



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

**Simulace lokálních variací geomagnetického pole pro gradiometrickou detekci
kovových předmětů pod povrchem.**

**Simulations of localised variations in Earth's magnetic field for gradiometric
survey to detect sub-surface metallic objects.**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**

Studijní obor: **Elektrotechnika a management**

Vedoucí práce: **Mgr. Jan Zemen, Ph.D.**

Ekonomický konzultant: **Ing. Michaela Makešová**

Technický konzultant: **Ing. Tomáš Tichý**

Jakub Bulíček

Praha 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bulíček** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **483864**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektrotechnika a management**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Simulace lokálních variací geomagnetického pole pro gradiometrickou detekci kovových předmětů pod povrchem.

Název bakalářské práce anglicky:

Simulations of localised variations in Earth's magnetic field for gradiometric survey to detect sub-surface metallic objects.

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s technologiemi gradiometrické detekce variací geomagnetického pole.
 - 2) Seznamte se s numerickou metodou konečných prvků (v programu Comsol Multiphysics).
 - 3) Simulujte profil magnetického pole na povrchu země v okolí ukrytého kovového objektu.
 - 4) Srovnajte efektivnost investice u firmy zabývající se pyrotechnickými průzkumy:
 - a) Při investici do samotného magnetometru s jednou měřicí sondou;
 - b) Při investici do měřicího systému obsahujícího magnetometr s šesti měřicími sondami umístěný na nosném zařízení, který je tažen pracovním vozidlem;
- Poznámky: Konzultantkou ekonomické části je Ing. Michaela Makešová, Katedra obhajoby je K13116

Seznam doporučené literatury:

- [1] Deng, Elijah Achuoth, Kennedy O. Doro, and Carl-Georg Bank. 'Suitability of magnetometry to detect clandestine buried firearms from a controlled field site and numerical modeling.' *Forensic Science International* 314 (2020): 110396.
- [2] Veryaskin, Alexey V. *Gravity, Magnetic and Electromagnetic Gradiometry: Strategic Technologies in the 21st Century*. Morgan & Claypool Publishers, 2018.
- [3] Kumar, S., et al. 'Real-time tracking magnetic gradiometer for underwater mine detection.' *Oceans' 04 MTS/IEEE Techno-Ocean'04* (IEEE Cat. No. 04CH37600). Vol. 2. IEEE, 2004.
- [4] Vyhnanek, Jan, Michal Janošek, and Pavel Ripka. 'AMR gradiometer for mine detection.' *Sensors and Actuators A: Physical* 186 (2012): 100-104.
- [5] Bourgeois, J. R., and Glenn S. Smith. 'A complete electromagnetic simulation of the separated-aperture sensor for detecting buried land mines.' *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 46.10 (1998): 1419-1426.
- [6] Yoo, Lee-Sun, et al. 'A Drone Fitted with a Magnetometer Detects Landmines.' *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* (2020).
- [7] <https://www.terradat.co.uk/survey-methods/magnetics/>
- [8] <https://www.comsol.com/model/magnetic-signature-of-a-submarine-291>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Mgr. Jan Zemen, Ph.D. katedra elektrotechnologie FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **10.02.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20.05.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2023**

Mgr. Jan Zemen, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem k tomu pouze zdroje uvedené na konci práce, a to v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne:

.....

Jakub Bulíček

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu práce Mgr. Janu Zemenovi, PhD. za odborné konzultace, podnětné návrhy a čas při vedení bakalářské práce a panu Ing. Tomáši Tichému za rady a pomoc při tvorbě modelů. Také bych rád poděkoval paní Ing. Michaele Makešové za vedení ekonomické části bakalářské práce. Na závěr bych rád poděkoval firmě AZ Pyro s.r.o. za poskytnutí rad z mnohaletých zkušeností na trhu s pyrotechnickými průzkumy a Mgr. Petru Dostálovi za rady z oblasti geofyziky.

.....

Jakub Bulíček

Abstrakt

Bakalářská práce se zaměřuje na simulaci lokálních variací geomagnetického pole, konkrétně v programu Comsol Multiphysics. Práce obsahuje seznámení se základy gradiometrické detekce kovových předmětů pod povrchem a jeho simulaci. Uvažuje se zde vliv hloubky předmětu pod povrchem a jeho natočení na průběh měřeného signálu. Součástí práce je praktický experiment pro porovnání s výsledky simulovaného modelu.

Klíčová slova

Geomagnetické pole, pyrotechnický průzkum, modelování, numerické simulace, Comsol Multiphysics, metoda konečných prvků, magnetometrie

Abstract

The bachelor thesis focuses on numerical simulations of local variations of the geomagnetic field caused by metallic objects under ground. The Finite Element Method (FEM) as implemented in Comsol Multiphysics is used to solve the model. The work contains an introduction to the basics of gradiometric detection of metallic objects under the surface and its simulation. The influence of the depth of the object under the surface and its rotation on the process of the measured signal is considered here. Part of the work is a practical experiment that is compared with the simulated results.

Key words

Geomagnetic field, pyrotechnic survey, modeling, numerical simulation, Comsol Multiphysics, finite element method, magnetometry

Obsah

ÚVOD	1
1 GRADIOMETRICKÉ DETEKCE VARIACÍ GEOMAGNETICKÉHO POLE	2
1.1 PRINCIP MAGNETOMETRIE	2
1.2 DRUHY PŘÍSTROJŮ	5
2 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ (FEM)	7
2.1 NUMERICKÁ METODA ŘEŠENÍ DIFERENCIÁLNÍCH ROVNIC	7
2.2 COMSOL MULTIPHYSICS	9
3 MODELOVÁNÍ V COMSOL MULTIPHYSICS	10
3.1 VSTUPNÍ PARAMETRY MODELU.....	10
3.2 KONVERGENCE MESHE	11
4 VÝSTUPY JEDNOTLIVÝCH MODELŮ	13
4.1 VÝSTUP MODELOVÁNÍ V COMSOL MULTIPHYSICS.....	13
4.2 VÝSTUP EXPERIMENTU	19
4.3 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A POROVNÁNÍ S EXPERIMENTEM.....	21
5 ROZVOJ FIRMY ZABÝVAJÍCÍ SE PYROTECHNICKÝMI PRŮZKUMY	22
5.1 INVESTICE DO JEDNODUCHÉHO MĚŘÍČÍHO SYSTÉMU	22
5.2 INVESTICE DO KOMPLEXNÍHO MĚŘÍČÍHO SYSTÉMU	24
5.3 POROVNÁNÍ VÝHODNOSTI JEDNOTLIVÝCH INVESTIC	26
ZÁVĚR	27
ZDROJE	28
SEZNAM OBRÁZKŮ	30
SEZNAM TABULEK	31

Úvod

Hlavním cílem této bakalářské práce je simulace lokálních variací geomagnetického pole, konkrétně kovových předmětů. Tyto variace jsou detekovány různými metodami. Jednou z těchto metod detekce kovových předmětů pod povrchem je magnetometrie, která je hojně využívána subjekty zabývajícími se pyrotechnickými průzkumy, a to ať v soukromé či veřejné sféře. Tato měřicí metoda, která pasivně měří velikost magnetického pole Země v daném bodě, je často zaměňována s metalodetekční průzkumnou metodou prováděnou detektory kovů, která pomocí indukovaní magnetického pole v kovovém předmětu vířivými proudy tuto detekci umožňuje.

Vedlejším cílem bakalářské práce je porovnání teoretického výstupu simulované lokální magnetické variace s výstupem praktického měření pro možné využití simulovaného modelu pro odhad, do jaké hloubky je možno detekovat určitý feromagnetický předmět.

V první kapitole je představen základní princip magnetometrického měření, který je téměř každodenní součástí odvětví zabývajících se archeologií, geofyzikou či detekcí kovových předmětů.

V druhé kapitole je popsána metoda konečných prvků, která je využívána simulačním programem využívaným v této práci, na konkrétní rovnici pro popis šíření tepla.

V další kapitole je přiblíženo, jak byly jednotlivé části simulačního modelu v programu COMSOL Multiphysics vytvořeny a jaké parametry byly použity, spolu s řešením problematiky konvergence výsledných hodnot simulovaného vzhledem k časové a hardwarové náročnosti řešení.

Ve čtvrté kapitole jsou zobrazeny výstupy jednotlivých modelů, které byly pro výpočet uvažovány a na závěr dochází k porovnání výsledku simulovaného modelu s praktickým experimentem.

Poslední kapitola se zabývá ekonomickým porovnáním efektivnosti investice firmy, která se zabývá pyrotechnickými průzkumy, do koupi nového přístroje pro magnetometrické měření. Je zde uvažováno jak s finanční náročností investice, pracovní produkcí jednotlivých přístrojů, ale i omezením poptávek pyrotechnických průzkumů na českém trhu.

1 Gradiometrické detekce variací geomagnetického pole

1.1 Princip magnetometrie

Odvětví geofyziky, archeologie anebo například firem zabývajících se hloubkovou detekcí nevybuchlé munice mají jedno společné, součástí jejich práce je lokalizace magnetických anomálií přítomných v magnetickém poli Země. Tyto variace mohou být způsobeny různými zdroji, od přítomnosti samotných feromagnetických kovů, slunečních erupcí nebo rozdíly magnetických vlastností různých typů zemin či hornin. Jednou z metod, kterou jdou změny magnetického pole Země sledovat, je magnetometrie.

Samotné pole Země je vyvoláno pohyby v tekutém jádru Země a je proměnné v čase a prostoru. Tedy na různých místech na Zemi bychom naměřili jiné hodnoty, které by se ještě lišily, zda byly měřeny v ranních či večerních hodinách. Pro eliminaci časových variací při gradiometrickém měření je možno využít gradiometrické metody, která spočívá v použití dvou měřících sond magnetometru místo jedné. [1]

Zatímco pokud bychom měřili daný objekt pomocí jedné měřící sondy, která by měřila hodnotu magnetické indukce v daný moment, je možné při použití dvou nad sebou uložených sond stanovit rozdíl naměřených hodnot magnetické indukce, čímž dochází k potlačení časových variací magnetického pole Země. Principiálně dochází k měření dle následujícího vztahu:

$$\Delta B = B(\vec{r}_1) - B(\vec{r}_2), \quad (1)$$

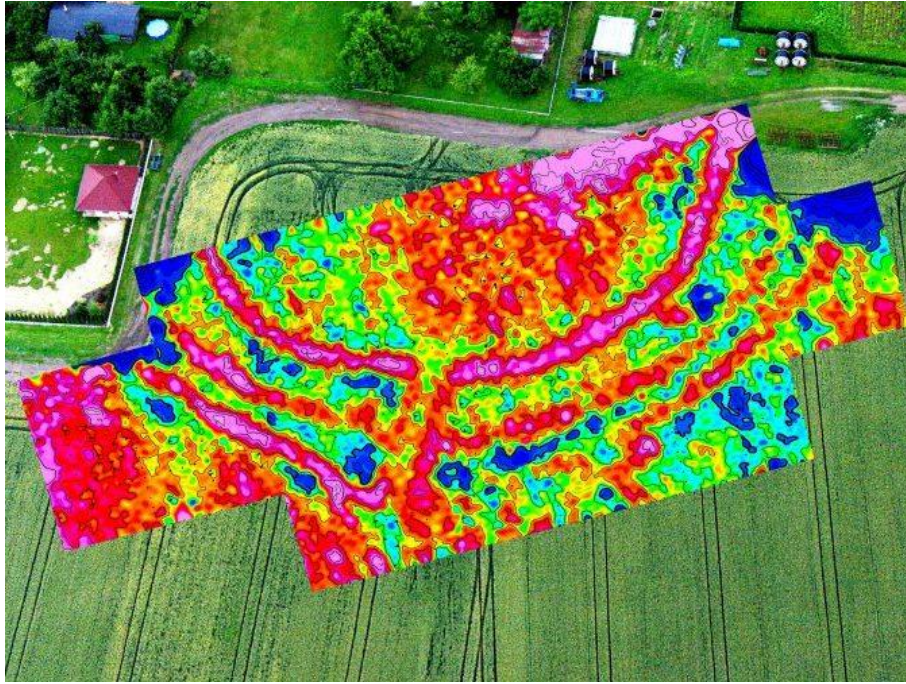
kde $B(\vec{r}_1)$ [T] je magnetická indukce první sondy, $B(\vec{r}_2)$ je magnetická indukce druhé sondy [T], \vec{r}_1 je vektor se souřadnicemi (x_1, y_1, z_1) a \vec{r}_2 je vektor se souřadnicemi (x_2, y_2, z_2) .

U magnetometrických měření v oblastech geofyziky či archeologie, u kterých se měření provádí s přesností na jednotky a někdy až desítky nT, má dopad na výsledné měření také magnetická susceptibilita zeminy, která je dána vztahem

$$\kappa = \frac{M}{H}, \quad (2)$$

kde M [A/m] je velikost magnetizace indukovaná přiloženým polem H [A/m], které odpovídá vnějšímu geomagnetickému poli B_{bg} [T]. Její hodnota se mění z důvodu probíhajících chemických procesů v zeminách, nejvíce zasažena je její povrchová vrstva. Z tohoto důvodu při archeologických průzkumech dochází k odstranění této vrstvy zeminy pro získání nejlepších možných podmínek pro měření.

Zvýšení magnetické susceptibility můžou mít u nižších vrstev za vinu ale také horniny, které prošly žářem, či rozpadlé nádoby a cihly. Správnou interpretací výsledků měření lze odvodit, zda na měřeném úseku došlo v minulosti k umělé úpravě terénu (zasypané příkopy, základy již neexistujících budov, bývalé osady, stavby, aj.). Tuto skutečnost je možno vidět na obrázku 1 níže, který ukazuje zpracované archeologické měření místa, na kterém se v minulosti v průběhu neolitického období nacházelo obydlí. [2]



Obrázek 1 Rondel u Těšovičů-Kyjovic nalezený při archeologickém průzkumu [3]

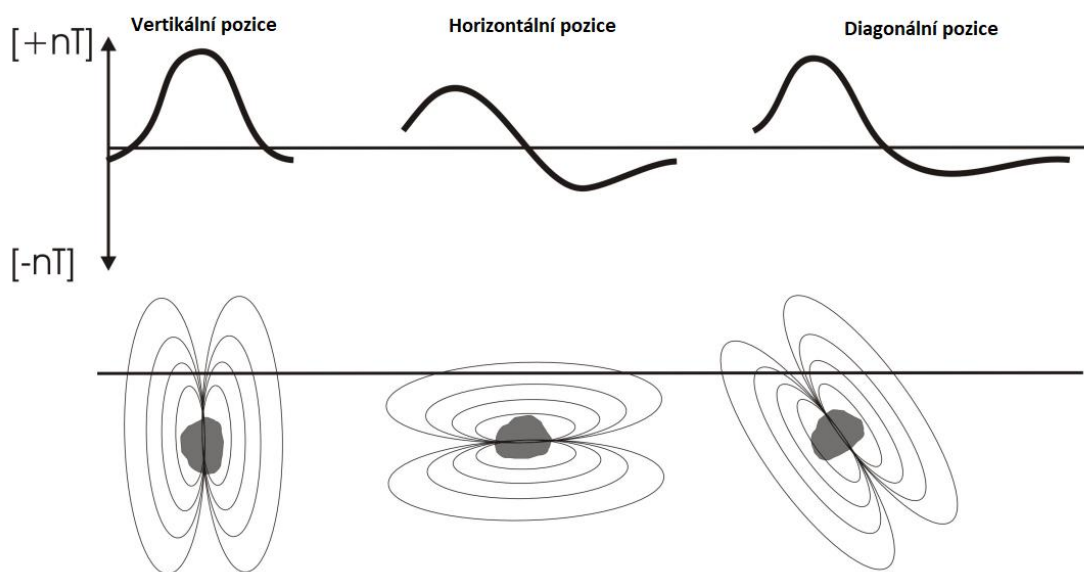
V oblasti detekce nevybuchlé munice se oproti odvětví archeologie či geofyziky může vliv magnetické susceptibility povrchové vrstvy zeminy na měření v některých případech zanedbat, jelikož lokální variace magnetického pole, které jsou způsobeny nevybuchlou municí či jinými kovovými předměty, jsou značně větší než v případě různých typů zemin. Tedy není v tomto případě potřeba měření provádět s citlivostí až desetin nT, ale např. jednotek až desítek nT. Není proto třeba na provádění pyrotechnických průzkumů používat drahé protonové magnetometry s vysokou citlivostí, jakou vyžadují geofyzikální či archeologické měření [4].

Zároveň při průběhu měření je nutno eliminovat co nejvyšší počet předmětů, které by jeho průběh ovlivňovaly. Osoba provádějící měření nesmí mít v blízkosti měřících sond s sebou žádné takovéto předměty, jako například telefon nebo obuv s kovovou špičkou. Přítomnost přenosových soustav má také dopad na měření z důvodu zkreslení okolního magnetického pole. Je třeba si tedy takovéto skutečnosti, které nelze odstranit, poznamenat a zohlednit při zpracovávání výsledků měření. Nemagnetické kovy, jako například hliník, samozřejmě měření neovlivňují.

Výstupem gradiometrických magnetometrických měření bývá v mnoha případech barevná mapa znázorňující průběh rozdílů magnetických indukcí na měřeném úseku. Z takovéto mapy lze sledovat, zda na daném úseku se nevyskytují takové magnetické anomálie, které by mohlo být třeba ověřit. V případě detekce nevybuchlé munice jsou to takové anomálie, které by mohly mít charakter feromagnetických předmětů, které se ve většině případů projevují velkou lokální variací. Je nutno zmínit, že metoda detekce nevybuchlé munice je metodou nepřímou, tedy nelze o každé anomálii předem říci, že se jedná o municí, ale je nutno tuto skutečnost ověřit. [5]

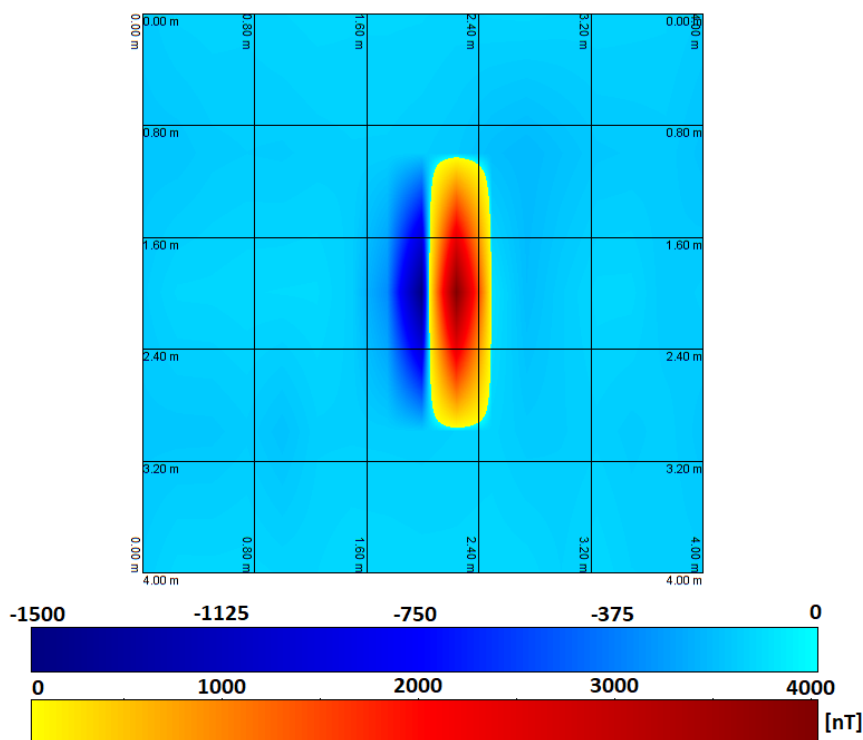
Z výstupu měření lze též odvodit, zda je předmět uložen v malé, či velké hloubce a zároveň jeho přibližné uložení vzhledem ke směru magnetického pole. Na obrázku 2 je znázorněno, jak se průběh naměřených hodnot ΔB_z mění s ohledem na pozici (natočení) předmětu v zemi vůči jeho magnetickému poli. Pokud se předmět nachází v horizontální pozici, je v měření možné sledovat jak kladnou hodnotu naměřené magnetické indukce, tak i její zápornou hodnotu, z důvodu blízkosti obou

polarit magnetického pole předmětu vůči měřicí sondě. Naopak v případě vertikální pozice máme v blízkosti přítomnou pouze jednu polaritu, jejíž velikost ale bude znatelně vyšší než v případě horizontální pozice. Také lze pozorovat, že střed předmětu se v případě diagonální pozice nachází v místě přechodu z jedné polaritě na druhou, a naopak u vertikální pozice se jedná o naměřené maximum při nalezené polaritě. Co se týče diagonální pozice, záleží na úhlu natočení, na jehož velikosti závisí, zda průběh bude mít tvar podobný horizontálnímu uložení nebo se bude přibližovat spíše vertikálnímu uložení. Hloubka uložení předmětu má dopad na velikost lokální variace, ale tvar průběhu bude zachován, tudíž je třeba při vyhodnocování měření si dát pozor, aby vlivem špatného nastavení např. barevného škálování nedošlo k zanedbání této magnetické anomálie v průběhu vyhodnocení získaných dat.



Obrázek 2 Vliv natočení předmětu v zemi na průběh ΔB_z [6]

Z níže uvedeného příkladu grafického výstupu měření při pyrotechnických průzkumech na zemědělské půdě lze sledovat, že krom jedné lokální variace není třeba nic jiného ověřovat, jelikož světle modrá a světle žlutá část barevné škály jsou hodnoty velmi blízké nule, tedy se jedná pouze o variace způsobené vrchní vrstvou zeminy a jejími nerovnostmi. Z měření lze říci, že se zde nachází jedna lokální variace a lze také usoudit, že se jedná o předmět, který se nachází v nízké hloubce a pravděpodobně v horizontální pozici.



Obrázek 3 Příklad grafického výstupu magnetického měření

1.2 Druhy přístrojů

Přístroje používané pro magnetometrické měření jsou magnetometry, které jsou děleny na skalární, které měření hodnotu magnetické indukce bez ohledu na směr, a vektorové, které jsou schopny měřit hodnotu magnetické indukce v daném směru. Technologie magnetometrů samotných, které umožňují tato měření je hned několik.

Jednou z technologií je fluxgate magnetometr, což je vektorový magnetometr, který se skládá ze dvou feromagnetických jader o velké permeabilitě, jež jsou obklopena dvěma toroidy s opačně vinutými polovinami, které jsou umístěny vedle sebe. Tyto vnitřní cívky jsou obklopeny sekundární cívkou. Jádra primárních cívek jsou ve stavu magnetické saturace, která ale vlivem okolního magnetického prostředí neprochází saturací ve stejný okamžik, což se projeví vznikem elektromotorického napětí na sekundární cívce. Tedy velikost indukovaného napětí je úměrná intenzitě magnetického pole okolního prostředí. V dnešní době je tento druh magnetometru nejrozšířenějším, ať z finančního hlediska, či absencí mechanických měřicích prvků, což má za výhodu prodlouženou životnost přístroje v náročných podmínkách. [7]



Obrázek 4 Měřicí sensor magnetometru typu Fluxgate [8]

Naopak protonový magnetometr je skalární měřicí přístroj, který k měření využívá princip precese protonů. Polarizováním kapaliny bohaté na vodík, ve které se protony chovají jako magnetické dipóly, budící cívkou, a následným vypnutím externího zdroje polarizačního proudu dojde k přizpůsobení protonů vůči okolnímu magnetickému poli. Při tomto jevu dochází v měřicí cívce k indukovaní proudu, jehož frekvence je úměrná magnetické indukci daného okolního magnetického pole. Nevýhodou tohoto přístroje je doba měřicího kroku, který zde dosahuje až 3 sekund. Výhodou je zde přesnost až 0,1 nT. [9]



Obrázek 5 Protonový magnetometr PMG-2 [10]

Mezi další technologie můžeme zařadit atomové magnetometry, které pracují na principu optického čerpání a dosahují vysoké citlivosti až 0,01 nT nebo magnetometry SQUID, které při teplotách dosahujících absolutní nule dokáží za pomoci Josephonova efektu dosáhnout přesnosti 0,1 pT. Tato přesnost má pouze využití v laboratorních podmínkách, jelikož na povrchu měření znemožňují časové variace. [1]

2 Metoda konečných prvků (FEM)

2.1 Numerická metoda řešení diferenciálních rovnic

Většina fyzikálních zákonů je popsána matematicky a lze je vyjádřit pomocí parciálních diferenciálních rovnic (dále jen PDR). Jejich řešení je z velké části obtížné hledat analytickými metodami, proto se tyto PDR aproximují rovnicemi numerického modelu, které již lze řešit metodami numerickými. Jejich výsledkem je opět aproximace skutečného řešení PDR. Jednou z těchto metod, které lze použít, je metoda konečných prvků, anglicky Finite Element Method (zkráceně FEM).

Použití této metody si lze ukázat například na následující rovnici vyjadřující přenos tepla v pevné látce:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot q = g(T, t, x) \quad (3)$$

$$\nabla \cdot q = \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right), \quad (4)$$

kde ρ je hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$], C_p je tepelná kapacita [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$], T je teplota [K], q je vektor tepelného toku v pevné látce a $\nabla \cdot q$ je změna tepelného toku v pevné látce podél prostorových souřadnic.

Z rovnice (1) lze tedy vidět, že pokud dojde ke změně tepelného toku q , musí být příčinou změna teploty nebo zdroj tepla g . Tepelný tok v pevné látce lze popsat pomocí vztahu pro tepelný tok vedením:

$$q = -k\nabla T \rightarrow q = \left(-k \frac{\partial T}{\partial x}, -k \frac{\partial T}{\partial y}, -k \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (5)$$

kde k je tepelná vodivost [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$].

Rovnice (3) nám udává úměru tepelného toku q vůči teplotnímu gradientu ∇T . Dosazením rovnice (3) do rovnice (1) dostaneme následující diferenciální rovnici:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k\nabla T) = g(T, t, x) \quad (6)$$

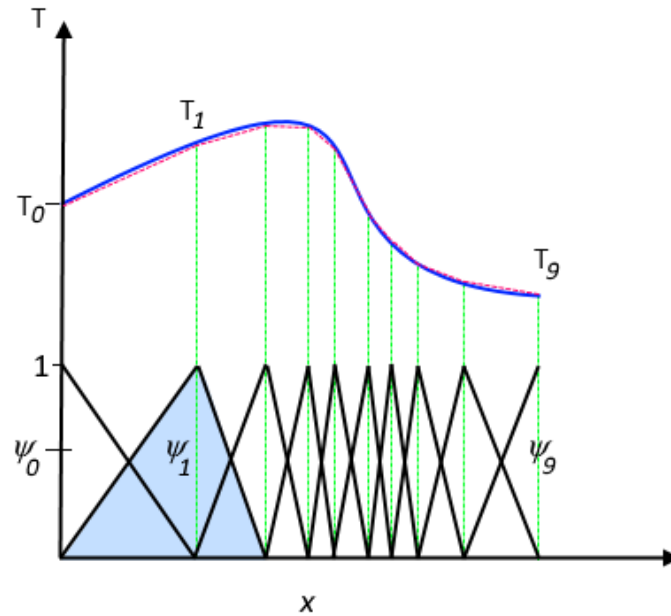
Rovnici (4) v mnoha případech nelze řešit analytickými metodami. Bylo by i například velmi obtížné získat z rovnice (4) analytický výraz, který by vyjadřoval chování závislých proměnných v závislosti na čase i v prostoru, jako např.:

$$T = f(x, t) \quad (7)$$

Zde se nabízí alternativní možnost řešení PDR, a to hledání přibližných numerických řešení. Metoda konečných prvků je v tomto případě skvělým adeptem.

Základní myšlenkou je diskretizace prostoru, kdy hledáme takové přibližné řešení PDR, které je lineární kombinací množiny bázových funkcí ψ_i .

$$T_h(x) = \sum_i T_i \psi_i(x) \quad (8)$$



Obrázek 6 Aproximování funkce T pomocí funkce T_h [4]

Obr. 6 uvádí příklad lokalizovaných bázových funkcí v jednorozměrném prostoru. V této práci navíc používáme tzv. slabou formulaci PDR, kdy jsou obě strany rovnice přenásobeny testovacími funkcemi a integrovány. Aplikací této metody dojde ke zmírnění požadavku, kde musí být řešení PDR definováno ve všech bodech a místo toho je vyžadována rovnost pouze v integrálním smyslu. Při slabé formulaci lze zanedbat zjednodušením obtížné body definičního oboru.

Nečasová část rovnice (4) pak po rozvoji do bázových funkcí, přenásobení testovací funkcí (slabá formulace) a integraci per partes přejde do tvaru:

$$\sum_i T_i \int_{\Omega} k \nabla \psi_i \cdot \nabla \psi_j dV + \sum_i \int_{\partial\Omega} (k T_i \nabla \psi_i) \cdot n \psi_j dS = \int_{\Omega} g \left(\sum_i T_i \psi_i \right) \psi_j dV, \quad (9)$$

který obsahuje jen derivace a integrály známých funkcí a neznámé koeficienty T_i . Tím byla převedena diferenciální rovnice na soustavu rovnic algebraických, kterou lze efektivně numericky vyřešit. Získanými koeficienty T_i pak vynásobíme bázové funkce ψ_i , a tím získáme aproximaci řešení původní PDR.

Při řešení metodou konečných prvků je možné vybrat si způsob diskretizace, což nám umožňuje mít proměnnou hustotu elementů bázové funkce pro lepší aproximaci dané problematiky. Po aplikaci diskretizace je daná soustava rovnic při použití počátečních podmínek řešitelná. Výsledkem je, jak již bylo uvedeno, přibližné řešení PDR. Numerické řešení se bude od skutečného analytického řešení lišit odchylkou, kterou nelze eliminovat, ale lze ji snižovat užitím detailnější diskretizace, což je možné si představit, jako rozložení dané problematiky více elementů. [11]

2.2 COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics je software využívající metody konečných prvků a používaný primárně inženýry a vědci pro simulaci návrhů, zařízení a fyzikálních procesů v mnoha oblastech výzkumů či výroby. Modelování je často efektivnější a levnější pro optimalizaci procesů než samotné testování prototypů. Implementace více typů fyziky je často nezbytností pro přesné modelování zařízení či procesu. Multifyzikální modely zohledňují možné provozní podmínky a fyzikální vlivy pro co nejlepší navržení modelu v reálných podmínkách, ať se jedná např. o simulaci elektromagnetického záření, stavební mechaniky či akustiky. [12]

3 Modelování v Comsol Multiphysics

3.1 Vstupní parametry modelu

U modelu budeme uvažovat, že se jedná o magnetostatickou problematiku, jelikož časovou závislost magnetického pole při jeho měření gradiometrickou metodou můžeme zanedbat a také se zde nenachází žádné proudy. Samotné modelování po vybrání správných fyzikálních dějů, dle které bude model simulován probíhá následovně.

Jako primární doména je zvolena krychle o délce strany 2 m, která představuje zeminu, v jejímž středu se nachází válečná munice, konkrétně sovětská protitanková mina PT Mi-K. V geometrii modelu je simulována válcem o průměru 300 mm, výšce 102 mm a tloušťkou stěny 1 mm, u kterého bude sledován rozdíl magnetické indukce ΔB_z ve výšce od 0,1 do 0,7 m, a to dle následujícího vztahu:

$$\Delta B_z = B_z(r_h) - B_z^{Geo}, \quad (10)$$

kde $B_z(r_h)$ je velikost magnetické indukce dle osy z v příslušné hloubce a B_z^{Geo} je velikost magnetické indukce zemského pole v ose z. Dochází zde ke zjednodušení vztahu z rovnice (1) za předpokladu, že při ideálních podmínkách a délce měřicí sondy 1 m je v této vzdálenosti druhá hodnota magnetické indukce rovna hodnotě zemského pole.

Pro zeminu je uvažován materiál s relativní permeabilitou $\mu_r = 1,006$ a pro minu je jako materiál brána ocel s relativní permeabilitou $\mu_r = 700$. Pro jednoduchost v modelu nerozlišujeme mezi zeminou a vzduchem (jsou popsány stejnou permeabilitou). Okolní magnetické pole je definováno hodnotami magnetické indukce pro jednotlivé složky: $B_x = 20\,318$ nT, $B_y = 15\,964$ nT a $B_z = 44\,370$ nT. [13] [14] [15]

Na okraji hlavní domény je definována okrajová podmínka pro kolmou složku magnetické indukce pomocí kolmé složky geomagnetického pole:

$$n \cdot B = n \cdot B^{Geo}, \quad (11)$$

kde n je normálový vektor k povrchu domény.

Pro výpočet modelu v případě magnetostatické problematiky, kde nejsou přítomny žádné proudy, je možné formulovat řešení pomocí magnetického skalární potenciálu. To je umožněno ze vztahů:

$$\nabla \times H = 0 \quad (12)$$

$$H = -\nabla V_m + \frac{1}{\mu_0} B_z^{Geo}, \quad (13)$$

kde H je magnetická intenzita [A/m], V_m je skalární magnetický potenciál [A]. Magnetický skalární potenciál je definován analogicky, jako je tomu u definice elektrického potenciálu pro statická elektrická pole. Dále musí být splněna podmínka neexistence magnetických monopolů:

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (14)$$

$$B = \mu_0(H + M) = \mu_0(1 + \kappa)H. \quad (15)$$

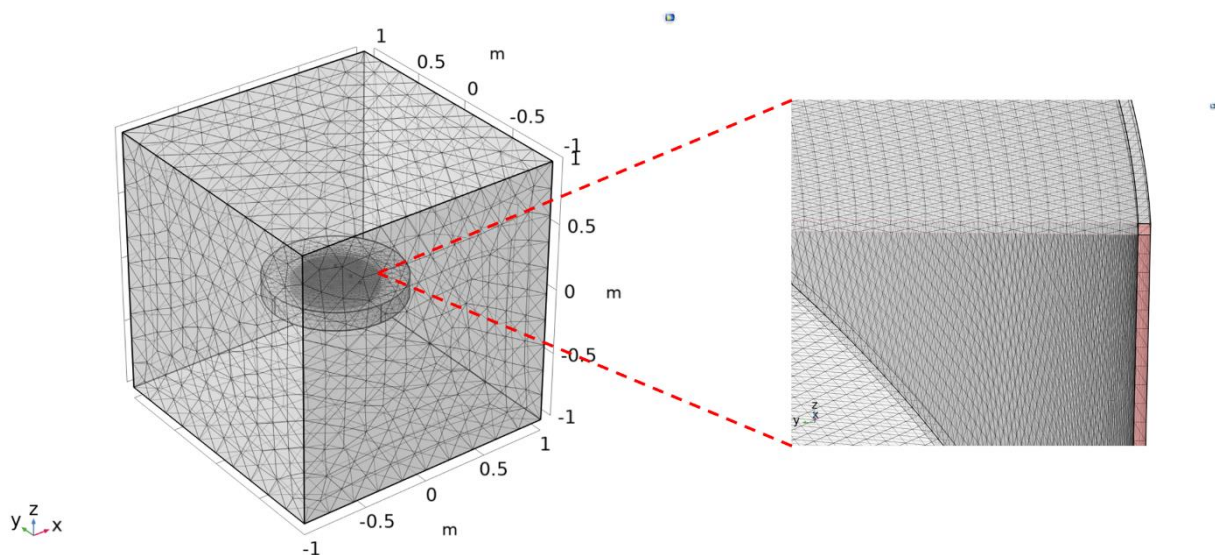
$$\nabla \cdot (-\nabla V_m \mu_0 + B_z^{Geo})(1 + \kappa) = 0 \quad (16)$$

Po dosazení rovnic (2), (13) a (15), kde B je magnetická indukce [T], M je magnetizace [A/m] a μ_0 je permeabilita vakua [H/m], do rovnice (14) dostáváme rovnici (16), kterou lze metodou FEM efektivně řešit pro různé rozložení susceptibility v prostoru.

3.2 Konvergence meshe

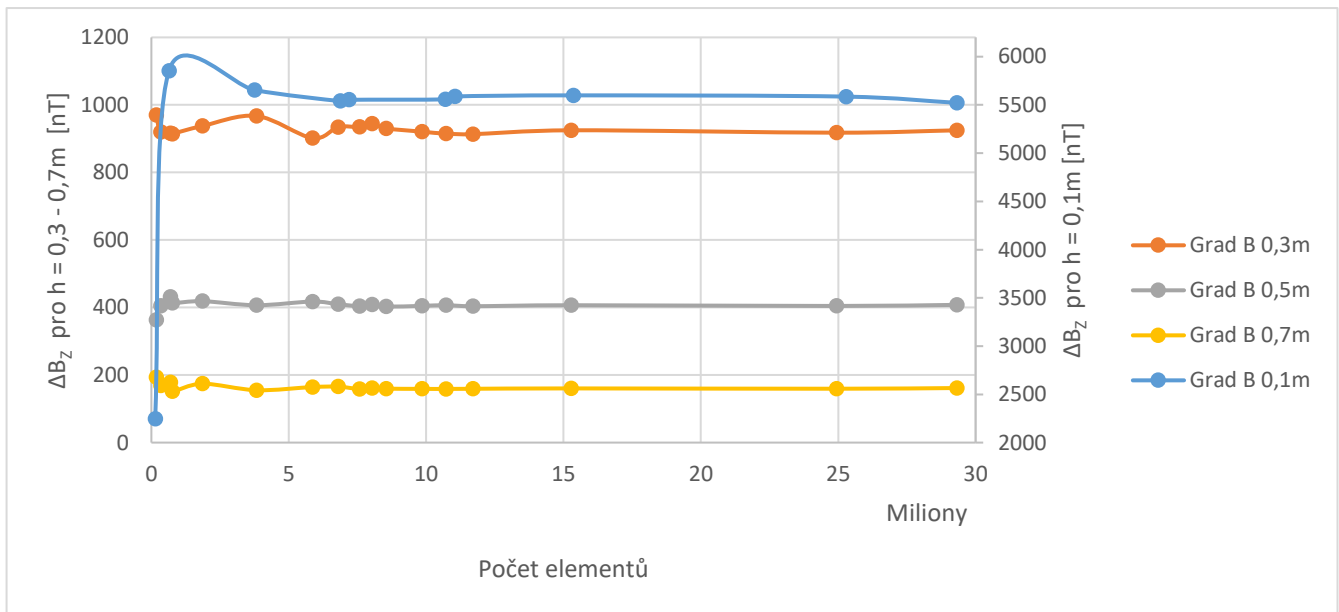
Mesh, neboli skupina prostorových elementů, které nám tvoří jednotlivé domény, je stěžejním krokem k vytvoření optimálního modelu. Jeho hustota definuje přesnost výsledných simulací, ale i časovou a hardwarovou náročnost této simulace. Pro nalezení správné hustoty meshe, při které je nadále výhodné model simulovat je nutné vyhledat konvergenci tohoto meshe. Zde používaný mesh je skládán z tetraedrů, tedy částicemi (elementy) složenými ze čtyř stěn.

Hustota meshe tohoto modelu se při hledání konvergenčních hodnot pohybuje od jednotek statisíců po desítky milionů jednotlivých elementů, přičemž časová náročnost výpočtu modelu dosahovala až několik desítek minut (na pracovní stanici s 8-jádrovým procesorem AMD RYZEN 7, a paměti RAM 64 GB). Pro lepší vykreslování meshe je mina obklopena válcem o větším průměru a výšce, na jehož okraji je sledována hodnota gradientu magnetické indukce pro výšku 0,1 m. V opačném případě by mohlo dojít k chybě při výpočtu aproximací mimo vrchol tetraedru. Mesh zde také není stejný ve všech oblastech, v okolí miny je mesh velmi jemný, a naopak s rostoucí vzdáleností je mesh tvořen hrubšími elementy. Nejmenší element má velikost 1 mm pro možnost vykreslení stěny miny o stejné velikosti. Vytvořený mesh lze vidět na následujícím obrázku:



Obrázek 7 Ukázka proměnného meshe s přiblížením průřezu miny

Na následujícím grafu lze sledovat změnu velikosti gradientu magnetické indukce v jednom bodě v závislosti na změně hustoty meshe. Změny jsou sledovány pro všechny požadované výškové hladiny. Z důvodů vysokých hodnot grad B u výšky 0,1 m je používána vedlejší osa (napravo). Hodnoty gradientu magnetické indukce začínají konvergovat od hodnoty 10 milionů elementů. Tato hustota meshe je uvažována jako optimální pro potřeby tohoto modelu.



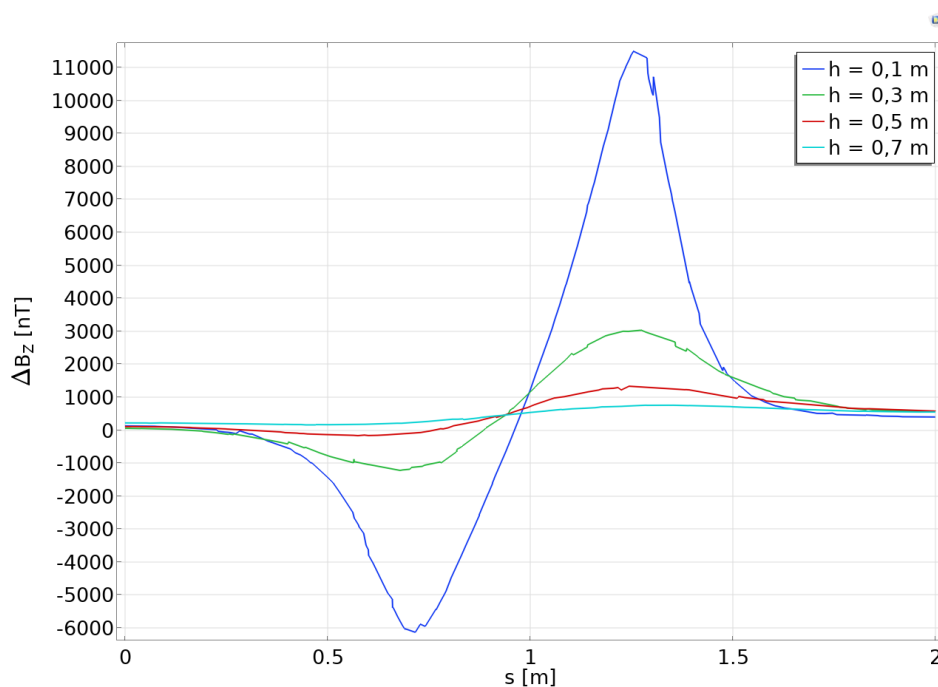
Obrázek 8 Závislost ΔB_z v jednotlivých výškách na počtu elementů meshe

4 Výstupy jednotlivých modelů

4.1 Výstup modelování v Comsol Multiphysics

Model s natočením miny $\alpha = 0^\circ$

Zde je mina v zemině uložena horizontálně a sledujeme, jak se bude vyvíjet velikost rozdílu magnetické indukce munice vůči okolnímu magnetickému poli Země.



Obrázek 9 Průběh hodnot ΔB_z v prostoru nad minou natočenou o $\alpha = 0^\circ$

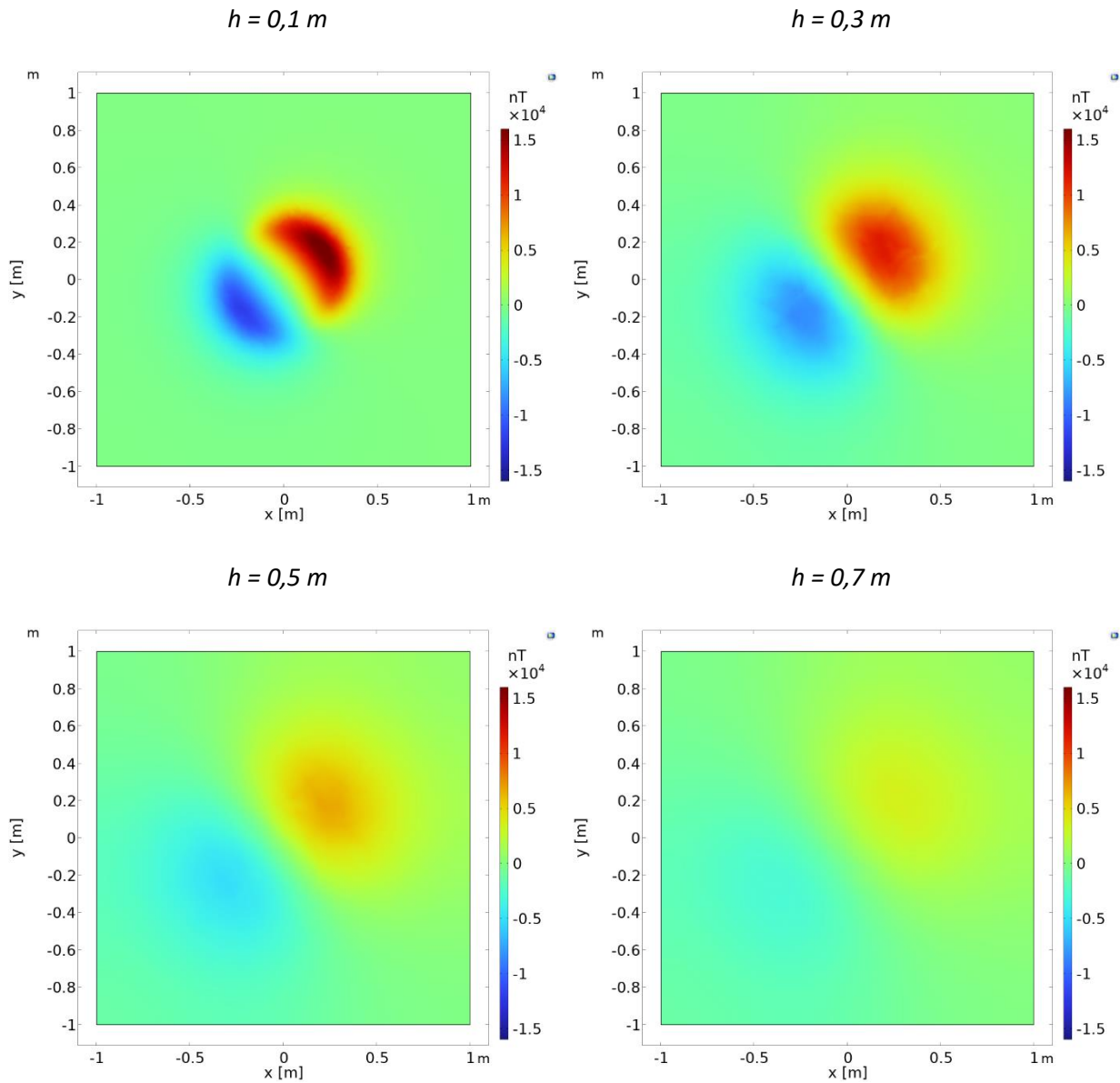
Z grafu výše lze sledovat, že velikost rozdílu magnetické indukce rapidně klesá s rostoucí výškou. Změna polarity je zde zřejmá. Maxima a minima hodnot magnetické indukce v jednotlivých výškách je možné vidět v následující tabulce.

Výška h [m]	Maximum ΔB_z [nT]	Minimum ΔB_z [nT]
0,1	11 762	-6 401
0,3	3 091	-1 286
0,5	1 355	-189
0,7	764	150

Tabulka 1 Krajní hodnoty ΔB_z sledované nad minou natočenou o $\alpha = 0^\circ$

Na následujících obrázcích lze sledovat grafickou vizualizaci průběhu rozdílu magnetické indukce v prostoru nad minou. Pro všechny barevné škály byly zvoleny mezní hodnoty +15 000 nT a -15 000

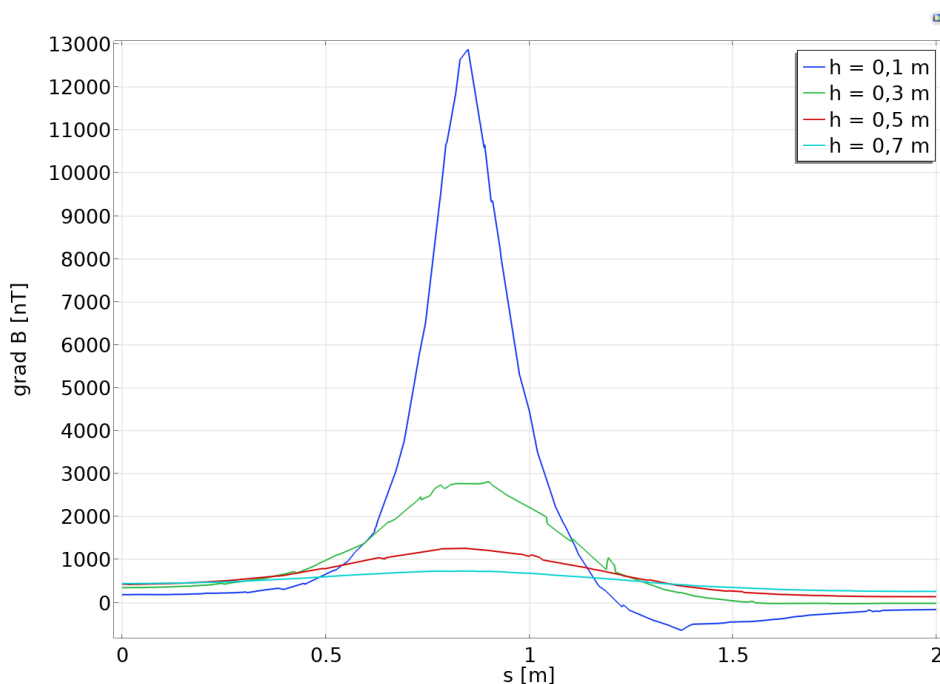
nT. Aby byl lépe znatelný barevný kontrast (rozdíl ΔB_z mezi různými místy) pro každou hloubku a jednotlivé panely obrázku 10 byly tím pádem snáze porovnatelné, byly hodnoty tohoto rozdílu v jednotlivých hloubkách vynásobeny hodnotou rovnou desetinásobku své hloubky, tedy v hloubce 0,3 m byly hodnoty násobeny 3, v hloubce 0,5 m hodnotou 5 a v hloubce 0,7m hodnotou 7.



Obrázek 10 Grafická vizualizace změn ΔB_z s rostoucí výškou nad minou

Model s natočením miny $\alpha = 22,5^\circ$

V tomto případě je mina v zemině uložena s natočením o úhel $\alpha = 22,5^\circ$ a opět sledujeme, jak se bude vyvíjet rozdíl magnetické indukce munice vůči okolnímu magnetickému poli Země.



Obrázek 11 Průběh hodnot ΔB_z v prostoru nad minou natočenou o $\alpha = 22,5^\circ$

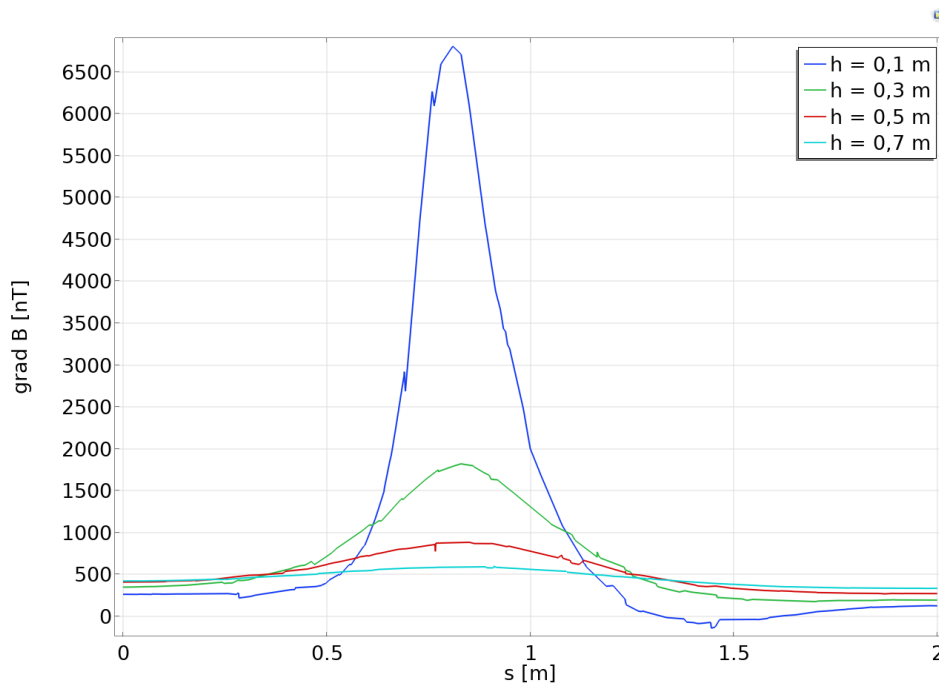
Zde dochází k růstu kladné hodnoty rozdílu magnetické indukce, a naopak k velkému poklesu jeho záporného hodnoty. S rostoucí výškou opět dochází z počátku k rychlému poklesu rozdílu magnetické indukce a následně jeho pozvolnému klesání. Maxima a minima hodnot jsou uvedeny v následující tabulce (bez přenásobení hloubkou).

Výška h [m]	Maximum ΔB_z [nT]	Minimum ΔB_z [nT]
0,1	6 912	-247
0,3	1 846	151
0,5	893	259
0,7	601	329

Tabulka 2 Krajní hodnoty ΔB_z sledované nad minou natočenou o $\alpha = 22,5^\circ$

Model s natočením miny $\alpha = 45^\circ$

Zde je mina v zemi uložena s natočením o úhel $\alpha = 45^\circ$ a opět sledujeme, jak se bude vyvíjet velikost rozdílu magnetické indukce munice vůči okolnímu magnetickému poli Země.



Obrázek 12 Průběh hodnot ΔB_z v prostoru nad minou natočenou o $\alpha = 45^\circ$

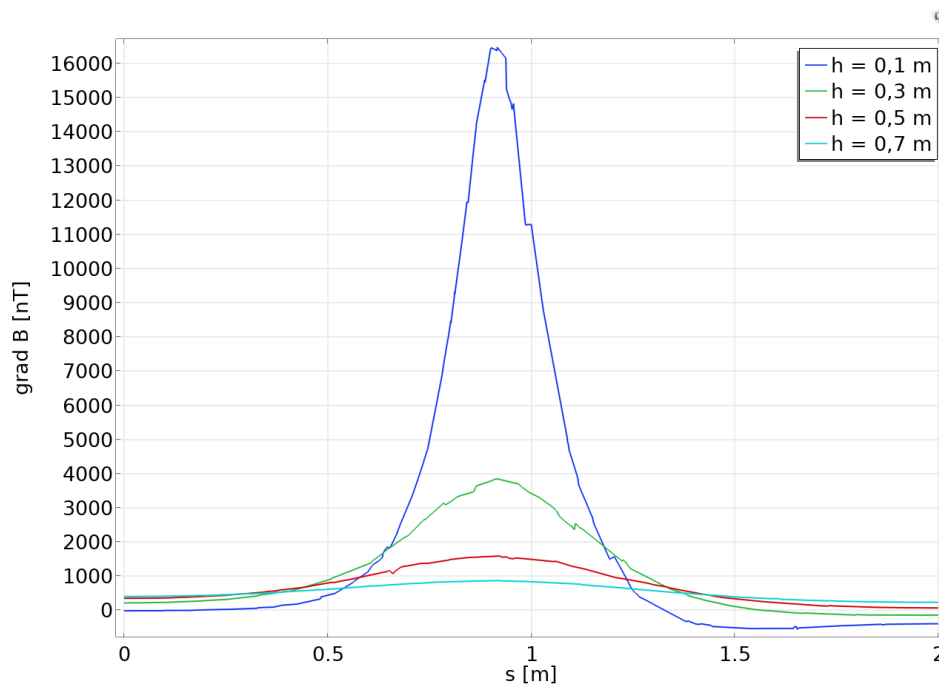
Zde dochází k růstu kladné hodnoty rozdílu magnetické indukce, a naopak k velkému poklesu jeho záporné hodnoty. S rostoucí výškou opět dochází z počátku k rychlému poklesu rozdílu magnetické indukce a následně jeho pozvolnému klesání. Maxima a minima hodnot jsou uvedeny v následující tabulce.

Výška h [m]	Maximum ΔB_z [nT]	Minimum ΔB_z [nT]
0,1	13 086	-849
0,3	2 853	-67
0,5	1 279	119
0,7	740	253

Tabulka 3 Krajní hodnoty ΔB_z sledované nad minou natočenou o $\alpha = 45^\circ$

Model s natočením miny $\alpha = 77,5^\circ$

V tomto případě je mina v zemině uložena s natočením o úhel $\alpha = 77,5^\circ$ a opět sledujeme, jak se bude vyvíjet velikost rozdílu magnetické indukce munice vůči okolnímu magnetickému poli Země.



Obrázek 13 Průběh hodnot ΔB_z v prostoru nad minou natočenou o $\alpha = 77,5^\circ$

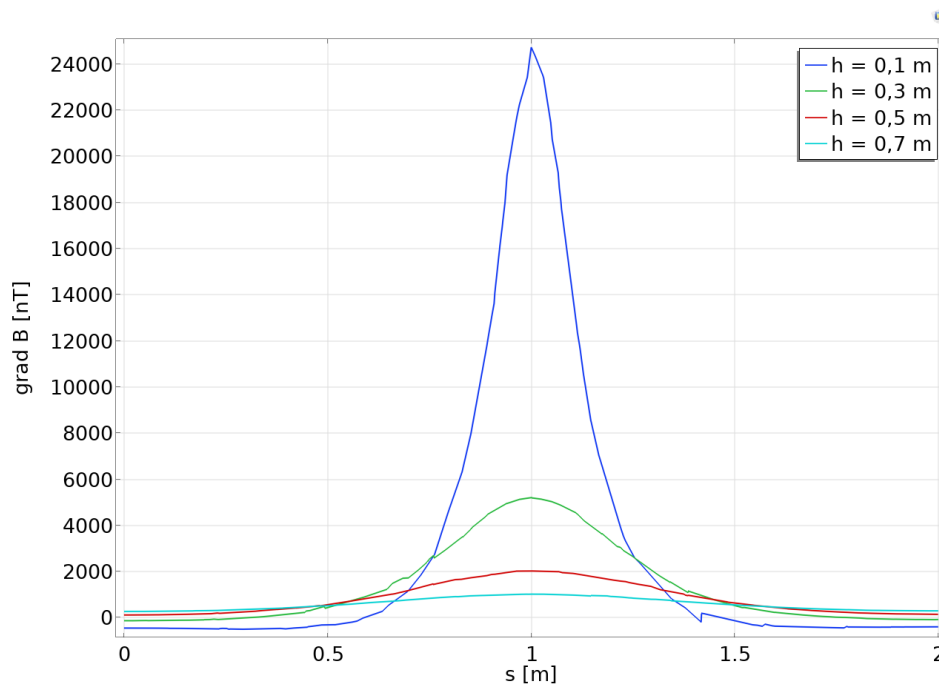
Zde dochází k růstu kladné hodnoty rozdílu magnetické indukce, a naopak k velkému poklesu jeho záporné hodnoty. S rostoucí výškou opět dochází z počátku k rychlému poklesu rozdílu magnetické indukce a následně jeho pozvolnému klesání. Maxima a minima hodnot jsou uvedeny v následující tabulce.

Výška h [m]	Maximum ΔB_z [nT]	Minimum ΔB_z [nT]
0,1	16 773	-811
0,3	3 907	-207
0,5	1 612	45
0,7	877	225

Tabulka 4 Krajní hodnoty ΔB_z sledované nad minou natočenou o $\alpha = 77,5^\circ$

Model s natočením miny $\alpha = 90^\circ$

V posledním případě je mina v zemině uložena vertikálně, tedy s natočením $\alpha = 90^\circ$. Opět sledujeme, jak se bude vyvíjet velikost rozdílu magnetické indukce munice vůči okolnímu magnetickému poli Země.



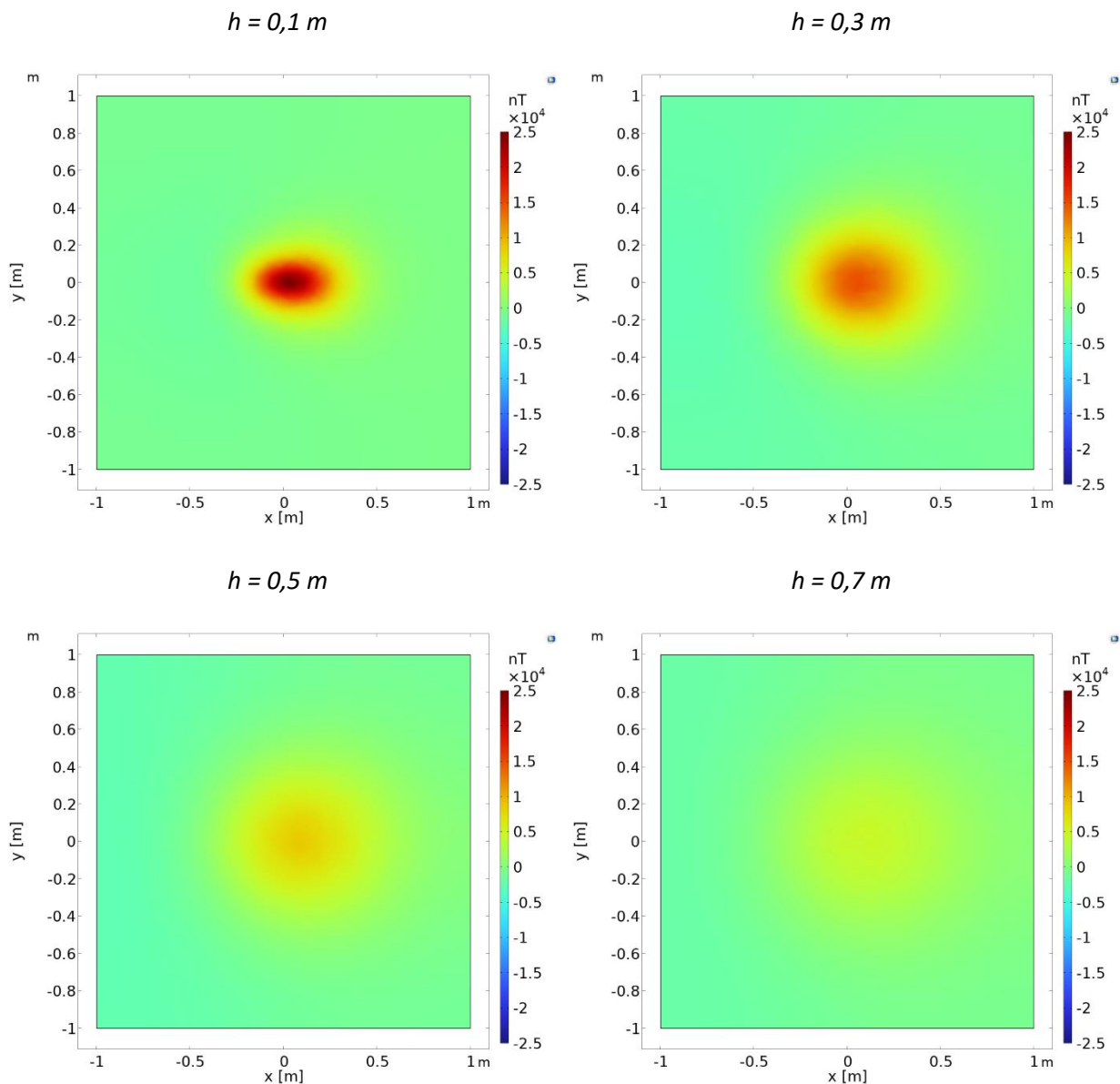
Obrázek 14 Průběh hodnot ΔB_z v prostoru nad minou natočenou $\alpha = 90^\circ$

Zde dochází k růstu kladné hodnoty rozdílu magnetické indukce, a naopak k velkému poklesu jeho záporné hodnoty. S rostoucí výškou opět dochází z počátku k rychlému poklesu rozdílu magnetické indukce a následně jeho pozvolnému klesání. Maxima a minima hodnot jsou uvedeny v následující tabulce.

Výška h [m]	Maximum ΔB_z [nT]	Minimum ΔB_z [nT]
0,1	25 117	-883
0,3	5 290	-213
0,5	2 051	87
0,7	1 031	257

Tabulka 5 Krajní hodnoty ΔB_z sledované nad minou natočenou $\alpha = 90^\circ$

Na následujících obrázcích lze opět sledovat grafickou vizualizaci průběhu rozdílu magnetické indukce v prostoru nad minou. Zde byly pro všechny barevné škály zvoleny mezní hodnoty $+25\,000$ nT a $-25\,000$ nT. Aby opět byl lépe znatelný průběh klesání hodnot rozdílu magnetické indukce, byly hodnoty tohoto gradientu v jednotlivých hloubkách vynásobeny hodnotou rovnou desetinásobku své hloubky, tedy v hloubce 0,3 m byly hodnoty násobeny 3, v hloubce 0,5 m hodnotou 5 a v hloubce 0,7 m hodnotou 7.

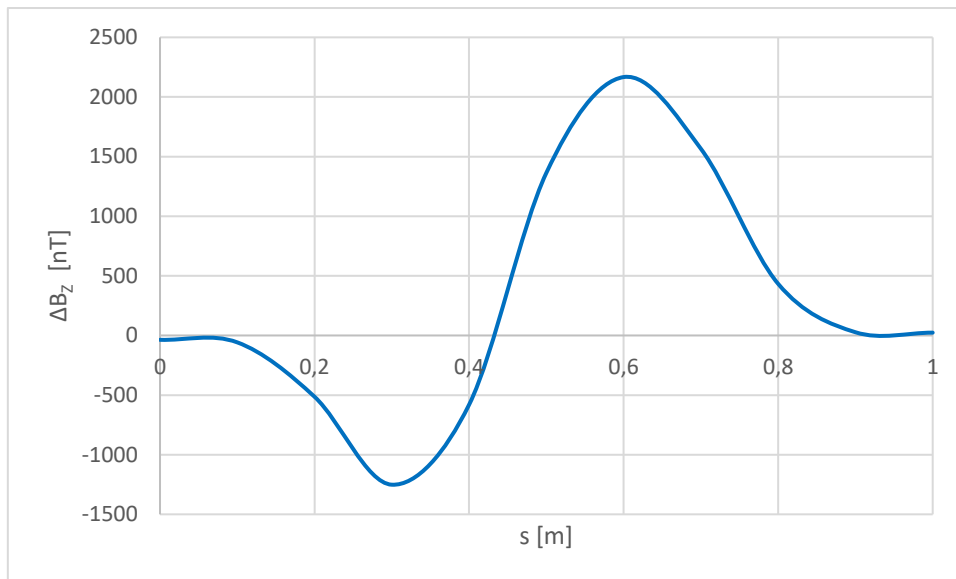


Obrázek 15 Grafická vizualizace změn ΔB_z s rostoucí výškou nad minou

4.2 Výstup experimentu

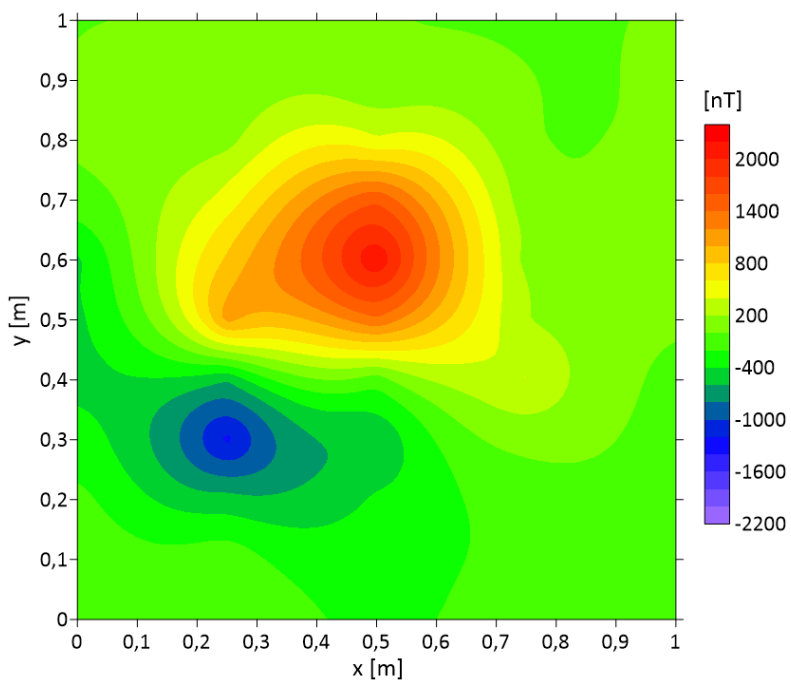
Pro možnost porovnání výše uvedeného modelu s reálnými výsledky byla protitanková mina PT Mi-K změřena pyrotechnikem pomocí magnetometru a pro potřeby této práce byly poskytnuty výsledky měření. Mina uložena horizontálně a byla zakopána do hloubky cca 20 cm, ve které se nejčastěji tato munice nacházela. Měřeno bylo pole 1x1 m a výsledek byl vyhodnocen v softwaru určeném k magnetometrickým metodám.

Na následujícím grafu lze sledovat průběh změny rozdílu magnetické indukce v tomto experimentu. Maximální hodnota dosahovala 2 167 nT a minimální hodnota dosahovala až -1 252 nT.



Obrázek 16 Průběh ΔB_z z naměřených hodnot

Na následujícím obrázku lze sledovat grafickou vizualizaci průběhu rozdílu magnetické indukce v prostoru nad minou. Barevné škály jsou zde nastaveny s mezními hodnotami +2 200 nT a -2 200 nT.



Obrázek 17 Grafický výstup magnetometrického měření

4.3 Zhodnocení výsledků a porovnání s experimentem

Z grafů průběhu rozdílu magnetické indukce nad minou pro jednotlivé výšky lze sledovat, že s rostoucí výškou klesá z počátku hodnota rozdílu rychleji, než je tomu později. Při změně výšky např. z 0,1 m na 0,3 m klesá hodnota na někdy až pětinou hodnotu. Během dalších posunů dochází k poklesu pouze až na poloviční hodnotu.

Při natočení miny dochází k růstu kladné hodnoty rozdílu magnetické indukce, a naopak k poklesu hodnoty opačné polaritě až k téměř jejímu potlačení. Také dochází k posunu kladného vrcholu průběhové křivky směrem ke středu grafu.

Pro porovnání s experimentem lze pouze použít model s horizontálním uložením miny, tedy natočením o $\alpha = 0^\circ$. Při pohledu na obrázek č. 4 a obrázek č. 11 lze sledovat shodu v rozdělení kladné a záporné polaritě. Kladná hodnota rozdílu u experimentu dosahovala 2 167 nT a záporná -1 252 nT. U modelu dosahovala kladná hodnota rozdílu 3 091 nT a záporná hodnota -1 286 nT. Jelikož se mina v experimentu nacházela o cca 10 cm výše, než bylo simulováno v modelu, očekávali bychom zde hodnoty rozdílu vyšší. Nicméně model byl simulován pro ideální podmínky, tedy homogenní zeminu, u které je zanedbána změna vlhkosti či jaká je její mineralizace, což má za příčinu zvýšenou vodivost zeminy a změnu její permeability. Během experimentu se vyskytovaly malé přeháňky, které měly za vinu zvýšenou vlhkost zeminy a s tím i spojenou její vyšší vodivost a rozdílnou permeabilitu.

5 Rozvoj firmy zabývající se pyrotechnickými průzkumy

Uvažujme fiktivní firmu se třemi zaměstnanci, která se zabývá pyrotechnickými průzkumy, a na tomto trhu se pohybuje již několik let. Poskytuje jak metalodetekční vyhledávání munice pomocí detektorů kovů, tak i hloubkové vyhledávání munice pomocí magnetometrické technologie.

Po pěti letech užívání v náročných terénech vznikla potřeba koupit nové přístroje pro magnetometrické měření. Dodnes firma užívala pro své zaměstnance magnetometr zn. Sensys s jednou měřicí sondou. Po využití simulace lokálních variací došla firma k závěru, že magnetometr firmy Sensys je pro jejich potřeby dostačující. Nyní stojí firma před rozhodnutím, zda koupit stejný přístroj, či zvolit dražší variantu, která umožňuje urychlit proces vyhledávání munice, ale jeho pořizovací cena je vyšší.

Uvažované ceny za provádění pyrotechnického průzkumu jsou ceny obvyklé upravené o určitý koeficient pro zachování firemního tajemství vůči konkurenci.

5.1 Investice do jednoduchého měřicího systému

První možností se tedy nabízí obměnit původní měřicí přístroje za nové totožné modely. Nákup by obsahoval tři kompletní magnetometrické přístroje spolu s obalem pro bezpečný převoz mezi zakázkami a novou verzí softwaru pro vyhodnocování naměřených dat.



Obrázek 18 Magnetometr Sensys obsahující jednu měřicí sondu

Po vyžádání předběžné kalkulace tohoto nákupu u firmy Sensys dostala firma následující nabídku:

Položka	Počet [ks]	Cena za jednotku [Kč]	Celková cena [Kč]
Měřicí sonda magnetometru	3	95 000	285 000
Záznamové zařízení magnetometru	3	120 000	360 000
Vyhodnocovací software	1	185 000	185 000
Ochranný kufr – malý	3	6 400	19 200
Celkem			849 200 Kč

Tabulka 6 Předběžná kalkulace cen první varianty měřicího systému

Pokud by firma zvolila tuto investici, byla by schopna během roku realizovat zakázky o ploše cca 180 ha, jelikož by každý zaměstnanec byl nucen provádět průzkum pěší metodou. Průměrná cena takového pyrotechnického průzkumu na plochu jednoho hektaru by se pohybovala kolem 52 000 Kč/ha. Cena by zahrnovala i následné zpracování naměřených dat a ověření nalezených anomálií. Výše mzdy každého zaměstnance je rozdělena na fixní částku 840 000 Kč/rok a odměnu 5 000 Kč za každý zpracovaný hektar. Náklady na servis jednoho zařízení by byly 25 000 Kč/rok.

Při uvažování inflace 4 % by cashflow firmy v následujících pěti letech vypadal následovně:

Doba [rok]	0	1	2	3	4	5
Počáteční investice [Kč]	-849 200					
Příjem [Kč]		9 360 000	10 123 776	11 387 871	13 322 199	16 208 492
Náklady na servis [Kč]		-75 000	-81 120	-91 249	-106 748	-129 876
Náklady na mzdy [Kč]		-3 420 000	-3 699 072	-4 160 953	-4 867 726	-5 922 333
Cashflow firmy [Kč]	-849 200	5 865 000	6 343 584	7 135 669	8 347 724	10 156 282

Tabulka 7 Cashflow firmy při investici do první varianty měřicího systému

Pro možnost porovnat výhodnost této investice vůči jiné variantě je nutno si z cashflow firmy stanovit čistou současnou hodnotu a dále roční ekvivalentní peněžní tok, u které budeme uvažovat reálný diskont 5 %, který spolu s inflací 4 % nám spolu tvoří nominální diskont 9,2 %. Čistá současná hodnota (NPV) je definována dle ref. [16] jako:

$$NPV = \sum_{i=0}^T \frac{CF_i}{(1 + r_n)^i} \quad (17)$$

kde CF_i je cashflow firmy v i -tém roce [Kč], r_n je nominální diskontní míra [%] a T je počet období [rok].

Roční ekvivalentní peněžní tok (RCF) je definován dle ref. [16] jako:

$$RCF = \frac{q^T \cdot (q-1)}{q^T - 1}, \text{ kde } q = (1 + r). \quad (18)$$

Hodnota NPV po výpočtu je 27 732 426 Kč a hodnota RCF je 7 166 835 Kč. Již z těchto hodnot lze usoudit, že by tato investice prodělečná nebyla a firma by v následujících letech prosperovala, pokud by vysoutěžila dostatečný počet zakázek.

5.2 Investice do komplexního měřicího systému

Jako druhou možnost může firma uvažovat investici do jednoho většího měřicího systému s šesti měřicími sondami, který je možné zapřáhnout jako přívěsný vozík za pracovní vozidlo. Spolu s tím by bylo nutné zakoupit přípojný vozík, na kterém by se výše zmíněné zařízení převáželo.



Obrázek 19 Nosný systém obsahující šest měřících sond



Obrázek 20 Převoz měřicího systému pomocí přípojného vozíku

Po vyžádání předběžné kalkulace tohoto nákupu u několika firem dostala firma následující nabídku:

Položka	Počet [ks]	Cena za jednotku [Kč]	Celková cena [Kč]
Měřicí sonda magnetometru	6	95 000	570 000
Záznamové zařízení magnetometru	1	230 000	230 000
Vyhodnocovací software	1	185 000	185 000
Ochranný kufr – velký	1	24 500	24 500
Nosný systém magnetometru	1	480 000	480 000
Pracovní vozidlo	1	369 990	369 990
Přípojný vozík za automobil	1	34 000	34 000
Celkem			1 893 490

Tabulka 8 Předběžná kalkulace cen druhé varianty měřícího systému

Pokud by firma zvolila tuto investici, byla by schopna realizovat více zakázek díky nosnému systému poháněným pracovním vozidlem, jelikož rychlejší provedením pyrotechnického průzkumu by byla firma schopna přijmout novou zakázku dříve než v první variantě. Nicméně omezena by byla počtem poptávek na provádění pyrotechnického průzkumu většího rozsahu, výhodných pro zpracování tímto měřícím systémem, kterých se však na našem trhu nenachází velký počet.

Uvažujme, že by byla firma schopna realizovat 330 hektarů, a to s nižší průměrnou cenou 46 000 Kč/ha, oproti původní variantě, jelikož by bylo možné provádět průzkumy s nižší fyzickou náročností a vyšší produktivitou. Výše mzdy zaměstnance by byla rozdělena na fixní částku 1 080 000 Kč/rok a odměnou 7 000 Kč za každý zpracovaný hektar, ale náklady na servis nového zařízení a pracovního vozidla by vyšly na 165 000 Kč ročně. Také je nutné započítat náklady na provoz pracovního vozidla, které by se pohybovaly kolem 32 000 Kč/rok.

Při uvažování inflace 4 % by cashflow firmy v následujících pěti letech vypadal následovně:

Doba [rok]	0	1	2	3	4	5
Počáteční investice [Kč]	-1 893 490					
Příjem [Kč]		15 180 000	16 418 688	18 468 791	21 605 873	26 286 848
Náklady na servis [Kč]		-165 000	-178 464	-200 748	-234 846	-285 727
Náklady na provoz pracovního vozidla [Kč]		-32 000	-34 611	-38 933	-45 546	-55 414
Náklady na mzdy [Kč]		-5 550 000	-6 002 880	-6 752 424	-7 899 381	-9 610 804
Cashflow firmy [Kč]	-1 893 490	9 433 000	10 202 733	11 476 687	13 426 100	16 334 904

Tabulka 9 Cashflow firmy při investici do druhé varianty měřícího systému

Pro možnost porovnat výhodnost této investice vůči jiné variantě je nutno si z cashflow firmy stanovit čistou současnou hodnotu (NPV) a dále roční ekvivalentní peněžní tok (RCF), u které budeme uvažovat reálný diskont 5 %, který spolu s inflací 4 % tvoří nominální diskont 9,2 %. Hodnota NPV vychází 44 075 901 Kč a hodnota RCF vychází 11 390 446 Kč. Již z těchto hodnot lze usoudit, že by tato investice prodělná nebyla a firma by v následujících letech při zachování ploch realizovaných zakázek prosperovala.

5.3 Porovnání výhodnosti jednotlivých investic

Pokud bychom určovali, která z investic je pro firmu lepší pouze dle čisté současné hodnoty, je jednoznačně pro firmu výhodnější varianta druhá.

Nicméně výhodnost nosného systému s šesti měřicími sondami se projevuje pro firmu primárně pro zakázky s velkou plochou, např. nad 50 ha. Firma je pak schopna tuto zakázku realizovat v poměrně krátkém časovém horizontu, což umožňuje přijmout další potenciální zakázku dříve, než by tomu bylo v případě metody provádění pyrotechnického průzkumu pěší metodou.

V případě, že by plocha poptávaných zakázek klesala k hodnotě 180 ha, které je firma schopna realizovat klasickou pěší metodou, je zde varianta nosného systému mnohem nákladnější. Zde by nebyla investice výhodná čistě z finančního hlediska, ale primárně z důvodu menší fyzické náročnosti provádění pyrotechnických průzkumů a kratší doby realizace. Firma by pak byla nucena zvyšovat cenu prováděného průzkumu, čímž by ztrácela výhodu v poskytování zvýhodněné ceny za provádění pyrotechnického průzkumu.

Při hledání takové hodnoty celkové plochy realizovaných pyrotechnických průzkumů, při které by byla dražší varianta magnetometru v případě zachování cen průzkumu stále výhodnější, byla z citlivostní analýzy zjištěna hodnota 257,1 ha. Pod tuto hodnotu celkové plochy vychází jako výhodnější varianta první, nicméně firma by byla touto variantou schopna realizovat maximálně 180 ha. Bylo by tedy nutné přijmout nového zaměstnance pro realizaci více zakázek, s čímž by byly spojeny další nové náklady.

Pro zachování výše příjmu při druhé variantě investice by firma musela s klesající celkovou plochou poptávaných pyrotechnických průzkumů upravit cenotvorbu nabízených služeb. Cenové nabídky by vypadaly následovně:

Celková plocha [ha]	Cena za hektar [Kč/ha]
330	46000
300	50600
270	56222
240	63250
210	72286
180	84333

Tabulka 10 Úprava cenové nabídky vzhledem k celkové ploše realizovaných zakázek

Zde se nabízí otázka, kdy by se nabízená cena za zpracovaný hektar plochy u druhé varianty rovnala ceně u první varianty. Po hledání řešení pomocí citlivostní analýzy pro cenu 45 000 Kč/ha by firma musela místo 330 ha realizovat za rok pouze 234,7 ha.

Lze tedy uzavřít, že investice do druhé varianty se vyplatí, a to nejen z finančního hlediska. Firma si však musí sama zhodnotit, zda bude mít pro takovýto měřicí přístroj v budoucnu dostatečné využití, a zda je jejím cílem minimalizace nákladů, či maximalizace zisku. [17]

Závěr

V bakalářské práci byla přiblížena problematika magnetometrického měření a jeho využití v různých odvětvích spolu s typy jednotlivých magnetometrů.

Poté bylo popsáno, jakým principem pracuje metoda konečných prvků a jak umožňuje řešení numericky neřešitelných problematik, spolu s představením jednoho z programů, který této metody pro řešení využívá, konkrétně programu Comsol Multiphysics.

V další části byl tvořen model protitankové miny uložené v různých hloubkách pod povrchem. Zde bylo nutno nalézt ideální počet jednotlivých elementů, pomocí kterých byl model vytvořen, pro který je řešení modelu časově i hardwarově efektivně zpracovatelné.

Ve čtvrté části jsou ukázány výsledky simulovaných modelů. Bylo zde zjištěno, že s rostoucí výškou nad minou zprvu klesá hodnota magnetické indukce rapidně, zatímco v dalším postupu dochází pouze k malým změnám. Bylo zde ověřeno, jaký dopad na průběh magnetické indukce v místě měření má pozice předmětu. U srovnání s experimentem bylo zanedbání některých parametrů ovlivňující magnetické vlastnosti půdy.

Poslední část práce posuzovala dvě možné investice firmy zabývající se pyrotechnickými průzkumy. Zde bylo zjištěno, že investice do komplexního měřicího systému je velmi výhodná, ale je nutno zde uvažovat, zda by firma měla pro tento přístroj dostatečné využití z hlediska počtu zakázek, které by se dali tímto typem přístroje realizovat. Pokud by tomu tak nebylo, tak by tato investice ztrácela na své výhodnosti.

Pokud by se v práci pokračovalo dále, bylo by dobré uvažovat i další parametry pro popis zeminy, čímž by se simulovaný model přibližoval více reálnému experimentu.

Zdroje

- [1] *Měření magnetického pole nad zájmovou plochou* [online]. [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <http://www.geofyzika.webz.cz/mermagn.php>
- [2] *Co je a k čemu slouží magnetometr?* [online]. [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.enviweb.cz/71131>
- [3] *Rondelová archeologie* [online]. [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://uni.uhk.cz/archeologie/?p=22399>
- [4] Deng, Elijah Achuoth, Kennedy O. Doro, and Carl-Georg Bank. "Suitability of magnetometry to detect clandestine buried firearms from a controlled field site and numerical modeling." *Forensic Science International* 314 (2020): 110396
- [5] *Archeogeofyzika a její metody: Magnetometrie, detektory kovů...* [online]. [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://sciencemag.cz/archeogeofyzika-a-jeji-metody-magnetometrie-detektory-kovu/>
- [6] Sensys Magnetometer SBL-10 Manual [online]. [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <http://www.cryogenic.co.uk/products/s700x-squid-magnetometer>
- [7] *What is a Fluxgate?* [online]. [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.sensorland.com/HowPage071.html>
- [8] *FG-3+ Sensor* [online]. [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.fgsensors.com/product-page/fg-3>
- [9] *Proton magnetometer* [online]. [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://maglab.fel.cvut.cz/workshop/proton-magnetometer/>
- [10] *PMG-2 Protonový Magnetometr a Gradiometr* [online]. [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://satisgeo.com/cs/magnetometers/pmg-2-proton-magnetometer-and-gradiometer/>
- [11] *The Finite Element Method (FEM)* [online]. [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/multiphysics/finite-element-method>
- [12] *What Is COMSOL Multiphysics?* [online]. [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/blogs/what-is-comsol-multiphysics/>
- [13] MATYSKA, Stanislav. *Měření elektrické rezistivity půdy* [online]. Brno, 2018 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=172841. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ing. Václav Vyčítal
- [14] *Electromagnetism and formation of magnetic fields.* [online]. [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/permeability-d_1923.html
- [15] *Aktuální měření geomagnetického pole* [online]. [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://www.ig.cas.cz/vyzkum-a-vyuka/oddeleni/geomagnetika/aktualni-mereni-geomagnetickeho-pole/>

[16] HRDÝ, M. *Hodnocení ekonomické efektivnosti investičních projektů EU*. 1. vydání Praha: ASPI Wolters Kluwer, 2006. 204s. ISBN 80-7357-137-4.

[17] *Archiv firmy AZ Pyro s.r.o.*

Seznam obrázků

Obrázek 1	Rondel u Těšovičů-Kyjovic nalezený při archeologickém průzkumu [3]	3
Obrázek 2	Vliv natočení předmětu v zemi na průběh ΔBZ [6]	4
Obrázek 3	Příklad grafického výstupu magnetického měření.....	5
Obrázek 4	Měřicí sensor magnetometru typu Fluxgate [8]	6
Obrázek 5	Protonový magnetometr PMG-2 [10]	6
Obrázek 6	Aproximování funkce T pomocí funkce Th [4].....	8
Obrázek 7	Ukázka proměnného meshe s přiblížením průřezu miny.....	11
Obrázek 8	Závislost ΔBZ v jednotlivých výškách na počtu elementů meshe	12
Obrázek 9	Průběh hodnot ΔBZ v prostoru nad minou natočenou o $\alpha = 0^\circ$	13
Obrázek 10	Grafická vizualizace změn ΔBZ s rostoucí výškou nad minou	14
Obrázek 11	Průběh hodnot ΔBZ v prostoru nad minou natočenou o $\alpha = 22,5^\circ$	15
Obrázek 12	Průběh hodnot ΔBZ v prostoru nad minou natočenou o $\alpha = 45^\circ$	16
Obrázek 13	Průběh hodnot ΔBZ v prostoru nad minou natočenou o $\alpha = 77,5^\circ$	17
Obrázek 14	Průběh hodnot ΔBZ v prostoru nad minou natočenou o $\alpha = 90^\circ$	18
Obrázek 15	Grafická vizualizace změn ΔBZ s rostoucí výškou nad minou	19
Obrázek 16	Průběh ΔBZ z naměřených hodnot	20
Obrázek 17	Grafický výstup magnetometrického měření.....	20
Obrázek 18	Magnetometr Sensys obsahující jednu měřicí sondu	22
Obrázek 19	Nosný systém obsahující šest měřících sond	24
Obrázek 20	Převoz měřicího systému pomocí přípojného vozíku	24

Seznam tabulek

Tabulka 1	Krajní hodnoty ΔBZ sledované nad minou natočenou o $\alpha = 0^\circ$	13
Tabulka 2	Krajní hodnoty ΔBZ sledované nad minou natočenou o $\alpha = 22,5^\circ$	15
Tabulka 3	Krajní hodnoty ΔBZ sledované nad minou natočenou o $\alpha = 45^\circ$	16
Tabulka 4	Krajní hodnoty ΔBZ sledované nad minou natočenou o $\alpha = 77,5^\circ$	17
Tabulka 5	Krajní hodnoty ΔBZ sledované nad minou natočenou o $\alpha = 90^\circ$	18
Tabulka 6	Předběžná kalkulace cen první varianty měřicího systému	23
Tabulka 7	Cashflow firmy při investici do první varianty měřicího systému	23
Tabulka 8	Předběžná kalkulace cen druhé varianty měřicího systému.....	25
Tabulka 9	Cashflow firmy při investici do druhé varianty měřicího systému.....	25
Tabulka 10	Úprava cenové nabídky vzhledem k celkové ploše realizovaných zakázek	26