (budoucí linka TTC číslo 5). Prodloužení povede převážně pod zemí. Dvojice ražených tunelů o délce 6,2 km každý jsou segmentově obloženy. Každý prsten se skládá ze 7 segmentů s vnitřním průměrem 5,75 m.



Obrázek 4: Eglinton Crosstown West Extension

#### 3.2 PROJEKTOVÉ SPECIFIKACE

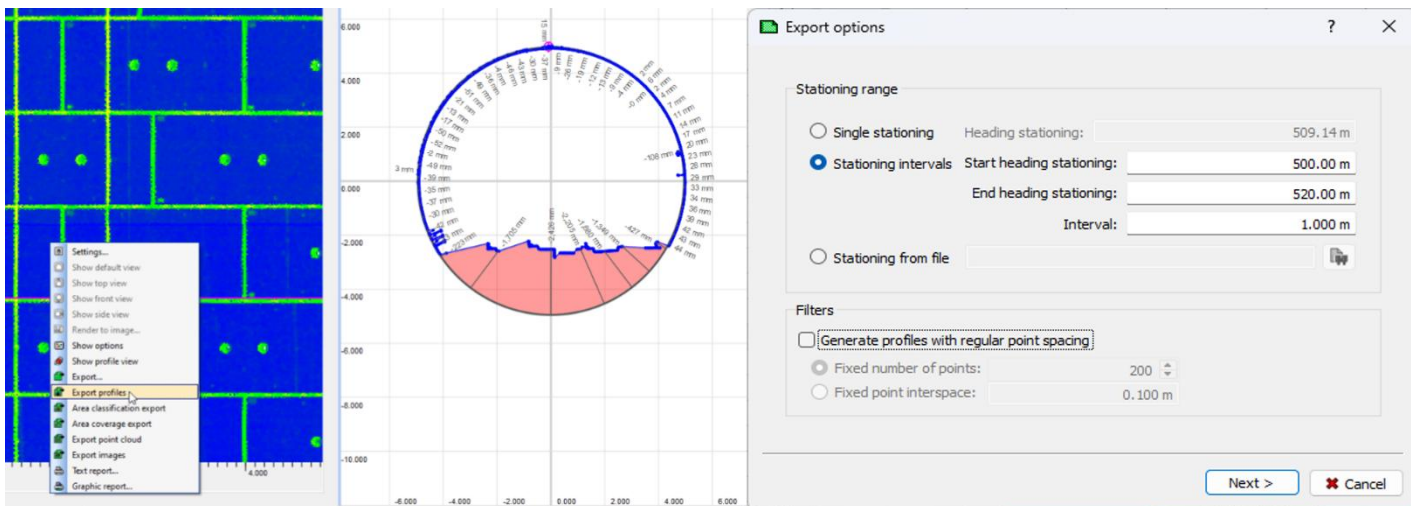
Po ukončení projektu byl dodavatel požádán o dodání požadované analýzy podle norem ITA. Automatizovaná analýza skutečného stavu segmentových prstenců TBM byla založena na datech z kompletního registrovaného 3D skenu obou rour. Celkem bylo  $2 \times 6,2$  km, což odpovídá 3 720 vybudovaným prstencům o šířce 1,7 m. Podle specifikace bylo třeba zpracovat pouze každý pátý prsten. Celkem bylo analyzováno 1 488 ( $2 \times 744$ ) prstenců.

### 4. AUTOMATIZOVANÝ PRACOVNÍ POSTUP

Nová metoda zahrnuje několik na sebe navazujících kroků, které jsou plně automatizované a výrazně zkracují čas potřebný k analýze.

#### 4.1 AUTOMATICKÁ EXTRAKCE VŠECH PROFILŮ JEDNOTLIVÝCH PRSTENCŮ Z 3D MRAČNA BODŮ

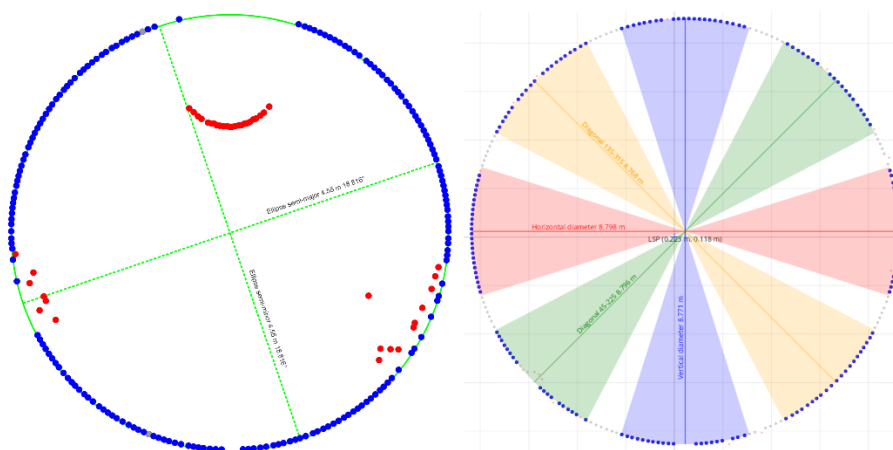
První krok automatizovaného procesu spočívá v extrakci profilů přímo z 3D mračna bodů bez nutnosti jeho předchozího čištění. Software automaticky identifikuje jednotlivé prstence na základě jejich polohy a šířky.



Obrázek 5: Export profilu z mračna bodů

## 4.2 SPUŠTĚNÍ AUTOMATIZOVANÉ ANALÝZY

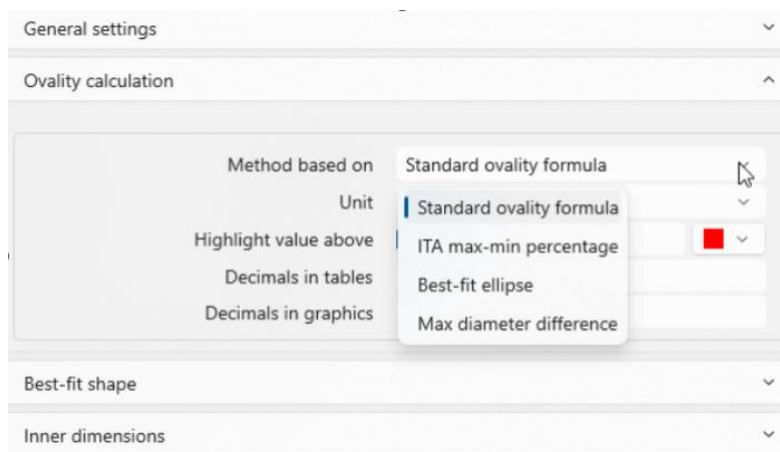
Automatizovaná analýza zahrnuje výpočet skutečného středu prstence (LSP), automatickou detekci a odstranění odlehlých hodnot (šumu) a automatické proložení elipsy. Dále probíhá automatický výpočet všech vnitřních průměrů a určení výšek kaloty a dna tunelu.



Obrázek 6: Automatické zpracování jednotlivých profilů

## 4.3 URČENÍ PŘÍSLUŠNÝCH SPECIFIKACÍ

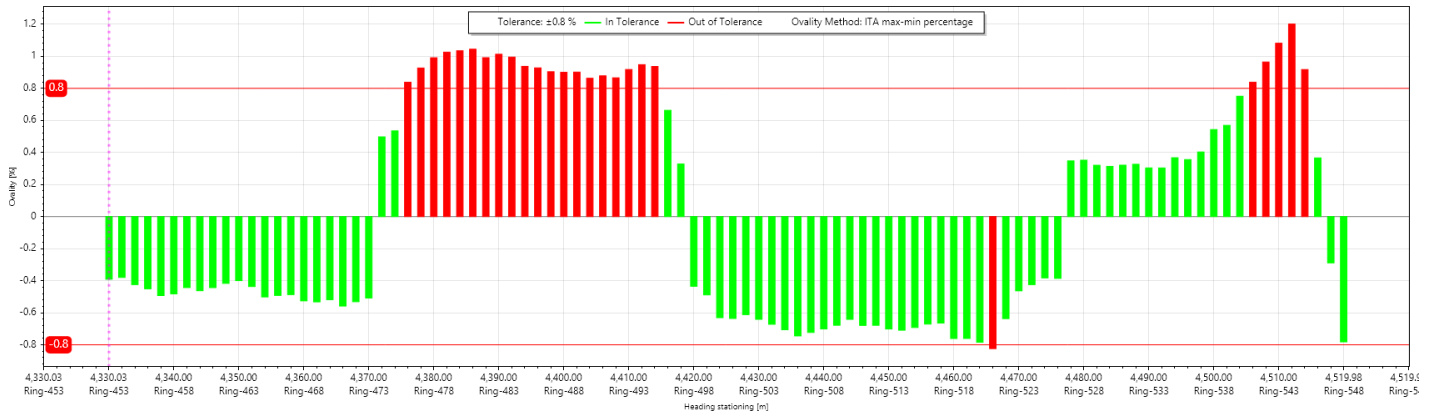
Na základě provedených výpočtů jsou automaticky určeny všechny parametry požadované projektovými specifikacemi, včetně odchylek od teoretické osy, ovality podle různých vzorců a dalších geometrických charakteristik.



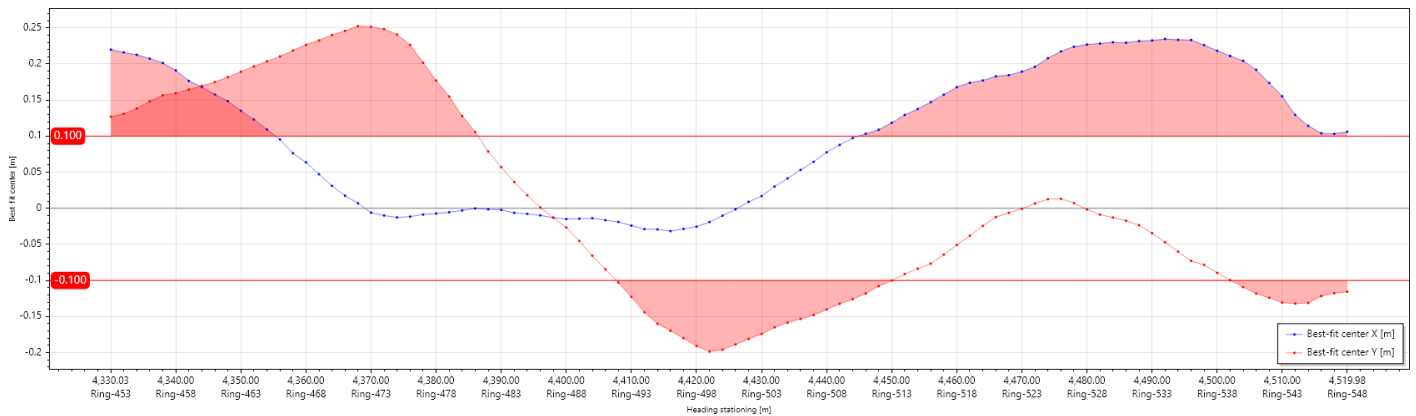
Obrázek 7: Výběr výpočetní metody

## 4.4 VIZUALIZACE VÝSLEDKŮ

Výsledky jsou prezentovány formou přehledných grafů zobrazujících orientaci elipsy, horizontální a vertikální odchylky a délky hlavních a vedlejších os elipsy pro každý analyzovaný prstenec.



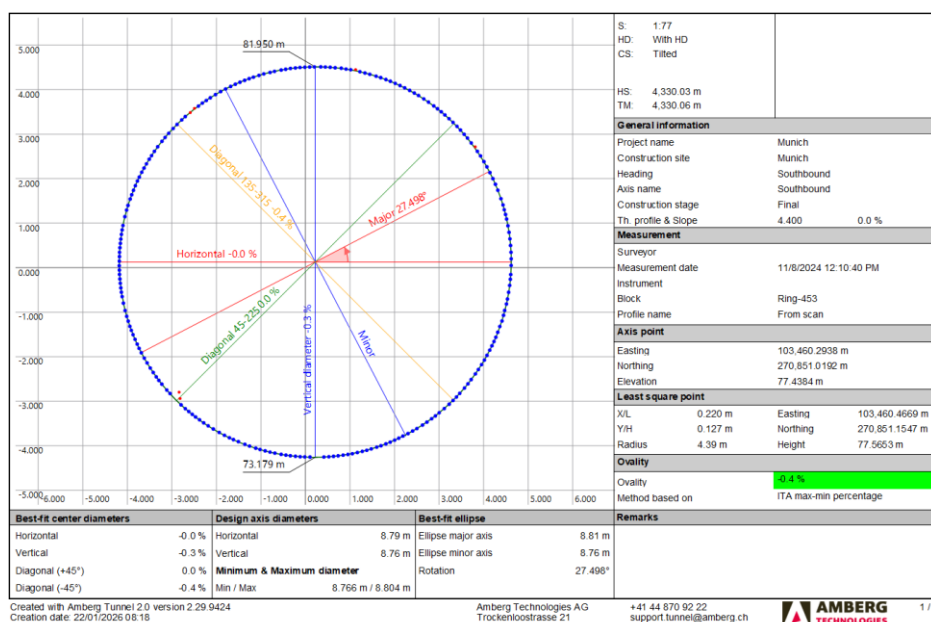
Obrázek 8: Přehled vypočtených ovalit pro každý prstenec



Obrázek 9: Přehled vypočtených středů jednotlivých prstenců vůči projektované hodnotě

## 4.5 PŘEHLEDOVÝ REPORT

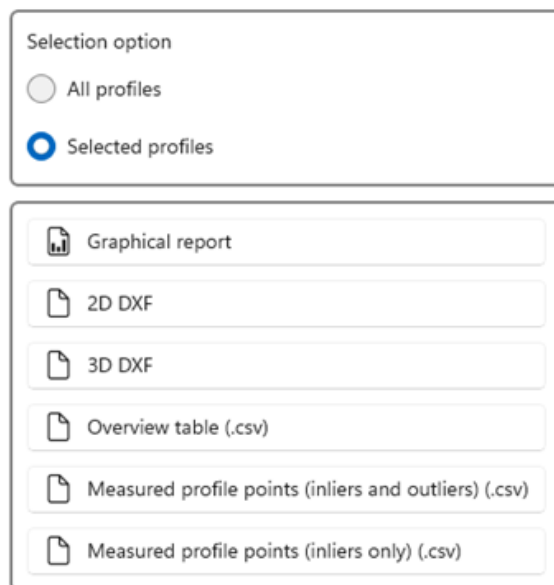
Automaticky generovaný report poskytuje kompletní přehled o všech analyzovaných prstencích včetně grafické prezentace výsledků a tabulkového výpisu hodnot.



Obrázek 10: Ukázka reportu

## 4.6 EXPORT VÝSLEDKŮ V POŽADOVANÉM FORMÁTU

Výsledky lze exportovat ve vrstvených souborech DXF obsahujících 2D profily, jako grafické reporty profilů ve formátu PDF, do Excelu se všemi vypočítanými hodnotami a atributovými informacemi, a jako naměřené body profilů s odlehlými hodnotami i bez nich.



Obrázek 11: Příklady exportů

## 5. ZÁVĚR

Nově navržená metoda, zahrnující jak výpočty založené na nejlepším proložení, tak pokročilou detekci odlehlých hodnot, poskytuje vysokou přesnost a zároveň snadné použití v širokém spektru provozních podmínek. Automatická identifikace odlehlých hodnot umožňuje extrakci profilů přímo z nevyčištěného mračna bodů, čímž odpadá nutnost předběžné filtrace dat. Výpočet skutečné osy probíhá plně automatizovaně a zahrnuje určení hlavní i vedlejší poloosy elipsy bez potřeby manuální zásahy. Stejným způsobem jsou určovány i vnitřní průměry, které díky odstranění odlehlých hodnot vycházejí z přesných a stabilních profilových dat. Celý proces je sjednocen do jediné platformy, což výrazně zjednodušuje workflow a minimalizuje riziko chyb způsobených přenosem dat mezi různými nástroji. Vyloučení odlehlých hodnot z výpočtů vede k podstatně přesnějším výsledkům. Metoda zároveň významně zkracuje čas potřebný pro analýzu i tvorbu výstupních reportů, které lze generovat během několika minut. Tím je zajištěno spolehlivé, efektivní a uživatelsky nenáročné zpracování dat při současném snížení pravděpodobnosti lidské chyby.

## 6. LITERATURA

INTERNATIONAL TUNNELLING AND UNDERGROUND SPACE ASSOCIATION. Guidelines for the Design of Shield Tunnel Lining. Lausanne: ITA-AITES, 2000.

BRITISH TUNNELLING SOCIETY. Specification for Tunnelling. London: BTS, 2010

AMBERG TECHNOLOGIES. Tunnel Suite Software Documentation. Regensdorf: Amberg Technologies, 2024.

UNDERGROUND CONSTRUCTION TECHNOLOGY. TBM Market Analysis 2022–2030 [online]. 2023. Dostupné z <https://www.tunneltalk.com/>

**Ing. Tomáš Langar**  
**Amberg Engineering a.s.**  
[tlangar@amberg.cz](mailto:tlangar@amberg.cz)