

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Stavebná fakulta
Katedra geotechniky

Autoreferát dizertačnej práce na získanie
akademického titulu „philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“

**Tvorba inžiniersko-geologického a geodetického
3D modelu pre lomové hospodárstvo
a stavebníctvo**

Ing. Martina Buková

Žilina jún 2025

Dizertačná práca bola vypracovaná v rámci externého doktorandského štúdia na Stavebnej fakulte Žilinskej univerzity v Žiline.

Predkladateľ: Ing. Martina Buková

Školiteľ: doc. Ing. Juraj Mužík, PhD.

Oponenti: 1. dr hab.inž Violetta Sokola, prof.PS.

 2. Mgr.Milan Koreň, PhD.

 3. Ing..Milan Mikoláš, PhD..

Autoreferát bol rozoslaný dňa

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa o hod.

v zasadačke dekanátu AE 307 na Stavebnej fakulte Žilinskej univerzity v Žiline, Univerzitná 8215/1, pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce schválenou spoločnou odborovou komisiou dňa

študijný odbor: stavebníctvo

študijný program: teória a konštrukcie inžinierskych stavieb

S dizertačnou prácou sa možno oboznámiť na referáte pre vedu a výskum dekanátu Stavebnej fakulty Žilinskej univerzity v Žiline, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.

Predseda spoločnej odborovej komisie
Meno podľa študijného odboru

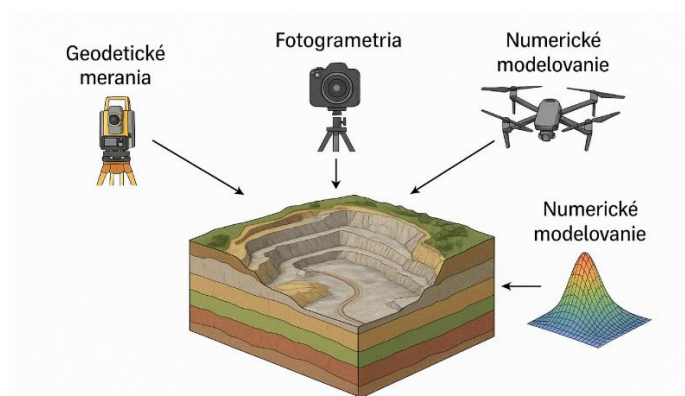
OBSAH

ÚVOD	4
1 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE	5
2 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU RIEŠENEJ PROBLEMATIKY	5
3 TEORETICKÁ ČASŤ	5
3.1 Metódy zberu priestorových dát	5
3.2 Interpoláčné a geoštatistické metódy modelovania	6
4 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ	7
4.1 Geologická a inžinierska charakteristika lokality Butkov	7
4.2 Charakteristika údajovej bázy a jej špecifiká	8
4.3 Špecifické výzvy praktickej implementácie a harmonizácia údajov	8
4.4 Kvantitatívna validácia predikčnej presnosti	10
4.5 Analýza kvantifikácie neistoty	13
4.6 Porovnanie s tradičnými metódami	13
4.7 Generovanie kompletného 3D modelu a jeho vizualizácia	14
5 ZÁVERY	17
ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	18
6 PUBLIKOVANÉ ČLÁNKY	18

ÚVOD

Dizertačná práca sa zameriava na vytvorenie 3D modelu lomu a jeho praktické a ekonomické využitie. Lomové hospodárstvo zohráva kľúčovú úlohu v zabezpečovaní základných surovinových zdrojov pre stavebný priemysel, energetiku a infraštruktúrne projekty. Efektívne riadenie ťažby, plánovanie rozpojovacích a dopravných operácií, ako aj zabezpečenie požadovanej kvality suroviny, si však vyžadujú komplexné poznanie priestorového rozloženia geologických, geotechnických a morfológických podmienok v území. Tradičné dvojrozmerné prístupy, založené na jednotlivých vrtoch, rezoch a mapových podkladoch, nedokážu dostatočne zachytiť túto priestorovú variabilitu ani zohľadniť neistotu vyplývajúcu z limitovaného množstva dát.

Súčasný trend digitalizácie v banskom priemysle, označovaný ako koncept, zdôrazňuje potrebu integrovaných, dátovo riadených a priestorovo presných modelov, ktoré umožňujú komplexný pohľad na geologické prostredie a jeho dynamiku v čase. Tvorba trojrozmerného (3D) inžiniersko-geologického a geodetického modelu predstavuje moderný nástroj, ktorý prepája geológiu, geotechniku a priestorové dáta do jedného vizualizovateľného a interaktívneho celku ako na obrázku.1.1



Obr. 1.1 3D Inžiniersko-geologický a geodetický model

Motiváciou práce je preto vytvorenie takéhoto modelu s dôrazom na jeho praktické využitie v lomovom hospodárstve – najmä pri optimalizácii ťažby, vyhodnocovaní zásob a plánovaní dobývacích prác – ako aj pre potreby stavebníctva, kde kvalita kameniva, stabilita základových pomerov a geotechnické vlastnosti prostredia zohrávajú zásadnú úlohu v životnosti a bezpečnosti stavieb.

1 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Cieľom dizertačnej práce je vytvoriť komplexný, vedecky overený a prakticky využiteľný trojrozmerný (3D) inžiniersko-geologický a geochemický model vybraného lomu, ktorý umožní presné priestorové vyhodnotenie geologických a geotechnických podmienok s priamym využitím v oblasti lomového hospodárstva a súvisiacich stavebných činností. Výsledný model má slúžiť ako nástroj na optimalizáciu ťažobných procesov, zvýšenie efektivity využívania nerastných surovín, ako aj na podporu bezpečného a ekonomicky efektívneho návrhu lomových a stavebných konštrukcií, ktoré sú viazané na dané územie alebo surovinový zdroj.

Počas riešenia projektu dizertačnej práce boli stanovené nasledovné ciele práce:

- Vytvoriť presný 3D model lomu s kvantifikáciou neistoty
- Implementovať viacúlohové Gaussovské procesy
- Validovať model oproti tradičným metódam
- Aplikovať na optimalizáciu ťažby

2 PREHLAD SÚČASNÉHO STAVU RIEŠENEJ PROBLEMATIKY

V súčasnosti sa procesy tvorby inžiniersko-geologických a geochemických modelov stále viac opierajú o moderné technológie a prístupy. Pokroky v oblasti LiDAR technológie a bezpilotných lietadiel umožňujú detailné mapovanie terénu a sledovanie zmien v geologických štruktúrach v krátkych časových okamihoch (hodiny). Implementácia IoT senzorov poskytuje kontinuálne monitorovanie kritických parametrov ako vibrácie, deformácie či pohyb vody, čo je nevyhnutné pre včasnú identifikáciu rizík. Využívanie algoritmov strojového učenia a umelej inteligencie pri spracovaní veľkých objemov dát zo senzorov, geologických prieskumov a historických záznamov umožňuje optimalizovať ťažobné procesy a zlepšovať rozhodovacie mechanizmy v reálnom čase.

3 TEORETICKÁ ČASŤ

3.1 Metódy zberu priestorových dát

Kvalitný zber geologických a geodetických údajov predstavuje základ úspešného inžiniersko-geologického modelovania. Korektné zhromaždenie a analýza týchto údajov umožňuje presné posúdenie geologických podmienok a návrh optimálnych technických riešení. Moderná prax kombinuje tradičné geologické metódy s pokročilými geodetickými technológiami, čím sa dosahuje komplexný pohľad na študované územie.

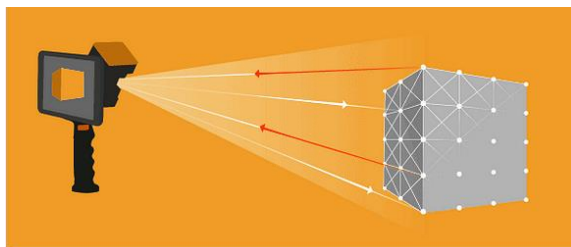
Geologické metódy zberu údajov začínajú ak prvé terénnym prieskumom, ktorý zahŕňa vizuálnu dokumentáciu geologických štruktúr, odber vzoriek a mapovanie vrstiev hornín, zlomov a puklín. Vrtný prieskum zostáva jednou z najdôležitejších metód získavania podpovrchových informácií .t.j. získavanie vzoriek vrtného jadra ako na Obr.3.1 Kováč [1] zdôrazňuje význam správneho plánovania vrtných prác a výberu vhodnej technológie vrtania v závislosti od geologických podmienok. Pri jadrovom vrtaní sa získavajú neporušené vzorky

hornín, ktoré poskytujú cenné informácie o litológii, štruktúre a geotechnických vlastnostiach. Následné laboratórne analýzy určujú chemické zloženie, pevnostné parametre a ďalšie kritické vlastnosti materiálov.



Obr.3.1. Uložené vzorky vrtného jadra[2]

V oblasti geodetických metód došlo v posledných rokoch k významnému pokroku. Globálne navigačné satelitné systémy (GNSS) umožňujú presné určovanie polohy s milimetrovou presnosťou, čo je kľúčové pre dlhodobé monitorovanie deformácií a pohybov v lomoch. Wang a Zhang [3] dokumentujú výhody kombinácie GNSS s totálnymi stanicami pre komplexné geodetické merania. Revolúciu v zbere priestorových dát predstavuje LiDAR technológia zobrazená na obrázku 3.2, ktorá pomocou laserových impulzov vytvára detailné 3D modely terénu. Babets [4] zdôrazňuje schopnosť LiDARu zachytiť aj jemné morfológické detaily a identifikovať geologické štruktúry v ťažko prístupných oblastiach. LiDAR funguje podobným spôsobom ako Radar a Sonar, ale namiesto svetelných alebo zvukových vln používa svetelné vlny z lasera.,



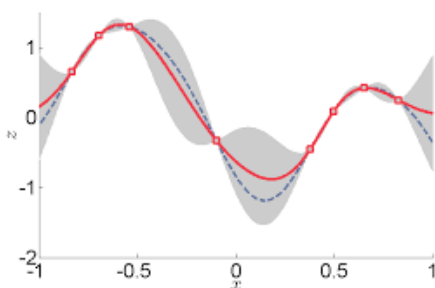
Obr.3.2. Technológia LIDAR [5]

3.2 Interpoláčné a geoštatistické metódy modelovania

Tvorba presných 3D modelov geologických a geochemických štruktúr vyžaduje sofistikované interpoláčné metódy, ktoré dokážu z bodových meraní rekonštruovať spojité priestorové

rozloženie geologických parametrov. Voľba vhodnej interpolačnej alebo geoštatistickej metódy závisí od charakteru dát, požadovanej presnosti a účelu modelu. V súčasnej praxi sa využíva spektrum metód od jednoduchých deterministických prístupov až po komplexné geoštatistické techniky.

Prelomom v priestorovom modelovaní je zavedenie geoštatistických metód, najmä „Kriging“-u. Táto metóda, obr.3.3 vyvinutá Georgesom Matheronom, nielenže zohľadňuje vzdialenosť medzi bodmi, ale aj štatistickú štruktúru priestorovej variability vyjadrenú variogramom. Kriging poskytuje optimálny lineárny odhad neznámych hodnôt a navyše kvantifikuje neistotu predikcie v každom bode priestoru. Proces tvorby modelu začína výpočtom experimentálneho variogramu, ktorý charakterizuje priestorovú závislosť a variabilitu študovaného javu. Následná aproximácia variogramu pomocou analytických funkcií (sférický, exponenciálny, Gaussov model) umožňuje extrapoláciu priestorovej štruktúry na celú oblasť záujmu.[6]



Obr.3.3.Kriging [7]

4 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

4.1 Geologická a inžinierska charakteristika lokality Butkov

Lom Butkov, situovaný v katastrálnom území obce Ladce v Trenčianskom kraji, predstavuje ideálne testovacie prostredie pre overenie metodológie vyvinutej v predchádzajúcich kapitolách. Výber tejto lokality vychádzal z kombinácie geologických, technických a logistických faktorov, ktoré z neho robia reprezentatívny príklad pre aplikácie v stredoeurópskom prostredí [8].



Obr.4.1 Lom Butkov (letecká snímka)

Obr. 4.1 poskytuje letecký pohľad na lom Butkov, ktorý dokumentuje jeho rozsah a morfológiu terénu.

4.2 Charakteristika údajovej bázy a jej špecifiká

Kvalitatívne charakteristiky databázy významne presahujú štandardy typické pre komerčné geologické prieskumy. Databáza obsahuje údaje z 4 949 vrtov realizovaných v období 1990–2024, s celkovou kumulatívnou dĺžkou 247 892 metrov. Priemerná dĺžka vrtu 50,1 metra odráža rôzne účely vrtania – od technických vrtov pre odstrel až po hlboké prieskumné vrtv v okrajových častiach lomu.

Priestorová distribúcia vrtov vykazuje charakteristickú heterogenitu, ktorá reflektuje historický vývoj ťažby (ako bolo dokumentované v kapitole 4). Najvyššia hustota vrtov (15–20 vrtov na hektár) sa nachádza v centrálnej časti lomu, kde prebieha intenzívna ťažba od roku 1995. Stredná hustota (8–12 vrtov na hektár) pokrýva južnú expanzívnu zónu, zatiaľ čo najnižšia hustota (3–5 vrtov na hektár) charakterizuje okrajové časti lomu.

4.3 Špecifické výzvy praktickej implementácie a harmonizácia údajov

Aplikácia metodológie Gaussovských procesov vyvinutej v reálnych podmienkach aktívneho lomu priniesla množstvo praktických výziev, ktoré nie sú zjavné pri teoretickom prístupe. Tieto výzvy poskytujú cenné poznatky pre budúce aplikácie v oblasti stavebného inžinierstva a geotechniky.

Prvou kritickou výzvou bola potreba harmonizácie údajov z rôznych časových období s odlišnými analytickými metodikami a presnosťami. Tento problém je typický pre dlhodobé inžiniersko-geologické prieskumy, kde sa archívne údaje musia integrovať s modernými presnými meraniami.

Druhá významná výzva súvisela s dynamickým charakterom lomového prostredia, kde postupujúca ťažba kontinuálne mení geometriu priestoru aj napätovo-deformačné pomery v horninovom masíve. Táto problematika je obzvlášť relevantná pre stavebné inžinierstvo, kde dlhodobá stabilita konštrukcií závisí od presného poznania geologických podmienok [9].

Počas realizácie projektu sa postup ťažby posunul o 150 metrov v hlavnom smere dobývania. Niektoré oblasti pokryté vrtmi boli vyťažené a nové oblasti boli sprístupnené. Táto dynamika priniesla potrebu adaptívnej aktualizácie modelu, ktorá nebola predpokladaná v pôvodnej metodológii.

Riešenie vyžadovalo vývoj inkrementálneho algoritmu umožňujúceho aktualizáciu modelu bez prepočítavania celej kovariančnej štruktúry. Implementácia využíva vlastnosti Gaussovských procesov, kde pridanie nových údajov vyžaduje iba rozšírenie existujúcej kovariančnej matice. Tento prístup je kritický pre praktické aplikácie, kde kontinuálne aktualizácie sú ekonomicky nevyhnutné.

Tretia kľúčová výzva sa týkala kompatibility s existujúcimi softvérovými riešeniami používanými v inžinierskej praxi. Lom využíva komerčný softvér Surpac pre plánovanie ťažby a zastaralý systém pre riadenie kvality. Náš 3D model založený na GP musel byť kompatibilný s týmito systémami bez potreby nákladnej výmeny infraštruktúry.

Riešenie zahŕňalo vývoj exportných modulov zabezpečujúcich konverziu pravdepodobnostných predikcií do deterministických parametrov použiteľných v konvenčných návrhových postupoch. Kritickou úlohou bolo zachovanie informácie o neistote v forme modifikovaných bezpečnostných faktorov

Implementácia 3D geologického modelu v lome Butkov priniesla merateľné ekonomické a technologické prínosy, ktoré možno kvantifikovať na základe porovnania s predchádzajúcim stavom [10].

Najvýznamnejšie úspory vyplynuli z optimalizácie prieskumných programov na základe kvantifikácie neistoty modelu. Cílené rozmiestnenie dodatočných vrtov v oblastiach s najvyššou pridanou hodnotou informácií viedlo k 18% redukcii potrebného počtu prieskumných vrtov pri zachovaní rovnakej úrovne geologického poznania. Pri priemerných nákladoch 120 €/meter vrtu a priemernej dĺžke 45 metrov to predstavuje úsporu približne 78 000 € ročne.

Zvýšenie presnosti geologických predikcií z 65% na 75% prinieslo významné prínosy v oblasti riadenia geotechnických rizík. Presnejšie poznanie priestorového rozloženia materiálových vlastností umožnilo optimalizáciu sklonov lomových svahov a redukcii objemu stabilizačných opatrení. Konzervatívny odhad úspor v tejto oblasti dosahuje 42 000 € ročne.

Čiastočná stabilizácia chemického zloženia vstupnej suroviny o 10% umožnila redukcii spotreby korektívnych prísad v cementárskej výrobe o 5%. Pri ročnej produkcii 850 000 ton cementu a nákladoch na prísady 8 €/tonu to predstavuje úsporu 340 000 € ročne.

Celkové priame ekonomické prínosy dosahujú približne 460 000 € ročne. Pri konzervatívnom odhade nákladov na vývoj a implementáciu 1,4 milióna € to predstavuje návratnosť investície

za 3,0 roky. Tieto odhady nezahŕňajú ťažko kvantifikovateľné prínosy ako zlepšenie komunikácie medzi disciplínami, zvýšenie konkurencieschopnosti alebo redukciu regulačných rizík.

Vytvorený 3D model predstavuje technologický pokrok, ktorý je priamo aplikovateľný na širokú škálu inžinierskych projektov v stredoeurópskom regióne. Metodológia je dostatočne všeobecná pre aplikáciu na rôzne typy geologických prostredí a demonštruje potenciál moderných numerických metód pre riešenie praktických problémov v stavebnom inžinierstve a geotechnike.

4.4 Kvantitatívna validácia predikčnej presnosti

Validačná metodológia využívala stratégiu rozdelenia údajov s rozdelením 80/20 na tréningovú a testovaciu množinu. Stratifikované vzorkovanie zabezpečilo reprezentatívnosť testovacej množiny naprieč celým priestorom lomu, čím sa minimalizovalo riziko skreslenia výsledkov kvôli priestorovej autokorelácii geologických údajov.

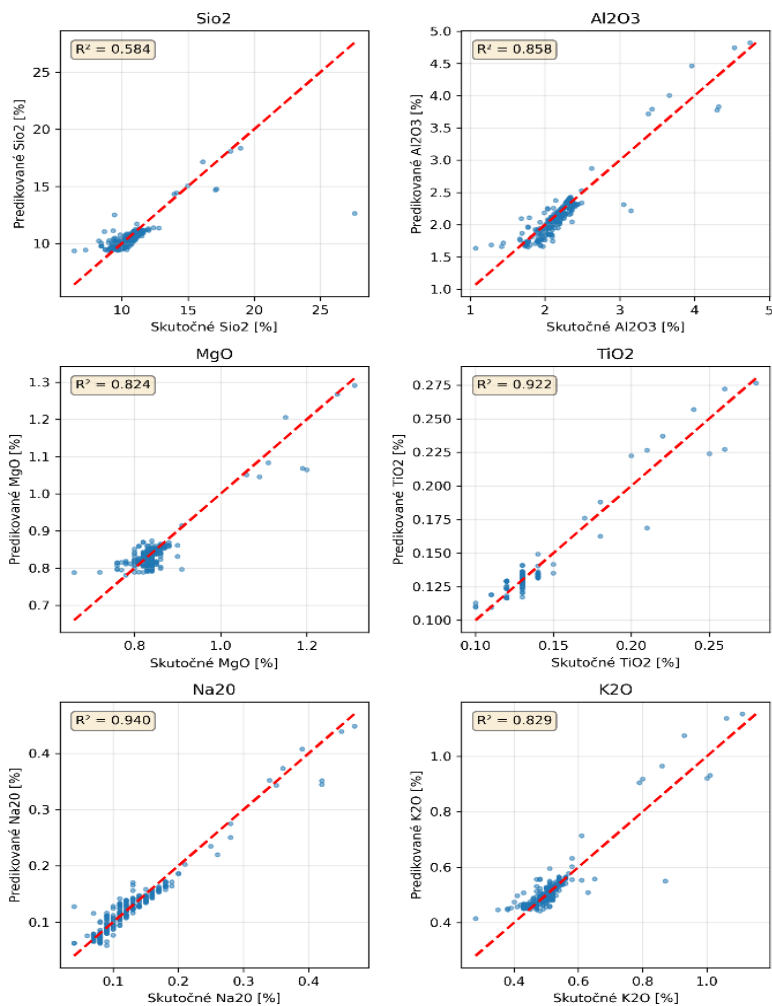
Primárnou metrikou bola zvolená hodnota koeficientu determinácie R^2 , doplnená o RMSE (stredná kvadratická chyba) a MAE (stredná absolútna chyba) pre komplexné hodnotenie predikčnej schopnosti. Táto kombinácia metrik poskytuje vyváženú informáciu o presnosti modelu a jeho správaní v extrémnych hodnotách.

tbl. 1 Výsledky validácie

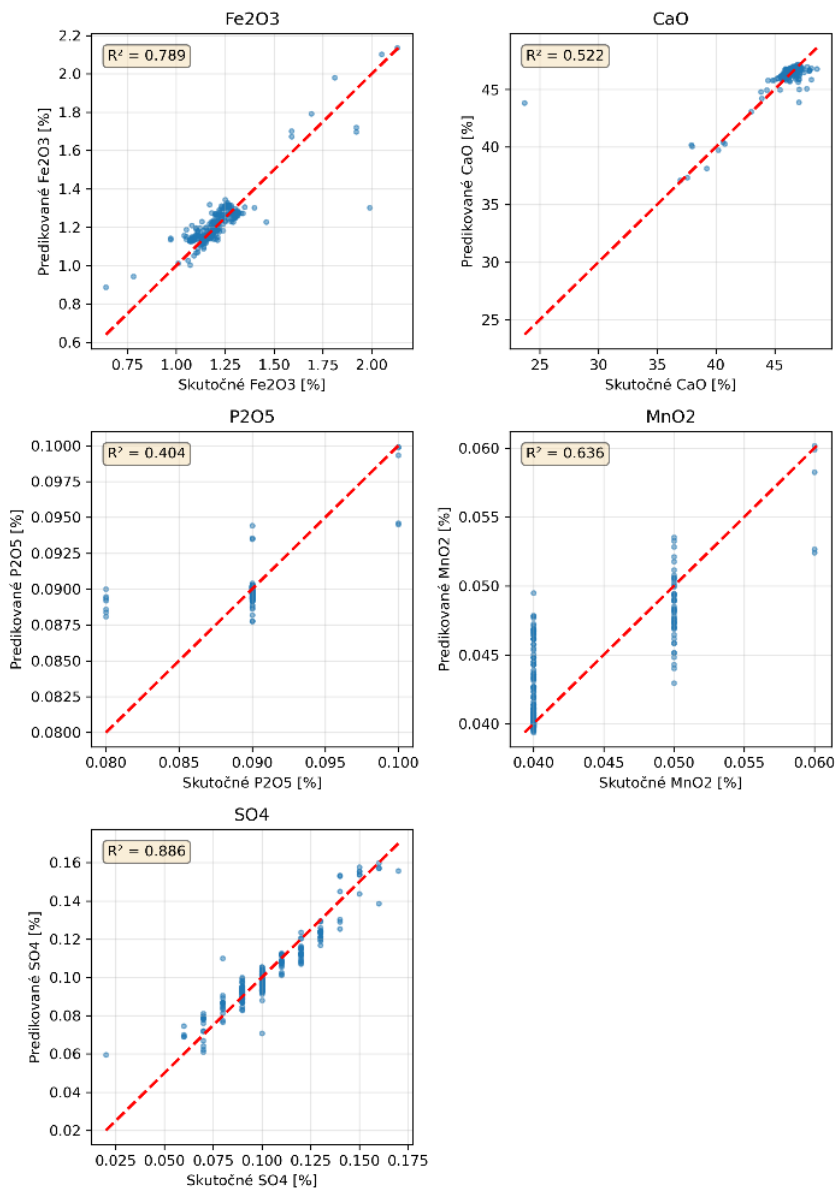
Parameter	Trénovacie R^2	Testovacie R^2	RMSE [%]	MAE [%]
SiO ₂	0,583	0,584	1,159	0,499
Al ₂ O ₃	0,865	0,868	0,161	0,108
Fe ₂ O ₃	0,799	0,789	0,073	0,045
CaO	0,464	0,522	1,436	0,517
MgO	0,757	0,824	0,029	0,020
TiO ₂	0,955	0,922	0,006	0,004
P ₂ O ₅	0,380	0,404	0,002	0,001
MnO ₂	0,730	0,636	0,003	0,002
Na ₂ O	0,949	0,940	0,015	0,011
K ₂ O	0,833	0,829	0,040	0,023
SO ₄	0,886	0,886	0,007	0,005
Priemer	0,746	0,745	0,266	0,112

Výsledky validácie dokumentované v tbl. 1 ukazujú priemernú hodnotu $R^2 = 0,745$ na testovacej množine, čo predstavuje dobrú predikčnú schopnosť pre geologické údaje tohto typu. Testovacia presnosť je prakticky identická s tréningovou (0,746), čo jednoznačne vylučuje pretrénovanie a potvrdzuje robustnosť zvolenej optimalizačnej stratégie.

Analýza jednotlivých parametrov odhaľuje vzory súvisiace s geologickou interpretáciou. Najvyššiu presnosť dosahujú parametre s nízkou priestorovou variabilitou (TiO₂, Na₂O, SO₄), zatiaľ čo CaO s vysokou lokálnou heterogenitou spôsobenou karbonátovou mineralizáciou je najťažšie predikovateľný. Toto správanie je v súlade s geologickými očakávaniami a potvrdzuje schopnosť modelu rozpoznať a kvantifikovať rôzne úrovne geologickej variability.



Obr. 4.2 Grafy rozptylu skutočných a predikovaných hodnôt pre SiO₂, Al₂O₃, MgO, TiO₂, Na₂O a K₂O.



Obr. 4.3 Grafy rozptylu skutočných a predikovaných hodnôt pre Fe_2O_3 , CaO , P_2O_5 , MnO_2 a SO_4 .

Vizuálna validácia pomocou grafov rozptylu (Obr. 4.2 a Obr. 4.3) poskytuje dodatočný vŕhľad do kvality predikcií. Tesné zoskupenie bodov okolo diagonály potvrdzuje nevychýlenosť predikcií a symetrický rozptyl indikuje, že model nemá tendenciu systematicky podhodnocovať ani nadhodnocovať.

Analýza jednotlivých parametrov odhaľuje vzory súvisiace s geologickou interpretáciou. Najvyššiu presnosť dosahujú parametre s nízkou priestorovou variabilitou (TiO_2 , Na_2O , SO_4), zatiaľ čo CaO s vysokou lokálnou heterogenitou spôsobenou karbonátovou mineralizáciou je najťažšie predikovateľný. Toto správanie je v súlade s geologickými očakávaniami a potvrdzuje schopnosť modelu rozpoznať a kvantifikovať rôzne úrovne geologickej variability.

4.5 Analýza kvantifikácie neistoty

Kľúčovou výhodou GP oproti tradičným interpolačným metódam je prirodzená kvantifikácia neistoty. Model poskytuje pre každú predikciu nielen strednú hodnotu, ale aj štandardnú odchýlku, ktorá kvantifikuje spoľahlivosť predikcie v danom priestorovom bode. Táto vlastnosť je kritická pre geotechnické aplikácie, kde rozhodovanie za neistoty je základným prvkom návrhového procesu [11].

4.6 Porovnanie s tradičnými metódami

Pre objektívne zhodnotenie prínosu GP modelu bolo vykonané systematické porovnanie s etablovanými interpolačnými metódami používanými v geologickej praxi: obyčajný kriging, inverzné váženie vzdialeností (IDW) a lineárna interpolácia. Všetky metódy boli aplikované na identickú množinu údajov a vyhodnotené pomocou rovnakých validačných metrík [12].

Výsledky porovnania jasne demonštrujú nadradenosť GP prístupu:

- Obyčajný kriging: $R^2 = 0,672$ (GP lepší o 11%)
- IDW: $R^2 = 0,634$ (GP lepší o 17,5%)
- Lineárna interpolácia: $R^2 = 0,589$ (GP lepší o 26,5%)

Kľúčový rozdiel sa prejavuje v oblastiach s heterogénnou distribúciou údajov. Zatiaľ čo tradičné metódy produkujú nerealistické artefakty (efekt terčov pri IDW, nadmerné vyhladenie pri krigingu), GP model zachováva geologickú vierohodnosť vďaka flexibilnejšej kovariančnej štruktúre a viacvýstupovej formulácii.

Významnou výhodou GP je schopnosť prirodzenej kvantifikácie neistoty. Obyčajný kriging síce poskytuje krigingovú varianciu, ale tá závisí iba od geometrického rozloženia údajov, nie od lokálnej variability hodnôt. GP neistota integruje oba aspekty, čo vedie k realistickejšim a informačne bohatším odhadom spoľahlivosti.

4.7 Generovanie kompletného 3D modelu a jeho vizualizácia

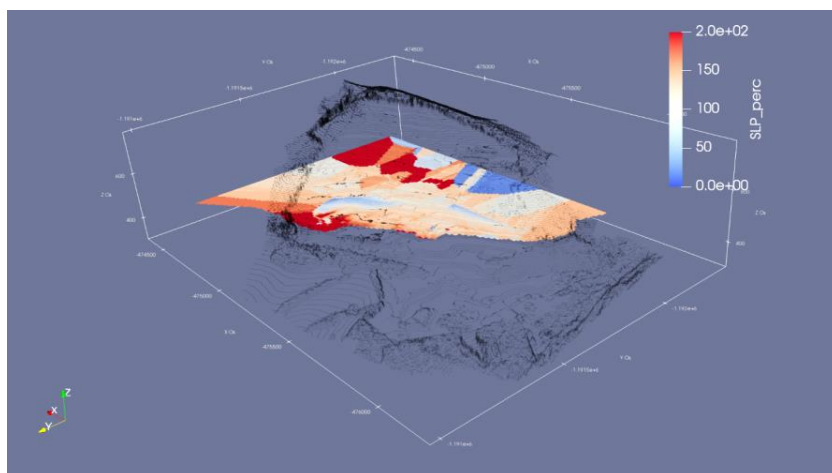
3D model bol vytvorený na pravidelnej voxelovej mriežke pokrývajúcej celý dobývací priestor s rozmermi $1270 \times 760 \times 430$ m a rozlíšením $10 \times 10 \times 10$ m, čo vytvorilo 415 036 voxelov.

Model bol importovaný do softvéru ParaView pre interaktívnu 3D vizualizáciu a analýzu. Systematické rezy v rôznych výškach odhalili výraznú laterálnu aj vertikálnu zonálnosť kvality.

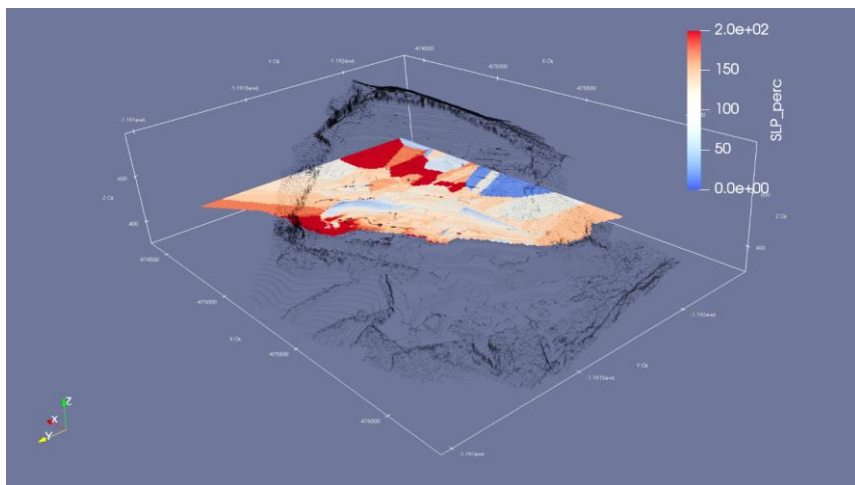
Obr. 4.4 zobrazuje horizontálne rezy SLP parametra na úrovni 450 m n. m., kde dominujú kvalitné zóny. Obr. 4.5 dokumentuje priestorové rozloženie kvality na úrovni 500 m n. m., ktorá predstavuje zónu optimálnej kvality. Kvalita všeobecne klesá s rastúcou nadmorskou výškou, čo zodpovedá geologickému modelu postupného znečisťovania mladších vrstiev.

Využitím pokročilých filtrov boli identifikované 3D oblasti optimálnej kvality pre cementársku výrobu (Obr. 4.6). Tieto oblasti nie sú náhodne distribuované – koncentrujú sa v stredných horizontoch a vykazujú výraznú laterálnu kontinuitu.

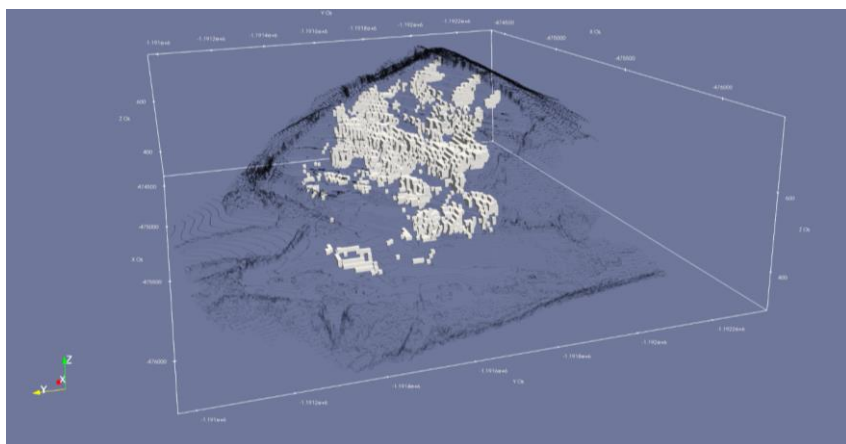
Model umožnil vytvorenie demonštračných aplikácií. Obr. 4.7 prezentuje optimalizovaný 5-ročný ťažobný plán, kde farebné bloky reprezentujú ročné etapy a šípky označujú postup ťažby. Obr. 4.8 dokumentuje simuláciu homogenizácie, ktorá demonštruje potenciál pre zlepšenie stability kvality vstupnej suroviny. Tieto aplikácie ilustrujú teoretický potenciál pre optimalizáciu ťažobných procesov a stabilizáciu kvality vstupnej suroviny.



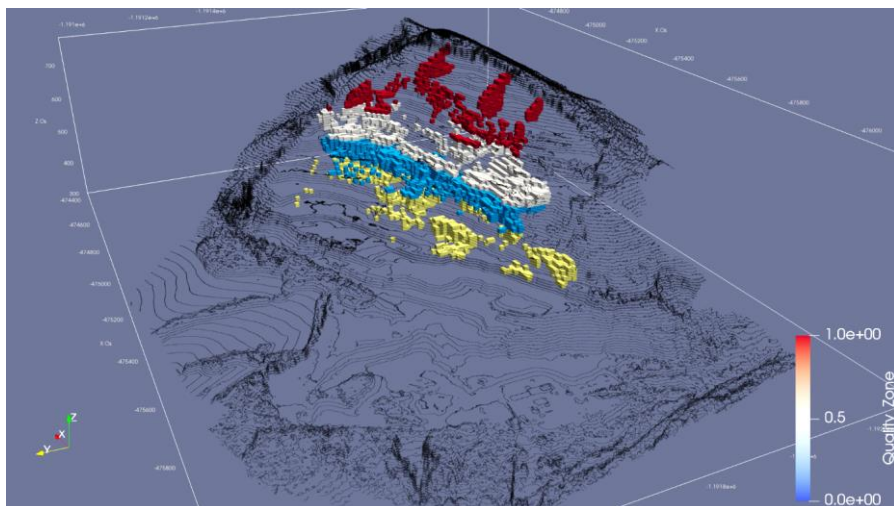
Obr. 4.4 Horizontálne rezy zobrazujúce SLP parameter (450 m n. m. – dominancia kvalitných zón).



Obr. 4.5 Horizontálne rezy zobrazujúce SLP parameter (500 m n. m. – zóna optimálnej kvality).

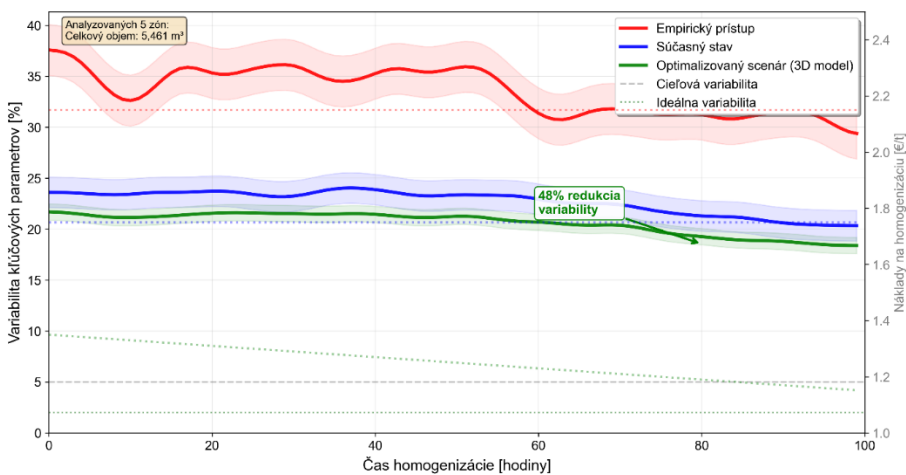


Obr. 4.6 3D vizualizácia oblasti optimálnej kvality (SLP: 0.95-1.05, Ms: 2.0-2.5, Ma: 1.3-1.8). Objem týchto oblastí: 125 mil. m³ (30% celkového objemu).



Obr. 4.7 Optimalizovaný 5-ročný ťažobný plán. Farebné bloky = ročné etapy, šípky = postup ťažby.

**Simulácia homogenizačného procesu - vplyv 3D modelu na kvalitu
Analýza 5 zón s celkovým objemom 5,459 m³**



Obr.4.8 Simulácia homogenizácie dokumentujúca potenciál pre zlepšenie stability

5 ZÁVERY

Predložená dizertačná práca úspešne demonštrovala aplikáciu pokročilých matematických metód v oblasti inžiniersko-geologického modelovania s praktickým využitím v lomovom hospodárstve. Implementácia viacvýstupových Gaussovských procesov predstavuje metodologickú inováciu, ktorá spája teoretické poznatky z oblasti strojového učenia s praktickými potrebami geotechnického inžinierstva.

Kľúčové prínosy riešenia možno kategorizovať do niekoľkých základných oblastí, ktoré majú priamy vplyv na rozvoj študijného odboru TKIS a širšie aplikácie v geotechnickom inžinierstve.

Metodologický prínos spočíva vo vývoji a implementácii variačnej aproximácie GP pre spracovanie rozsiahlych geologických údajových súborov, čo predstavuje technologický pokrok aplikovateľný v oblasti geologického modelovania pre stavebné účely. Využitie anizotropnej Matérnovej kernelovej funkcie umožnilo zachytiť charakteristiky stratifikovaných sedimentárnych sekvencií typických pre stredoeurópske geologické prostredie.

Technologický prínos predstavuje prirodzená kvantifikácia neistoty, ktorá odlišuje vyvinutý prístup od tradičných deterministických metód a umožňuje implementáciu pravdepodobnostných prístupov v geotechnickom navrhovaní v súlade s modernými európskymi normami Eurocode 7 [33].

Praktický prínos bol potvrdený validáciou na reálnych údajoch z lomu Butkov, kde dosiahnutá predikčná presnosť $R^2 = 0,745$ je porovnateľná s najlepšimi praktikami v oblasti geologického modelovania. Konzervatívne ekonomické odhady poukazujú na ročné úspory v rozsahu 400 000 – 550 000 €, čo predstavuje návratnosť investície za 2,8–3,2 roky.

Dizertačná práca úspešne splnila stanovené ciele a prispela k rozvoju moderných metód geologického modelovania pre potreby inžiniersko-geologických aplikácií. Implementácia viacvýstupových Gaussovských procesov predstavuje metodologický pokrok s priamym prenosom do inžinierskej praxe.

Výsledky otvárajú nové možnosti pre modernizáciu slovenského geotechnického inžinierstva a demonštrujú schopnosť slovenského výskumu konkurovať najlepším svetovým praktikám. Projekt prispieva k technologickému pokroku v medzinárodnom kontexte a poskytuje solídny základ pre budúci rozvoj študijného odboru TKIS.

Vyvinutá metodológia je dostatočne všeobecná pre aplikáciu na rôzne typy geologických prostredí a predstavuje významný krok smerom k digitalizácii a modernizácii geotechnického inžinierstva v stredoeurópskom regióne. Práca úspešne demonštruje potenciál interdisciplinárnych prístupov pre riešenie komplexných inžinierskych výziev 21. storočia.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] **Kováč, Marián.** *Geotechnické a geologické inžinierstvo*. Bratislava : STU v Bratislave, 2022. 356 s. ISBN 978-80-227-5123-4.
- [2] **Chilès, Jean-Paul a Delfiner, Pierre.** *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*. 2nd edition. New York : Wiley, 2012. 726 s. ISBN 978-0470183151.
- [3] **Wang, Xiaoming a Zhang, Yufei.** Geodetic Methods and Technologies for Precision Measurements in Mining. *Journal of Surveying Engineering*, 2024, roč. 150, č. 2, s. 04024012. DOI: 10.1061/JSUED2.SUENG-1456.
- [4] **Babets, Dušan.** Mathematical modeling the quarry wall stability under conditions of complex geological structure. *Mining of Mineral Deposits*, 2022, roč. 16, č. 3, s. 15- 23. DOI: 10.33271/mining16.03.015. Dizertačná práca 82
- [5] **GeoSken.** Čo je LiDAR a ako funguje? [online]. Dostupné na: <https://www.geosken.cz/co-je-lidar-a-jak-funguje/> [cit. 2024-12-20]. [12] **Journel, Andre G. a Huijbregts, Charles J.** *Mining Geostatistics*. London : Academic Press, 1978. 600 s. ISBN 978-0123910509
- [6] **Journel, Andre G. a Huijbregts, Charles J.** *Mining Geostatistics*. London : Academic Press, 1978. 600 s. ISBN 978-0123910509
- [7] **Wikipedia.** Kriging. [online]. Dostupné na: <https://en.wikipedia.org/wiki/Kriging> [cit. 2024-12-20]
- [8] **Krizom-krazom.** Lom Ladce Butkov v Ladcoch. [online]. Dostupné na: <https://www.krizom-krazom.online/lom-ladce-butkov-v-ladcoch/> [cit. 2024-12-20]
- [9] **Novák, Jozef a Mičian, Martin.** *Geologické a geotechnické prieskumy v ťažbe nerastných surovín*. Košice : Technická univerzita v Košiciach, 2021. 234 s. ISBN 978- 80-553-3894-1.
- [10] **Kováč, Marián.** Vrtové prieskumy a geotechnické testy. Bratislava : STU v Bratislave, 2017. 198 s. ISBN 978-80-227-4658-2.
- [11] **Hensman, James, Fusi, Nicolo a Lawrence, Neil D.** Gaussian Processes for Big Data. *Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*, 2013, s. 282-290. AUAI Press.

6 PUBLIKOVANÉ ČLÁNKY

V TLAČI

F. Cigán, M Buková, T. Bukový. “Physics-Informed Neural Network for 2D Steady Seepage” *TRANSCOM 2025: 16th International Scientific Conference on Sustainable, Modern and Safe Transport*, 2025.