

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Magnetický obvod budící v daném objemu  
magnetické pole zadané velikosti**

**vedoucí práce: Doc. Ing. Bohuš Ulrych, CSc.  
autor: Bc. Jiří Pelikán**

**2012**



## **Anotace**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na návržení magnetického obvodu budícího v daném objemu magnetické pole zadané velikosti. V práci jsou popsány jednotlivé kroky od návrhu, sestavení až po jeho proměření. Jsou zde uvedeny vlastnosti jednotlivých součástí. V závěru této práce je provedeno zhodnocení magnetického obvodu a naznačeny cesty dalšího zdokonalení. V příloze jsou uvedeny výrobní výkresy jednotlivých částí magnetického obvodu.

## **Klíčová slova**

Magnetické pole, magnetický tok, magnetická indukce, magnetická intenzita, pracovní komora, permanentní magnet, Hallova sonda, metoda konečných prvků, měření

## **Abstract**

This thesis is aimed at designing the magnetic circuit in the excitation volume of the magnetic field specified size. The paper describes the steps from design to construction of the measurement. There are the properties of individual components. In conclusion, this study is an assessment of magnetic circuit, and outlined ways of further improvement. The annex provides manufacturing drawings of individual parts of the magnetic circuit.

## **Key words**

Magnetic field, magnetic flux, magnetic induction, magnetic intensity, working chamber, permanent magnet, Hall probe, finite element method, measurement

## Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 6.5.2012

Bc. Jiří Pelikán

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Bohuši Ulrychovi, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Rád bych také poděkoval svým rodičům. Zejména svému otci Jiřímu Pelikánovi, který mi výrazně pomohl při konstrukci a výrobě prezentovaného magnetického obvodu. Za pomoc při výrobě grafů děkuji Ing. Františku Machovi.

# Obsah

OBSAH.....	7
SEZNAM SYMBOLŮ .....	8
ÚVOD .....	9
<b>1. FORMULACE PROBLÉMU .....</b>	<b>10</b>
1.1 POPIS NAVRŽENÉHO MAGNETICKÉHO OBVODU .....	11
<b>2. MATEMATICKÝ MODEL PROBLÉMU.....</b>	<b>14</b>
2.1 MAXWELLOVY ROVNICE .....	14
2.2 DIFERENCIÁLNÍ ROVNICE POPISUJÍCÍ MAGNETICKÉ POLE V UVAŽOVANÉM MAGNETICKÉM OBVODU ....	15
2.3 OKRAJOVÉ PODMÍNKY .....	17
2.4 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ .....	18
<b>3. PŘÍPRAVA KONSTRUKČNÍHO NÁVRHU.....</b>	<b>20</b>
3.1 VÝCHOZÍ KONFIGURACE OBVODU .....	20
3.1.1 <i>Magnetický obvod 2</i> .....	22
3.1.2 <i>Magnetický obvod 3</i> .....	24
3.1.3 <i>Magnetický obvod 4</i> .....	26
3.2 VLIV VELIKOSTI MAGNETICKÉHO OBVODU .....	28
<b>4. VÝROBA MAGNETICKÉHO OBVODU .....</b>	<b>29</b>
4.1 JEDNOTLIVÉ DÍLY .....	29
4.2 SÍLY MAGNETŮ.....	34
<b>5. EXPERIMENTÁLNÍ PROVĚŘENÍ MAGNETICKÉHO POLE V PRACOVNÍ KOMOŘE.....</b>	<b>35</b>
5.1 POPIS POUŽITÉHO MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ .....	35
5.2 MĚŘICÍ SÍŤ, POPIS MĚŘENÍ.....	38
5.3 OBDRŽENÉ VÝSLEDKY .....	40
5.3.1 <i>Obdržené výsledky - měřením</i> .....	40
5.3.2 <i>Obdržené výsledky – výpočtem QF</i> .....	42
5.4 ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ A DISKUZE K VÝSLEDKŮM .....	44
<b>6. ZÁVĚR .....</b>	<b>46</b>
LITERATURA.....	47
PŘÍLOHY .....	49

## Seznam symbolů

$B$ [T]	.....	Magnetická indukce
$H$ [ $A \cdot m^{-1}$ ]	.....	Intenzita magnetického pole
$\mu$ [ $H \cdot m^{-1}$ ]	.....	Permeabilita
$T_{\max}$ [ $^{\circ}C$ ]	.....	Maximální pracovní teplota
$U_H$ [V]	.....	Hallovo napětí
$\delta_x$ [mT]	.....	Rozdíl magnetické indukce v ose $x$ mezi výpočty programu Quick Field a naměřenými hodnotami
$\delta_y$ [mT]	.....	Rozdíl magnetické indukce v ose $y$ mezi výpočty programu Quick Field a naměřenými hodnotami

Ostatní symboly vyplývají z kontextu textu ...



## Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na magnetický obvod budící v daném objemu magnetické pole zadané velikosti. V řadě přírodovědeckých i technických aplikací se lze setkat s požadavkem silných homogenních magnetických polí, generovaných vhodně uspořádanými magnetickými obvody buzenými permanentními magnety. V této práci jsou popsány jednotlivé kroky od návrhu, sestavení až po jeho proměření. Jsou zde uvedeny vlastnosti jednotlivých součástí. V závěru této práce je provedeno zhodnocení magnetického obvodu. V příloze jsou uvedeny výrobní výkresy jednotlivých částí magnetického obvodu.

V současné době dochází k velikému nárůstu elektromagnetických polí, a tak se vedou diskuse o jejich působení a vlivu na organismy. V této souvislosti mnoho vědců a odborníků zkoumá následky neustále rostoucího zatěžování prostředí elektromagnetickým zářením a hovoří o tzv. elektrosmogu či elektrostresu. Pod pojmem elektrosmog se rozumí různé elektrické, magnetické či elektromagnetické záření, které nás obklopuje. Termínem elektrostres je označován vliv působení elektromagnetických polí na nervovou soustavu organismu.

Tento experimentální magnetický obvod lze využít pro výuku na Katedře teoretické elektrotechniky (KTE) : měření magnetického pole Hallovo sondou. Též by mohl být použit pro výuku měření neelektrických veličin na Katedře technologií a měření (KET). Vlastnosti prezentovaného magnetického obvodu lze využít také v medicíně. Vyroběný magnetický obvod může sloužit například k výzkumu vlivu stacionárního magnetického pole na živou tkáň. Lze jej využít i v biologii pro zkoumání vlivu stacionárního magnetického pole na klíčení rostlin a podobně.

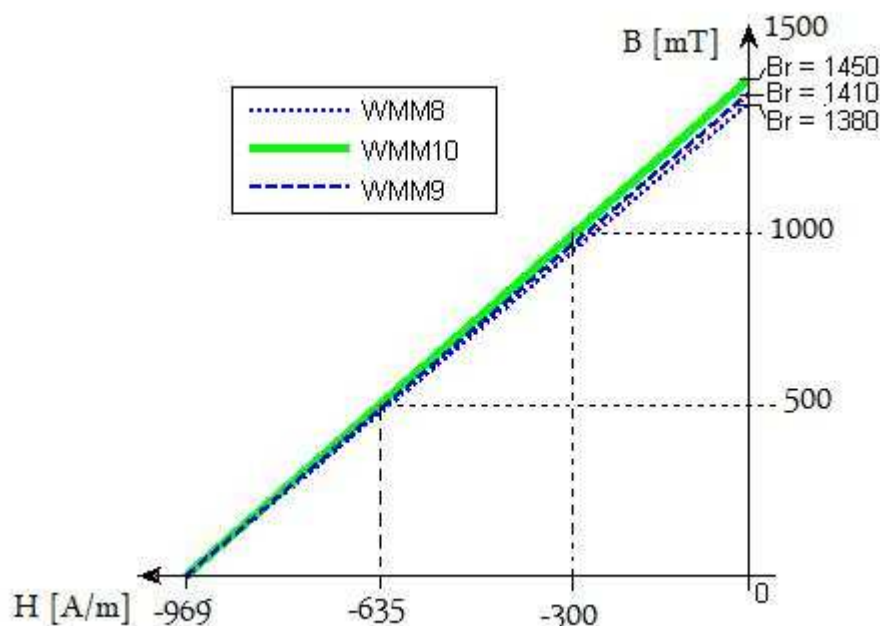
Cílem práce je tedy sestavit magnetický obvod jako stavebnici. Daný obvod pak bude fyzikálně objasněn a popsán matematickým modelem. Simulace problému byla provedena v profesionálním počítačovém programu QuickField. Následně byl obvod proměřen Hallovo sondou.

## 1. Formulace problému

Z předchozí kapitoly (tj. Úvodu) vyplývá, že hlavním cílem je sestavení magnetického obvodu o zadaných parametrech, jeho proměření Halloovou sondou a následné ověření onoho měření profesionálním programem Quick Field (QF). Zmíněný obvod je složen z permanentních magnetů. V souvislosti s předchozí poznámkou je zapotřebí uvést dělení materiálů z hlediska magnetismu:

- **Diamagnetické**, jsou látky jejich relativní permeabilita  $\mu_r < 1$ . Výsledný magnetický moment je roven 0. Velikost vnějšího magnetického pole v jejich přítomnosti klesá. Mezi tyto látky patří například zlato (Au), měď (Cu).
- **Paramagnetické**, jsou látky jejich relativní permeabilita  $\mu_r > 1$ . Jednotlivé částice těchto látek mají nenulový magnetický moment, avšak jejich výsledný magnetický moment je nulový. Vnější magnetické pole mohou zesilovat, ale jen do určité hodnoty (většímu zesílení brání tepelný pohyb atomů). Mezi tyto látky patří například hliník (Al), draslík (K).
- **Feromagnetické**, jsou látky jejichž relativní permeabilita  $\mu_r \gg 1$ . Jejich atomy jsou uspořádány do jednotlivých domén. Přiložením magnetického pole dochází k úplnému nasycení (domény se natáčejí či zvětšují v závislosti na přiloženém magnetickém poli)[8].

Pro sestavení magnetického obvodu byly vybrány Neodymové magnety (NdFeB) od firmy Magsy, s.r.o. ([www.magsy.cz](http://www.magsy.cz)). Závislost magnetické indukce  $B$  [mT] na intenzitě magnetického pole  $H$  [A\*m<sup>-1</sup>] těchto magnetů je znázorněna na Obr. 1.1: Jedná se o přímkovou závislost. Jejich vlastnosti jsou popsány v kapitole: **5. Výroba magnetického obvodu.**

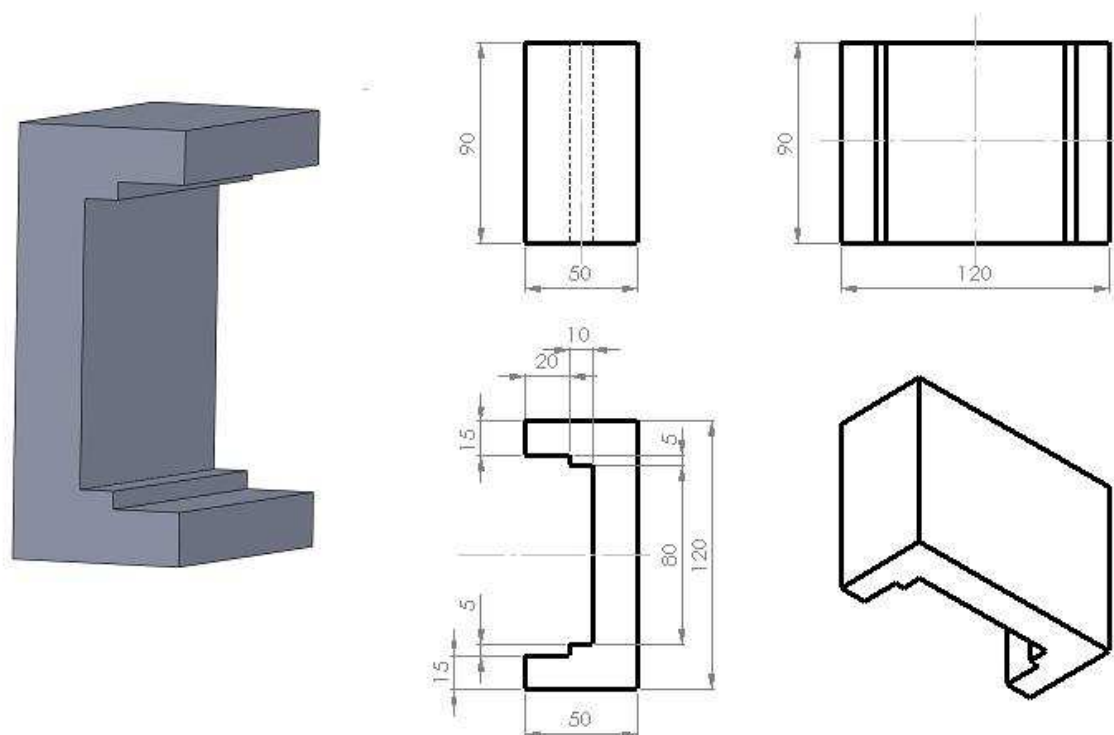


Obr. 1.1 : Závislost magnetické indukce  $B$  [mT] na intenzitě magnetického pole  $H$  [ $A \cdot m^{-1}$ ] pro různé typy magnetů NdFeB firmy Magsy s.r.o.

## 1.1 Popis navrženého magnetického obvodu

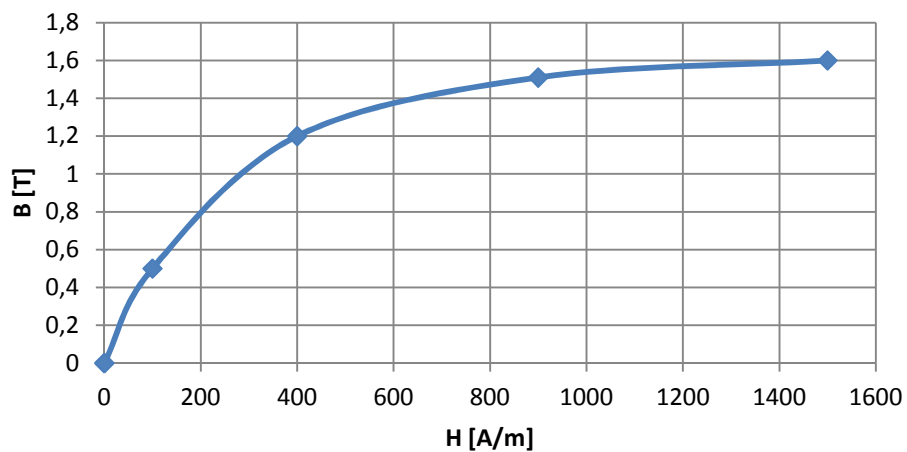
Cílem je navrhnout a proměřit magnetický obvod, který generuje stacionární magnetické pole. Tento obvod je navržen jako stavebnice. To znamená, že je zde možnost přidávat (dodávat) či naopak odebírat permanentní magnety. Díky tomu lze regulovat intenzitu magnetického pole  $H$  [ $A \cdot m^{-1}$ ], případně průměrnou magnetickou indukci  $B_{avr}$  [mT] v pracovním prostoru (Cube), v němž se předpokládá umístit Petriho miska se zkoumaným objektem. Dále pak bylo zapotřebí vytvořit i prostor pro zavedení měřícího zařízení (tj. Hallova sonda).

Pracovní prostor (Cube) a magnety jsou uzavřeny ve dvou fokusátorech, tj. dvou celistvých dílů z magnetické oceli ČSN 11 523 (viz. Obr. 2.2). Její závislost magnetické indukce  $B$  [mT] na magnetické intenzitě  $H$  [ $A \cdot m^{-1}$ ] je znázorněna na Obr. 1.3 (Tabulka 1.1). Další podrobnosti a vlastnosti tohoto fokusátoru jsou podrobněji uvedeny a vysvětleny v kapitole: **4. Příprava konstrukčního návrhu**. Jsou zde mimo jiné také uvedeny různé návrhy ověřené 2D výpočtem Quick Field, plastové díly zastávající mechanickou a stavební funkci obvodu.



Obr. 1.2 : Celistvý díl magnetického obvodu z oceli ČSN 11 523

### Závislost $B(H)$



Obr. 1.3 : Závislost  $B(H)$  pro ocel ČSN 11 523

Ke zkonstruování a proměření magnetického obvodu byl zvolen následující postup práce, který je rozdělen na jednotlivé kapitoly:

- Příprava konstrukčního návrhu (ověřený 2D výpočty)
- Výroba magnetického obvodu
- Experimentální prověření magnetického pole v pracovní komoře a jeho porovnání s numerickým řešením
- Případné návrhy podobných zařízení v budoucnu

## 2. Matematický model problému

### 2.1 Maxwellovy rovnice

V teorii elektromagnetického pole se veškeré vztahy mohou popsat (vyjadřovat) pomocí tzv. Maxwellových rovnic. Tyto základní zákony v roce 1864 zformuloval James Clerk Maxwell. Rovnice lze interpretovat pomocí integrálního či diferenciálního tvaru. Jejich podoba je vyjádřena v Tabulka 2.1 [1].

Tabulka 2.1 : Přehled Maxwellových rovnic [1]

		Integrální tvar	Diferenciální tvar
I.	Ampérův zákon celkového proudu	$\oint_c \mathbf{H} \, d\mathbf{l} = I + \left(\frac{d\psi}{dt}\right)$	$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \left(\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}\right)$
II.	Faradayův indukční zákon	$\oint_c \mathbf{E} \, d\mathbf{l} = -\left(\frac{d\phi}{dt}\right)$	$\text{rot } \mathbf{E} = -\left(\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}\right)$
III.	Gaussova věta	$\oint_s \mathbf{D} \, d\mathbf{S} = Q$	$\text{div } \mathbf{D} = \rho$
IV.	Rovnice kontinuity magnetického pole	$\oint_s \mathbf{B} \, d\mathbf{S} = 0$	$\text{div } \mathbf{B} = 0$

Na základě těchto rovnic (viz. Tabulka 2.1) lze řešit jak magnetické tak elektrické pole. Vzhledem k tomu, že se v této práci řeší magnetický obvod z permanentních magnetů, tak elektrické pole a jeho vlastnosti zde uvedeny nejsou. Z přehledu (viz Tabulka 2.1) je patrné, že magnetické pole je charakterizováno (popisováno) dvěma základními veličinami. Ty se dělí na **místní** a **celkové**. Místní veličiny, které charakterizují magnetické pole, jsou magnetická indukce  $\mathbf{B}$  a intenzita magnetického pole  $\mathbf{H}$ . Celkové veličiny jsou pak *magnetomotorické napětí*  $U_m$  a *magnetický tok*  $\phi$  [2]. Magnetická indukce je fyzikální a vektorová veličina, která vyjadřuje silové účinky magnetického pole na částice s nábojem nebo magnetickým dipólovým momentem [3]. Tu lze vyjádřit tímto vztahem:

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H} \text{ [T; H} \cdot \text{m}^{-1}; \text{A} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (2.1)$$

kde  $\mu$  je permeabilita pro níž platí vztah:

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (2.2)$$

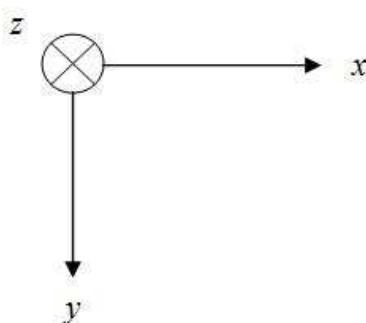
a  $\mathbf{H}$  je intenzita magnetického pole. Jedná se o vektorovou veličinu, kterou lze vyjádřit vztahem uvedeným v Tabulka 3.1. Výpočet magnetického toku  $\phi$  lze odvodit z Maxwellových rovnic:

$$\phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \text{ [Wb; T} \cdot \text{m}^2] \quad (2.3)$$

## 2.2 Diferenciální rovnice popisující magnetické pole v uvažovaném magnetickém obvodu

Magnetické pole v mém uvažovaném magnetickém obvodu, uspořádaném podle mých uvažovaných návrhů (viz. kapitola 4. Konstrukční návrh), je buzené soustavou permanentních magnetů o koerzivní síle  $\mathbf{H}_c$  a remanenci  $\mathbf{B}_r$ . V celém magnetickém obvodu jsou uvažovány tři druhy materiálu, které jsou poté obecně popsány těmito diferenciálními rovnicemi:

V 3D prostoru  $x, y, z$  (viz Obr. 2.1) pak platí:



Obr. 2.1 : Zvolený souřadný systém

pro permanentní Neodymový magnet (NdFeB)

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu} \cdot \operatorname{rot} \mathbf{A} - \mathbf{H}_c\right) = \mathbf{0} \quad (2.4)$$

pro feromagnetický materiál (ocel ČSN 11 523)

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu} \cdot \operatorname{rot} \mathbf{A}\right) = \mathbf{0} \quad (2.5)$$

pro neferomagnetický materiál (vzduch)

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{A} = \mathbf{0} \quad (2.6)$$

kde

$$\mathbf{A} = \mathbf{i} \cdot A_x(x, y, z) + \mathbf{j} \cdot A_y(x, y, z) + \mathbf{k} \cdot A_z(x, y, z) \quad (3.7)$$

V případě 2D problému se vektor  $\mathbf{A}$  (viz. (3.7)) zjednoduší do tvaru

$$\mathbf{A} = \mathbf{i} \cdot 0 + \mathbf{j} \cdot 0 + \mathbf{k} \cdot A_z(x, y) \quad (2.8)$$

a po dosazení (2.8) do (2.5), (2.6) a (2.7) se obdrží zjednodušené řešení 2D prostoru.



## 2.3 Okrajové podmínky

Jsou zde pro zjednodušení zápisu formulovaného pouze v 2D souřadném systému, tj. pro:

$$\mathbf{A} = \mathbf{i} \cdot 0 + \mathbf{j} \cdot 0 + \mathbf{k} \cdot A_z(x, y) \quad (2.8)$$

V řešení navrženého obvodu je zapotřebí počítat i s okrajovými podmínkami. Ty jsou udávány nejčastěji v tomto tvaru[5]:

- Dirichletova podmínka ( okrajová podmínka I. druhu ):

kde je známa hodnota  $A$  ( $\Gamma_I$ ) respektive  $A_z$  ( $\Gamma_I$ )

- Neumanova podmínka ( okrajová podmínka II. druhu ):

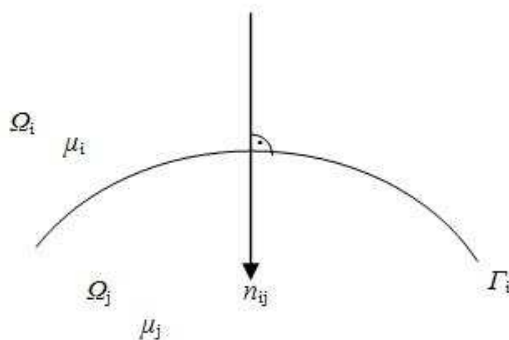
kde je známa

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial n} (\Gamma_{II.})$$

respektive

$$\frac{\partial A_z}{\partial n} (\Gamma_{II.})$$

Ostatní okrajové podmínky (například podmínka na rozhraní dvou oblastí (viz. Obr. 2.2)) jsou v případě metody konečných prvků (viz kapitola **2.4 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ**) splněny automaticky.



Obr. 2.2 : Podmínky na rozhraní

## 2.4 Metoda konečných prvků

V současné době se jedná o nejrozšířenější a nejvíce rozvíjenou metodu řešení fyzikálních polí. Zpravidla je možné řešit touto metodou problémy, které klasickými postupy nelze úspěšně řešit. Tato metoda pokrývá celou šíři fyzikálních aplikací. To jest například statika, dynamika, teplo a v neposlední řadě samozřejmě elektromagnetické pole. Její princip spočívá v diskretizaci spojitého kontinua do určitého (konečného) počtu prvků, přičemž zjišťované parametry jsou určovány v jednotlivých uzlových bodech. I když principy metody konečných prvků jsou známy již delší dobu, k jejímu masovému využití došlo teprve s nástupem moderní výpočetní techniky.

Podstata metody konečných prvků v rovinné oblasti spočívá v nejjednodušším případě v několika krocích. Nejdříve provedeme triangulaci dané rovinné oblasti  $\Omega$ . Tj. námi vyšetřovanou oblast rozdělíme na konečný počet trojúhelníkových podoblastí  $\Omega_n$  (pro  $n=1,2,\dots,n-1$ ). A to takových, že každé mají právě jednu ze tří společných (vzájemných) poloh:

- nemají žádný společný bod => jsou disjunktní
- mají společný jeden bod (například vrchol trojúhelníka)
- mají společnou jednu stranu

Tím vznikne diskrétní konečně-prvková síť. V této metodě však nemusíme použít jen trojúhelníky. Dá se použít samozřejmě i jiný geometrický obrazec (např. čtverec či obdélník). Ale pomocí trojúhelníků lze co nepřesněji pokrýt i geometricky složitější oblasti  $\Omega$ .

Po té co se daná oblast  $\Omega$  rozdělí na jednotlivé elementy (trojúhelníky) zavedeme soustavu souřadnic. Používají se kartézské souřadnice, čili  $(x, y)$ . Následně se provede aproximace na celé oblasti  $\Omega$  hledanou obecnou funkcí  $u$  po částech polynomem:

$$u = u^p = P^p(x, y) \quad \forall Q^p ; \quad p = 1, 2, \dots, Q \quad (2.14)$$

K matematickému modelu pole, které je popsáno rovnicemi (2.4) a (2.5) se přiřadí funkcionál. Ten má fyzikální význam celkové energie, která se naakumuluje určitým polem. Dále se pak provede řešení soustavy rovnic, tj. dostaneme hledané hodnoty v uzlech nebo elementech.

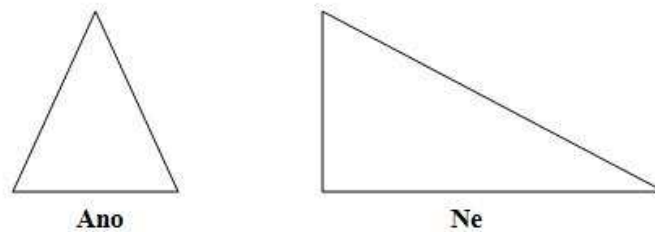
Poznámka:

- v případě MKP (metody konečných prvků) jsou automaticky splněny podmínky na rozhraní
- poměr :

$$\frac{h_{max}}{h_{min}} \leq 10$$

kde  $h_{max}$  je největší délka a  $h_{min}$  naopak nejmenší délka.

- Pokud bude element = trojúhelník => co možná nejrovnostřednější (viz. Obr. 2.3)



Obr. 2.3 : Vhodné uspořádání trojúhelníkových elementů.

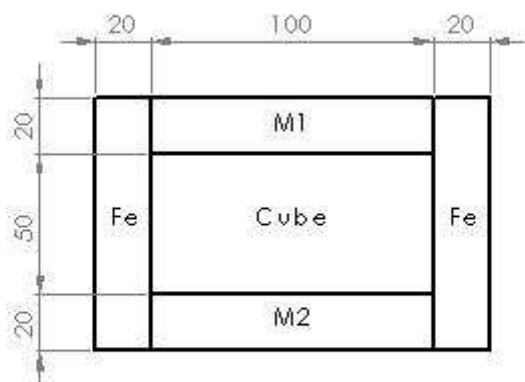
Výhodou metody je snadná realizace tvarově a geometricky složitějších oblastí (v mém případě  $\Omega$ ). Ovšem jako každá jiná metoda má i své nevýhody. A tou je náročnější programová realizace.

### 3. Příprava konstrukčního návrhu

Pro samotné sestavení magnetického obvodu, bylo nejprve zapotřebí vymyslet a zvolit jeho nejvhodnější uspořádání a velikost. Pro simulaci a chování navržených variant magnetického obvodu byl zvolen program Quick Field. Při sestavování těchto obvodů bylo uvažováno o použití dvou permanentních neodymových magnetů (NdFeB) uspořádaných tak, že jeden je umístěn uprostřed dole a druhý nahoře (obvod je symetrický). Ve finálním (reálném) řešení je použit pouze jeden magnet. Tato kapitola je rozdělena do jednotlivých podkapitol podle navrhovaných obvodů.

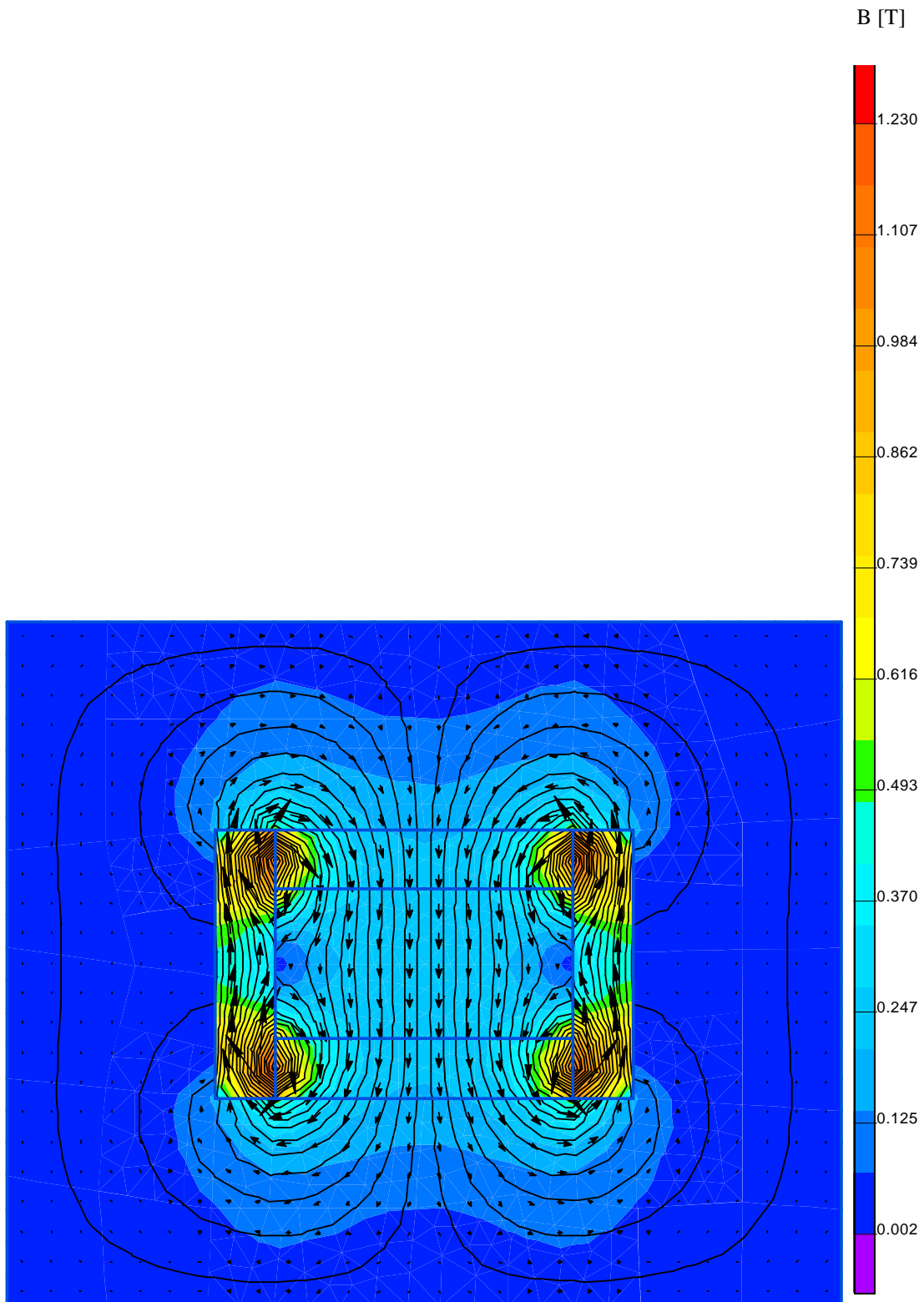
#### 3.1 Výchozí konfigurace obvodu

Výchozí (základní) magnetický obvod byl navržen tak, že v horizontální rovině jsou umístěny permanentní magnety, mezi kterými je vytvořena vzduchová mezera. Uvnitř vzduchové mezery bude natěsno umístěna krabička (Cube). V podélné rovině se k magnetům z pravé i z levé strany umístily fokusátory (magnetická ocel) (viz. Obr. 3.1).



Obr. 3.1 : Výchozí magnetický obvod a jeho rozměry (v mm). (M1,M2 – permanentní magnety; Fe – fokusátory; Cube – pracovní prostor)

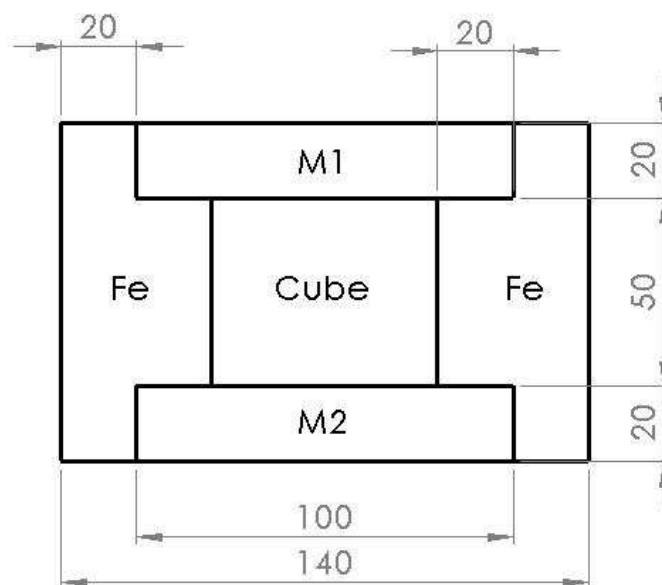
Základní obvod byl pak zadán v programu Quick Field, ve kterém bylo provedeno i jeho následné řešení. Výsledkem byla průměrná hodnota magnetické indukce uvnitř pracovního prostoru - Cube  $B_{avr} = 0,239$  [T] (viz. Obr. 3.2).



Obr. 3.2 :Výsledek řešení navrženého základního magnetického obvodu

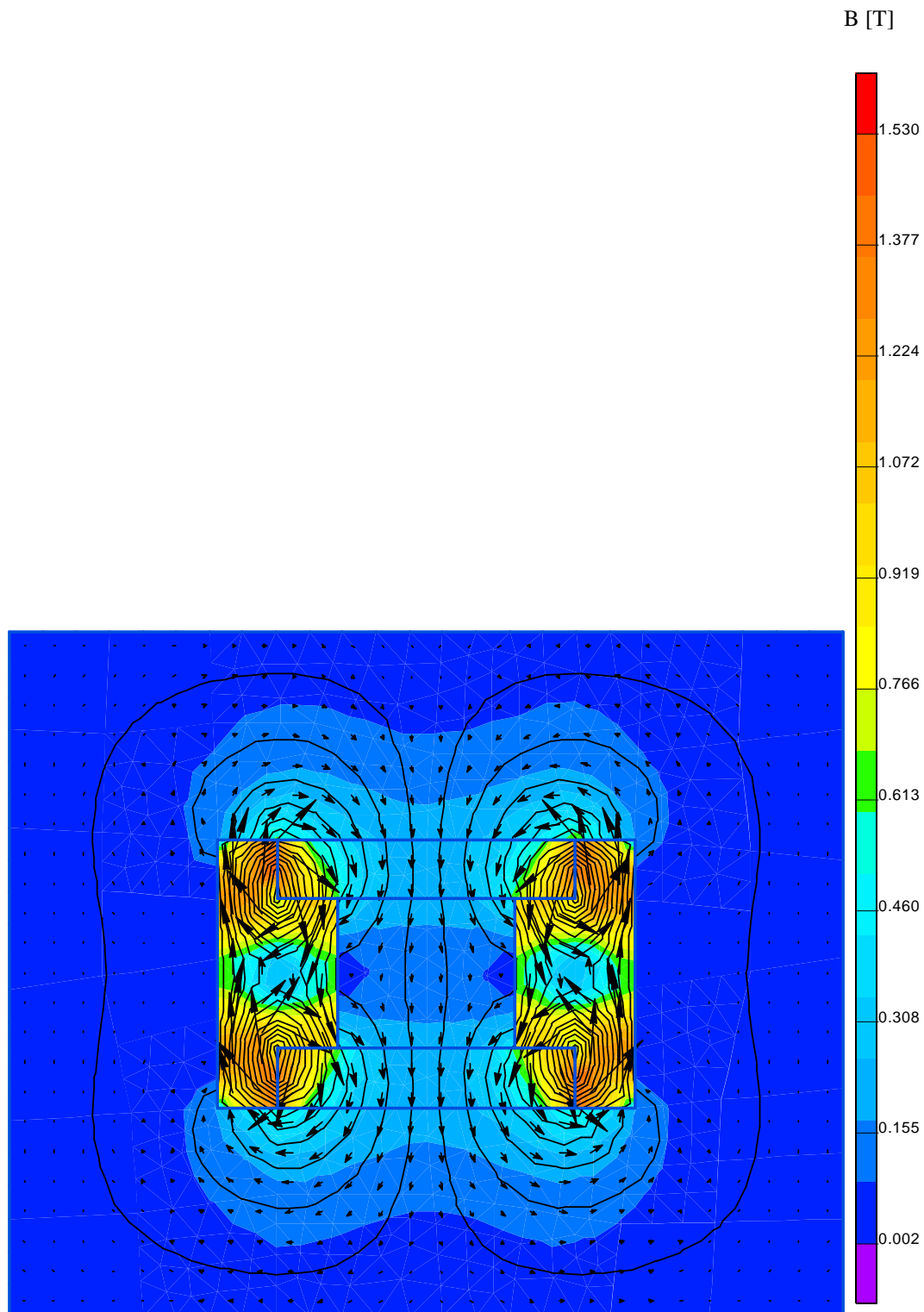
### 3.1.1 Magnetický obvod 2

Tento obvod vychází z předešlého (základního) magnetického obvodu. V tomto případě bylo uvažováno vylepšení fokusátoru o vzpěru mezi magnety. To znamená, že tím bude docíleno lepšího ukotvení magnetů na magnetické oceli (viz Obr. 3.3).



Obr. 3.3 : Vylepšený magnetický obvod (fokusátor) a jeho rozměry (v mm). (M1,M2 – permanentní magnety; Fe – fokusátory; Cube – pracovní prostor)

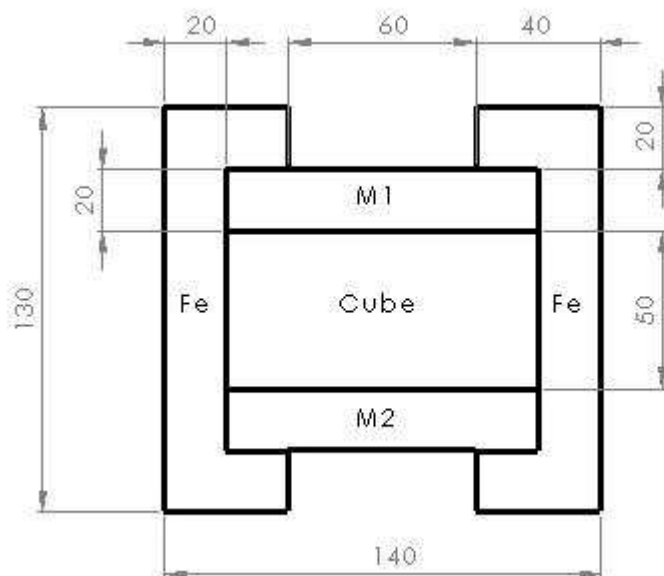
Výsledkem byla průměrná hodnota magnetické indukce uvnitř pracovního prostoru - Cube  $B_{avr} = 0,141$  [T] (viz. Obr. 3.4). Oproti základnímu obvodu zde došlo k poklesu  $B_{avr}$  [T] o cca 40%.



Obr. 3.4 : Výsledek řešení navrženého magnetického obvodu 2

### 3.1.2 Magnetický obvod 3

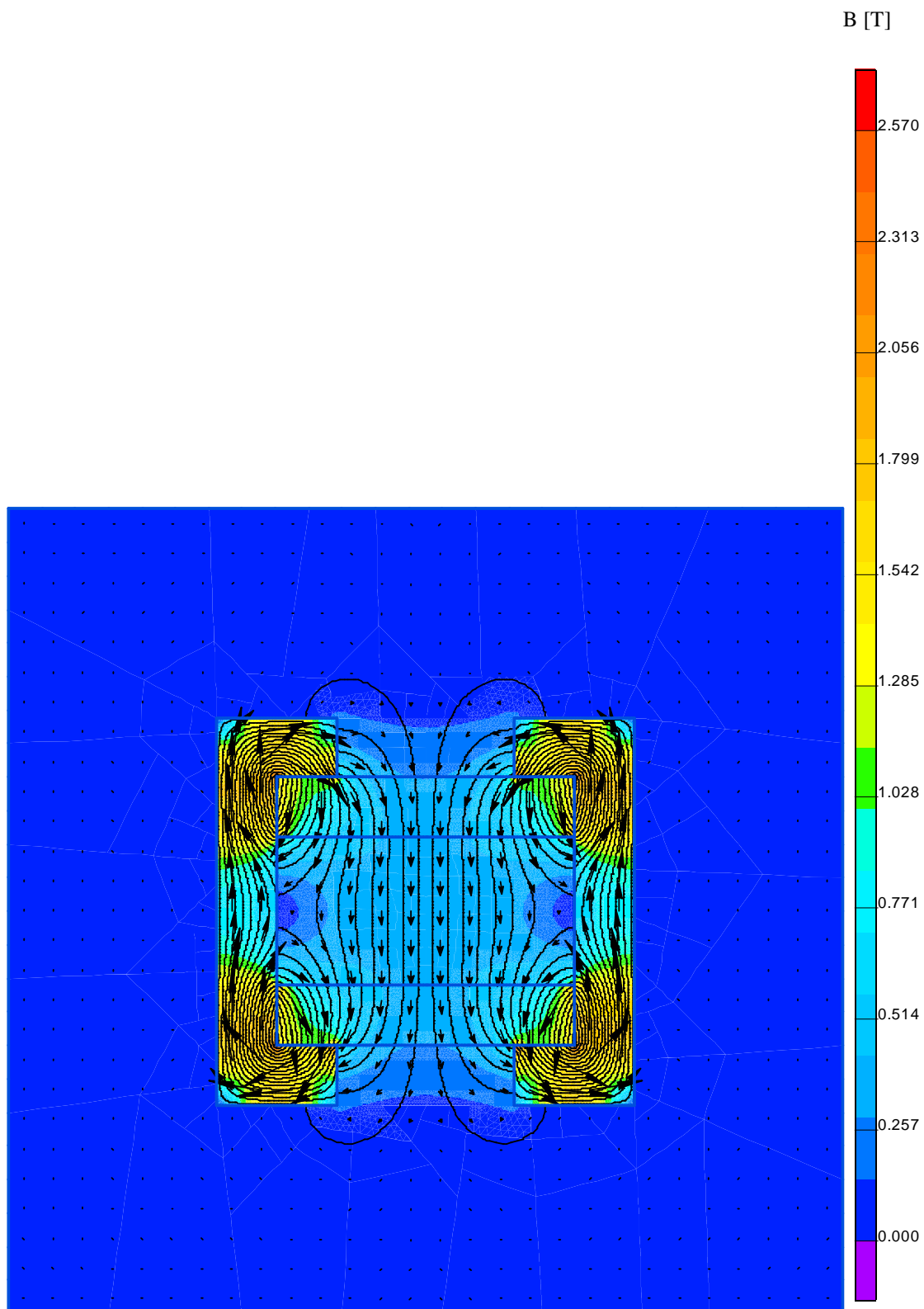
U toho obvodu bylo předpokládáno, že krabíčka (Cube) umístěná mezi magnety zabrání jejich vzájemnému přitažení. Nebylo však zajištěno, aby magnety nevypadaly vrchní stranou. Proto byl navržen tento magnetický obvod, kde fokusátory částečně překrývají magnety na jejich vrchní straně. Další výhodou je, že magnetické pole se bude přes ně lépe uzavírat. Vizualizace tohoto obvodu je na Obr. 3.5 .



Obr. 3.5 : Vylepšený magnetický obvod 3 a jeho rozměry (v mm). (M1,M2 – permanentní magnety; Fe – fokusátory; Cube – pracovní prostor)



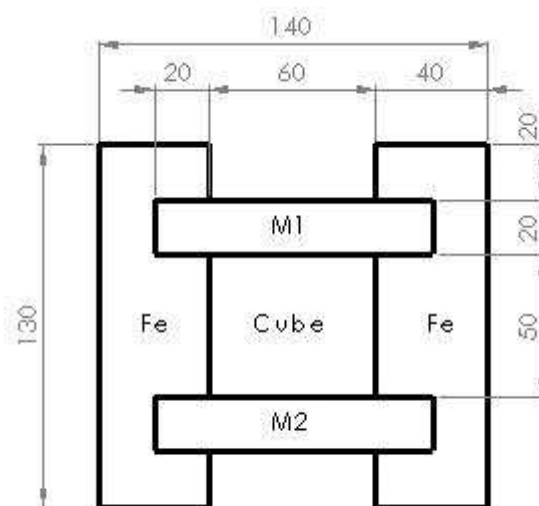
Výsledkem byla průměrná hodnota magnetické indukce uvnitř pracovního prostoru - Cube  $B_{avr} = 0,346$  [T] (viz. Obr. 3.6). Oproti základnímu obvodu zde došlo k navýšení  $B_{avr}$  [T] o cca 45%.



Obr. 3.6 : Výsledek řešení navrženého magnetického obvodu 3

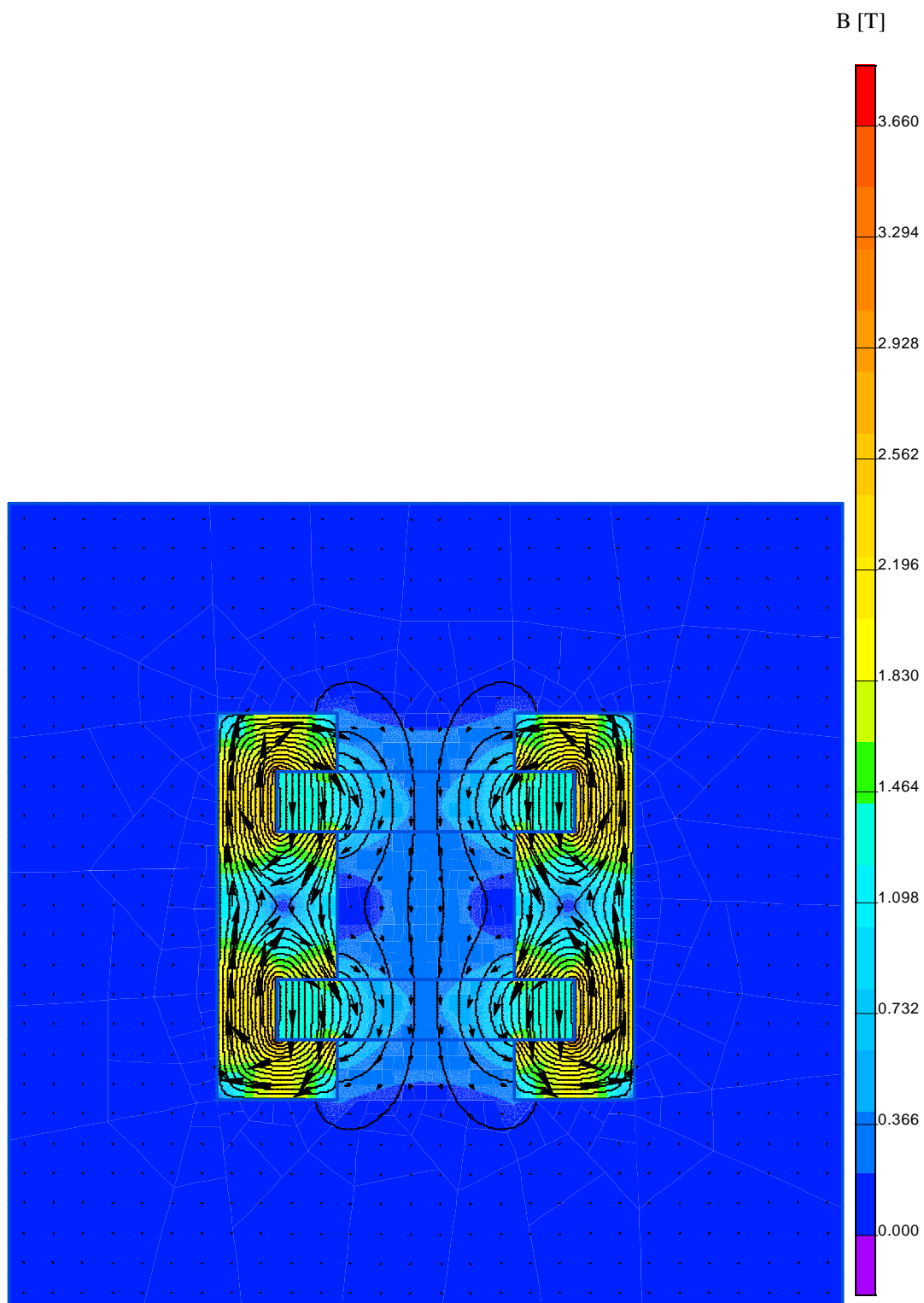
### 3.1.3 Magnetický obvod 4

Tato poslední navrhovaná koncepce magnetického obvodu byla vytvořena ze dvou předcházejících variant (tj. magnetický obvod 2 a 3). Fokusátory jsou navrženy tak, aby magnety byly nasunuty do žlabu, který je vytvořen na koncích nemagnetické oceli. Jedná se tedy o variantu, která zabraňuje uvolnění (vypadnutí) permanentního magnetu (viz Obr. 3.7).



Obr. 3.7 : Vylepšený magnetický obvod 4 a jeho rozměry (v mm). (M1,M2 – permanentní magnety; Fe – fokusátory; Cube – pracovní prostor)

Po vyřešení magnetického obvodu byl obdržen výsledek  $B_{avr} = 0,245$  [T] (viz. Obr. 3.8).



Obr. 3.8 : Výsledek řešení navrženého magnetického obvodu 4

Po vyřešení a obdržení výsledků u všech navržených magnetických obvodů s permanentními neodymovými magnety (NdFeB) byl dle  $B_{avr}$  [T] zvolen magnetický obvod 3 (viz. Obr. 3.5) pro konstruování reálného magnetického obvodu.

### 3.2 Vliv velikosti magnetického obvodu

Poté co bylo vybráno vhodné uspořádání obvodu, bylo zapotřebí (nutné) ověřit závislost  $B_{avr}$  [T] na měnící se velikosti fokusátoru. Pro toto prověření byl zvolen koeficient  $k$  (viz. Tabulka 3.1, ( rovnice 3.1 )), jehož velikost udávala zmenšení či zvětšení rozměrů fokusátoru (viz. Obr. 3.9).

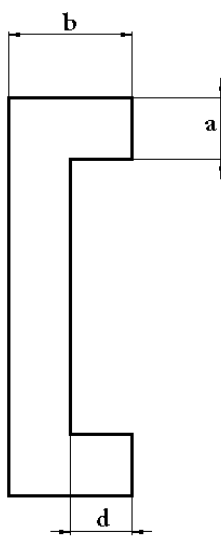
$$k = \frac{a}{a_0} = \frac{b}{b_0} = \frac{c}{c_0} \quad (3.1)$$

Kde čitatele (tj.  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ) jsou původní rozměry a jmenovatele (tj.  $a_0$ ,  $b_0$ ,  $c_0$ ) jsou zmenšené či zvětšené rozměry fokusátoru.

Jak je patrné z Tabulka 3.1, se vzrůstajícím koeficientem docházelo k nárůstu  $B_{avr}$  [T] a při snižování naopak k poklesu. Vzhledem k tomuto zjištění byl pak obvod upraven do finální konstrukční verze (viz. kapitola Výroba magnetického obvodu).

Tabulka 3.1 : Závislost  $B_{avr}$  na koeficientu  $k$

$k$	%	$a$ [mm]	$b$ [mm]	$d$ [mm]	$B_{avr}$ [T]
0,9	- 10 %	0,018	0,036	0,018	0,337
1,1	+ 10 %	0,022	0,044	0,022	0,356
0,8	- 20 %	0,016	0,032	0,016	0,326
1,2	+ 20 %	0,024	0,048	0,024	0,365
0,7	- 30 %	0,014	0,028	0,014	0,314
1,3	+ 30 %	0,026	0,052	0,026	0,372

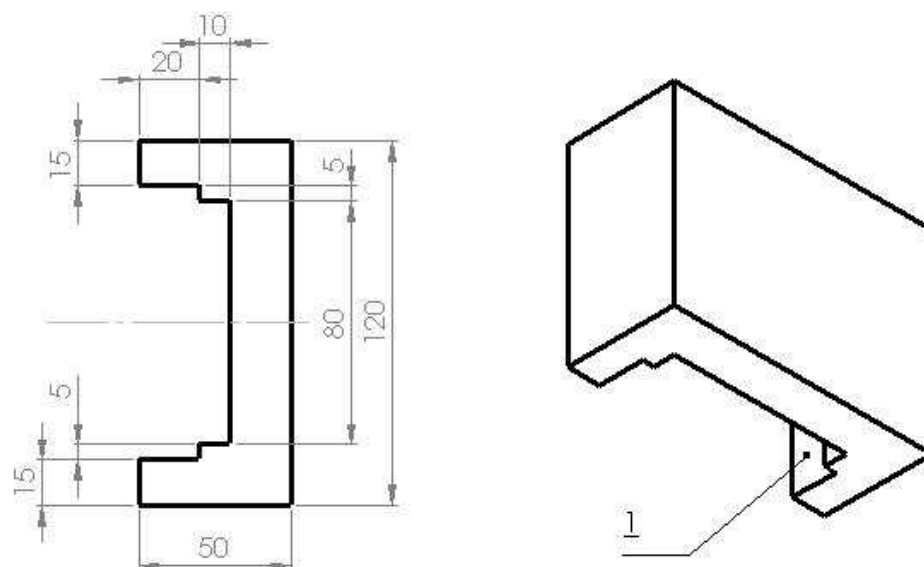


Obr. 3.9 : Rozměry, které se měnily v závislosti na koeficientu  $k$

## 4. Výroba magnetického obvodu

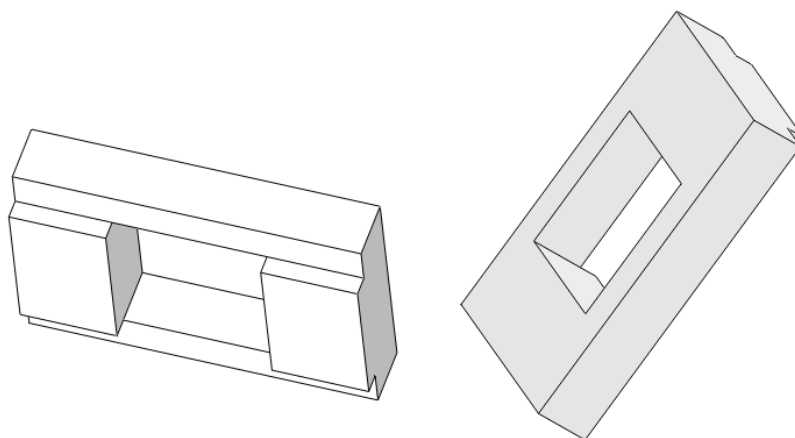
### 4.1 Jednotlivé díly

Jak již z předchozí kapitoly vyplývá, byl vybrán magnetický obvod 3. Ten však musel být upraven (velikost, podoba) tak, aby bylo možné jej vyrobit (vyfrézovat). Vzhledem k tomu, že je obvod brán jako stavebnice, bylo zapotřebí upravit fokusátory tak, aby bylo možné přidávat či odebírat permanentní neodymové magnety (NdFeB). Proto byla při výrobě fokusátoru na koncích vytvořena zarážka 1 (viz. Obr. 4.1), která po složení obou dvou kusů vytvoří žlab pro magnety (viz. Obr. 4.1, a). Fokusátory jsou vyrobeny z uhlíkové oceli ČSN 11 523 a jejich výrobní výkres je uveden v kapitole Přílohy.



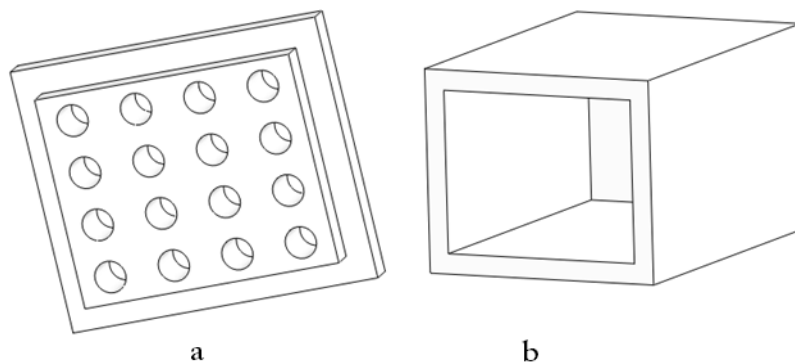
Obr. 4.1 : Finální podoba fokusátoru, a – rozměry, b – vizuální podoba, 1 – zarážka

Další nedílnou součástí je tzv. vzpěra (viz. Obr. 4.2). Jedná se o součást, která slouží k zabránění posuvu magnetu z určené polohy (střed magnetického obvodu). Další její funkce je stavební prvek. Slouží k pevnému uchycení krabičky (Cube). Její rozměry a výrobní výkres jsou uvedeny v kapitole Přílohy. Byla vyrobena z tvrzeného plastu. Na tuto část je použitý materiál černý polyetylen (PE 100), ISO 11501 (viz. kapitola Přílohy).



Obr. 4.2 : Plastová vzpěra magnetického obvodu

Součástí je také krabička (Cube). Ta skládá se ze dvou částí. První je víko (viz. Obr. 4.3, a) , na kterém jsou předvrtány technické otvory, které slouží k zavedení Hallovy sondy (viz. Kapitola Experimentální prověření magnetického pole v pracovní komoře. Druhá součást je dutá nádoba (viz. Obr. 4.3, b), do které je možno umístit Petriho misku. Složením těchto dvou částí vznikne samotná krabička. Technické výkresy obou částí jsou uvedeny v kapitole Přílohy.



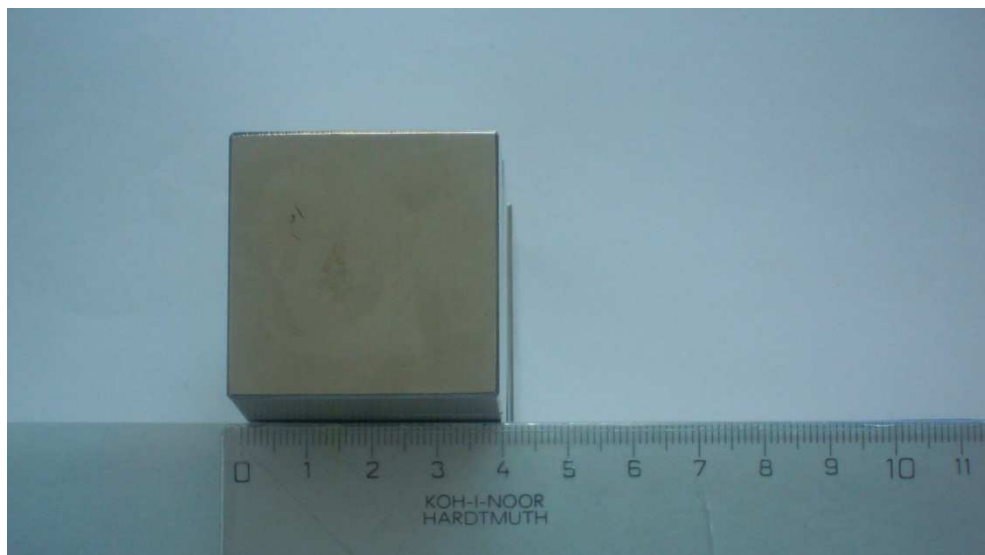
Obr. 4.3 : Krabička finálního magnetického obvodu, a –víko, b - nádoba

Permanentní neodymové magnety (NdFeB) (viz. Obr. 4.4) byly pořízeny od firmy Magsy, s.r.o. (www.magsy.cz). V současné době se jedná o nejsilnější magnety na trhu. Jsou vyráběny metodou sintrování. Sintrování, též spékání či slinutí. Jedná se o práškovou metodu, při které jsou materiály ve formě prášku zahřáty pod jejich teplotu tání. Tím dojde k jejich spečení [9]. Takto vzniklý materiál se pak řeže na požadované rozměry pomocí diamantových kotoučů. Permanentní neodymové magnety (NdFeB) potřebují další úpravu, protože jsou málo odolné vůči korozi. Z tohoto důvodu se jejich povrch upravuje nanesením zinku, epoxidové pryskyřice, niklu či jsou upraveny tzv. pasivací [10].

Byl vybrán magnet WMM 10 vzhledem k jeho vlastnostem (viz. Tabulka 4.1). Závislost magnetické indukce  $B[H]$  na intenzitě magnetického pole  $H[A \cdot m^{-1}]$  je znázorněna na Obr. 1.1. Bylo pořízeno 8 kusů těchto magnetů za cenu 5 373, 60 Kč.

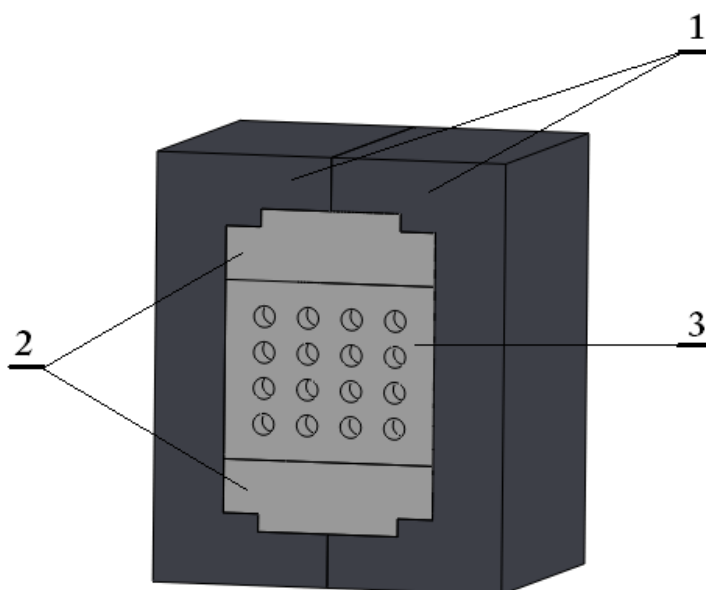
Tabulka 4.1 : Vlastnosti neodymových magnetů do teploty 80 °C [11]

TYP	Remanence ( $B_r$ )		Koercivita ( $H_{cb}$ )		Vnitřní koercivita ( $H_{ci}$ )		Max. energetický součin ( $B_H \max$ )	
	mT	kGs	kA/m	kOe	kA/m	kOe	kJ/m <sup>3</sup>	MGOe
VMM - teplotní odolnost do 80 °C								
VMM2	1080-1150	10.8-11.5	796-860	10.0-10.8	$\geq 955$	$\geq 12.0$	223-247	28-31
VMM3	1130-1170	11.3-11.7	844-884	10.6-11.1	$\geq 955$	$\geq 12.0$	247-263	31-33
VMM4	1170-1210	11.7-12.1	876-915	11.0-11.5	$\geq 955$	$\geq 12.0$	263-286	33-36
VMM5	1200-1280	12.0-12.8	876-915	11.0-11.5	$\geq 955$	$\geq 12.0$	286-302	36-38
VMM6	1260-1320	12.6-13.2	876-969	11.0-12.2	$\geq 955$	$\geq 12.0$	302-318	38-40
VMM7	1300-1350	13.0-13.5	876-969	11.0-12.2	$\geq 955$	$\geq 12.0$	318-334	40-42
VMM8	1320-1380	13.2-13.8	876-969	11.0-12.2	$\geq 876$	$\geq 11.0$	334-358	42-45
VMM9	1360-1410	13.6-14.1	876-969	11.0-12.2	$\geq 876$	$\geq 11.0$	358-382	45-48
VMM10	1380-1450	13.8-14.5	876-969	11.0-12.2	$\geq 876$	$\geq 11.0$	382-398	48-50



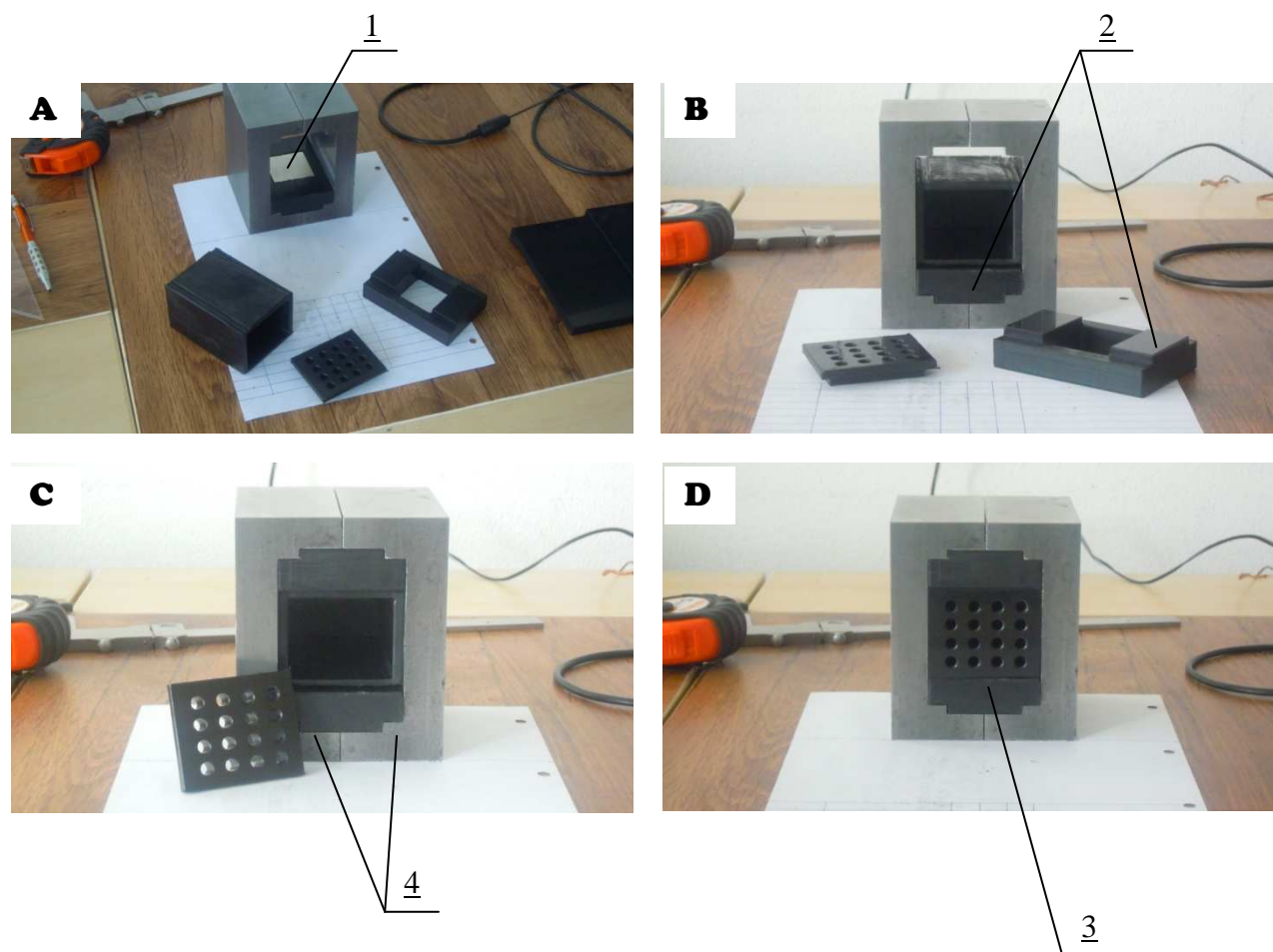
Obr. 4.4 : Neodymový magnet WMM 10

Veškeré tyto součásti pak byly složeny v jeden funkční magnetický obvod (viz. Obr. 4.5). Zde pozice 1 jsou fokusátory, pozice 2 vzpěry, ve kterých jsou ve středu umístěny permanentní neodymové magnety a pozice 3 jest krabička (Cube). Postupné složení magnetického obvodu je uvedeno na Obr. 4.6 . Na obrázku A je sesazení fokusátoru k sobě a upevnění magnetu do jejich žlabu s jeho následným přichycením vzpěrou. Poté na obrázku B přidání krabičky bez víka. Pod písmenem C je na obrázku znázorněno ukotvení krabičky pomocí druhé vzpěry a na posledním obrázku (tj. D) je uzavření krabičky víkem s předvrtanými měřicími otvory.



Obr. 4.5 : Simulace magnetického obvodu vytvořená v programu Solid Works





Obr. 4.6 : Sestavování magnetického obvodu. 1 - Neodymový magnet, 2 – vrpěry, 3 – krabička (Cube), 4 - Fokusátory

## 4.2 Síly magnetů

Při sestavování magnetického obvodu bylo také nutno rozhodnout, zda-li jej bude nutné stáhnout pomocí šroubů, hliníkových pásek či nikoli. Proto bylo v programu QF nutné nasimulovat vzájemné působení permanentního neodymového magnetu.

Výsledkem bylo zjištění, že vzájemné působení dvou magnetů (viz. Obr. 4.7) má následující fyzikální vlastnosti:

$$F = 4628,4 \text{ N}$$

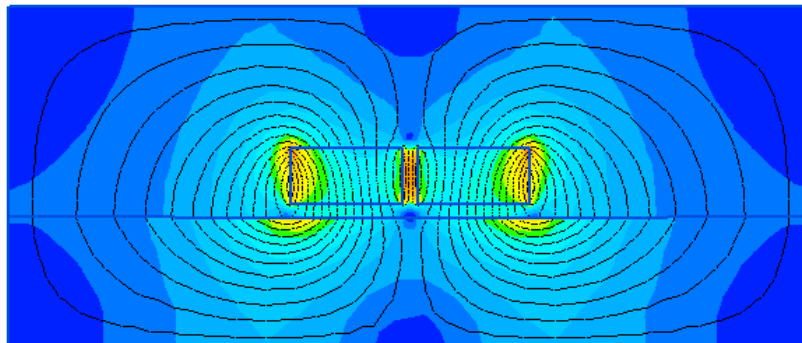
$$\text{Úhel } \beta = -1,1117^\circ$$

Výsledek působení magnetu s fokusátorem byl :

$$F = 4504,5 \text{ N}$$

$$\text{Úhel } \beta = -31,076^\circ$$

Výsledek výpočtů ukázal, že není nutno magnetický obvod stahovat hliníkovými pásky či šrouby, protože magnet svojí silou je schopen udržet daný obvod pohromadě.



Obr. 4.7 : Vzájemné působení dvou NdFeB magnetů

## 5. Experimentální prověření magnetického pole v pracovní komoře

### 5.1 Popis použitého měřicího zařízení

Pro měření této úlohy byl použit měřicí přístroj Teslametr Elimag MP-1 (mikroprocesorem řízený 3-D teslametr) (viz. Obr. 5.1) od společnosti Elidis s. r. o. . Jedná se o přístroj, který dokáže měřit konstantní či proměnné hodnoty magnetické indukce  $B$  [mT] [6].

Princip tohoto přístroje je založen na Hallovu jevu. Jde o fyzikální jev, kdy polovodičovou nebo kovovou destičku umístíme do prostředí vnějšího magnetického pole, a to tak, aby vektor magnetické indukce  $B$  byl kolmý na destičku. Pokud takto umístěnou destičku budu protékat elektrickým proudem  $I$  [A], dojde k vytvoření tzv. Hallova napětí  $U_H$  [V], které je dáno tímto vztahem:

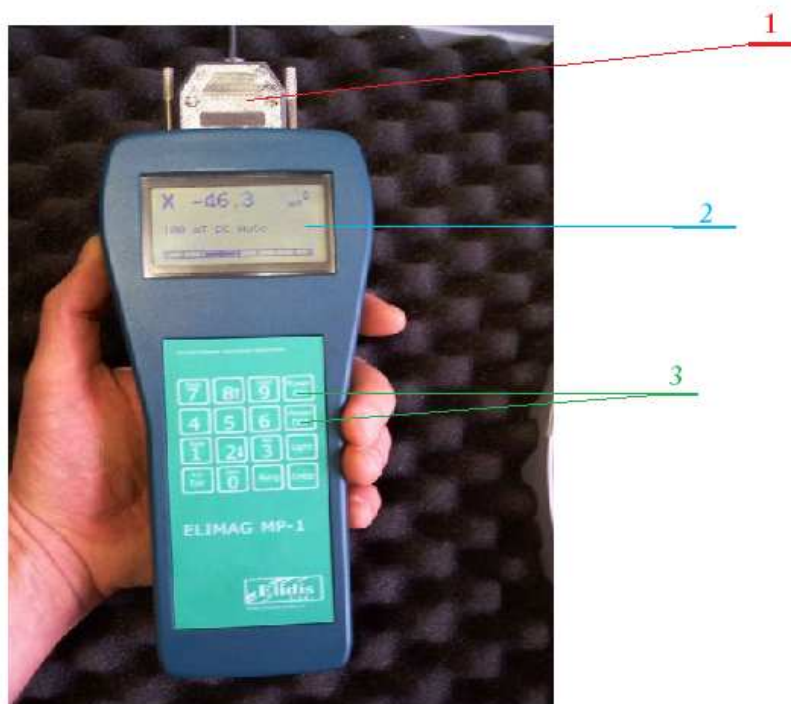
$$U_H = R_H * \frac{B * I}{d} \text{ [V, m}^3 * \text{c}^{-1}, \text{T, A, mm]} \quad (5.1)$$

Zařízení Teslametr Elimag MP-1 dokáže měřit jakékoliv stacionární magnetické pole (homogenní či nehomogenní). Z toho plyne, že tento přístroj lze aplikovat pro tato měření:

- Měření magnetického toku
- Kontrola kvality magnetů
- Kontrolu demagnetizace a kvality měkkých magnetů (např. části relé)

Dle zvolené sondy pak byly následně měřeny dvě hodnoty, a to v ose  $x$  a  $y$ . Přístroj má v paměti uloženou kalibraci dle používané Hallovy sondy, ta se umísťuje na přední stranu měřicího zařízení (viz. Obr. 5.1, 1).

Jednotlivé součásti přístroje jsou: **displej** (viz. Obr. 5.1, 2), který je digitální a grafický. Dokáže zobrazovat měřené hodnoty, páskový displej, aktivní funkce a stav baterie. **Ovládací menu**, podle kterého lze přístroj zapnout/vypnout (viz. Obr. 5.1, 3), provádí se tlačítkem (ON/OFF), nastavit jednotky, nulování, uložení hodnoty, pod svícení displeje, apod. [6]. Tento přístroj má svůj vlastní akumulátor, který lze nabíjet ze sítě.



Obr. 5.1 : Teslametr Elimag MP-1 (převzato z [9])

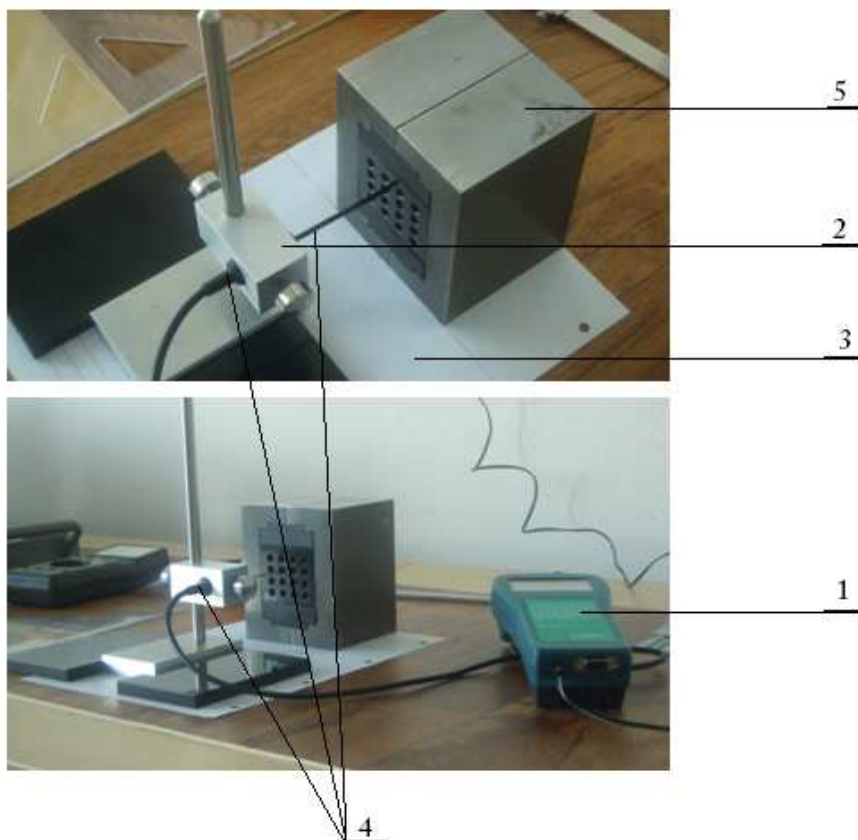
**Technické parametry [6]:**

- Přesnost měření : 1% z rozsahu
- Teplotní drift : +0,02 mT/Kelvin
- Měřicí rozsah : automaticky -2T ... +2T, manuálně 10 mT, 100 mT, 1T, 2T
- Rozměry : 232 x 97 x 54 mm
- Hmotnost : 505 g
- Napájení přístroje : Aku blok Ni-MH, 4,8V, 1700 mAh
- Příkon : cca 70 mA podle použité sondy  
cca 170 mA při rozsvíceném displeji
- Doba provozu na jedno nabití : cca 20 hodin

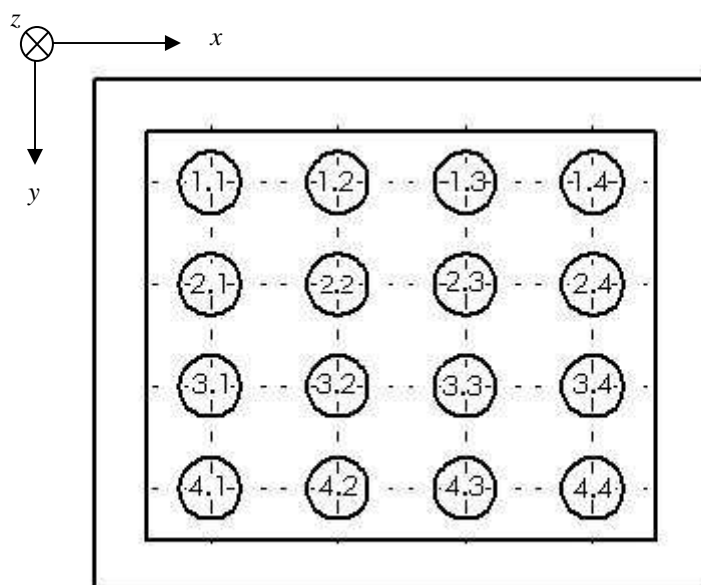
## 5.2 Měřicí síť, popis měření

Měření bylo prováděno v laboratoři, která je k dispozici na KTE (katedra teoretické elektrotechniky). Pro co nejpřesnější proměření magnetického obvodu bylo zapotřebí zkonstruovat aparát (viz. Obr. 5.2, pozice 2) pro uchopení Hallovy sondy (měřidlo). Poté bylo důležité zajistit správný posun měřidla v souřadnicích  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . K tomu pro orientaci slouží měřicí síť, tj. navrtné otvory z přední strany krabičky. Jednotlivé otvory byly označeny pomocí souřadnic, tj. obecně Bod  $[i, j]$  (viz. Obr. 5.3). Posuv po souřadnici  $x$  byl zajištěn pomocí držáku (viz. Obr. 5.2, pozice 2) tj. pohyb shora dolů od bodu Bod  $[1.1]$  až po Bod  $[4.1]$  (viz. Obr. 5.3). Pohyb Hallovy sondy po ose  $y$  a  $z$  byl zajištěn pomocí předem narýsovaných vodících linek na papíru, který byl nedílnou součástí měřicí soustavy (viz. Obr. 5.2, pozice 3).

Stanovením těchto souřadnic (posuv  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) bylo možné provádět co nejpřesnější měření. Nejprve byla Hallova sonda umístěna do bodu Bod  $[1.1]$  a to tak, že původní posuv po ose  $z$  byl 0 mm. Měřidlo bylo umístěno tak, že magnetické siločáry dopadaly kolmo na něj. Po změření hodnoty magnetické indukce v tomto bodě, jsem umístil měřidlo o 10 mm v ose  $z$ . Takto jsem postupoval až pro dosažení posuvu pro  $z = 80$  mm, tj. dosažením této polohy byl proměřen Bod  $[1.1]$  v ose  $x$ . Takto obdržené hodnoty  $B_x$  [mT] byly zaneseny do tabulky (viz kapitola **5.3 OBDRŽENÉ VÝSLEDKY**). Poté bylo zapotřebí získat hodnoty  $B_y$  [mT]. Ty byly získány tak, že Hallova sonda se otočila o  $90^\circ$  oproti měření  $B_x$  tak, aby šipka osy  $y$  (viz. Obr. 5.3) směřovala kolmo k měřidlu. Naměřené hodnoty byly opět zaneseny do tabulky (viz kapitola **5.3 OBDRŽENÉ VÝSLEDKY**). Tímto způsobem se následně proměřily veškeré body Bod  $[i, j]$ , kde  $i, j = 1, 2, 3, 4$ .



Obr. 5.2 : Způsob měření magnetické indukce  $B$  [mT] (1 - Teslametr Elimag MP-1, 2 - držák Hallovy sondy, 3 – pravítko pro posuv v souřadnici  $z$ , 4 – Hallova sonda, 5 – magnetický obvod)



Obr. 5.3 : Měřicí síť pro zavádění Hallovy sondy

## 5.3 Obdržené výsledky

### 5.3.1 Obdržené výsledky - měřením

Tabulka 5.1 : Naměřené hodnoty v bodech 1.1 – 1.4 (viz. Obr. 5.3)

Pro bod [1.1]									
$z$ [mm]	0	10	20	30	<b>40</b>	<b>50</b>	60	70	80
$B_y$ [mT]	5,6	9,1	14,9	21,7	<b>28,2</b>	<b>31,1</b>	30,9	24,9	16,9
$B_x$ [mT]	10,2	16,0	23,0	29,1	<b>31,1</b>	<b>27,3</b>	19,8	19,4	13,9
Pro bod [1.2]									
$z$ [mm]	0	10	20	30	<b>40</b>	<b>50</b>	60	70	80
$B_y$ [mT]	9,7	16,3	26,2	36,5	<b>44,7</b>	<b>47,2</b>	43,9	34,6	24,3
$B_x$ [mT]	4,4	6,6	9,8	11,5	<b>18,2</b>	<b>13,3</b>	13,0	10,0	7,8
Pro bod [1.3]									
$z$ [mm]	0	10	20	30	<b>40</b>	<b>50</b>	60	70	80
$B_y$ [mT]	10,2	16,6	26,3	36,7	<b>44,4</b>	<b>46,8</b>	42,8	32,7	22,4
$B_x$ [mT]	-3,0	-5,2	-6,9	-7,8	<b>-9,3</b>	<b>-11,2</b>	-10,5	-8,1	-5,5
Pro bod [1.4]									
$z$ [mm]	0	10	20	30	<b>40</b>	<b>50</b>	60	70	80
$B_y$ [mT]	6,9	10,5	16,1	23,0	<b>27,5</b>	<b>27,4</b>	23,8	18,5	12,6
$B_x$ [mT]	-10,1	-15,6	-20,8	-27,7	<b>-30,4</b>	<b>-26,5</b>	-23,1	-20,4	-15,1

Tabulka 5.2 : Naměřené hodnoty v bodech 2.1 – 2.4 (viz. Obr. 5.3)

Pro bod [2.1]									
$z$ [mm]	0	10	20	30	<b>40</b>	<b>50</b>	60	70	80
$B_y$ [mT]	6,1	12,5	25,7	40,4	<b>50,1</b>	<b>54,5</b>	53,2	39,5	25,2
$B_x$ [mT]	14,9	25,4	38,9	53,1	<b>59,0</b>	<b>54,3</b>	42,8	34,1	25,7
Pro bod [2.2]									
$z$ [mm]	0	10	20	30	<b>40</b>	<b>50</b>	60	70	80
$B_y$ [mT]	11,8	23,3	43,4	69,4	<b>89,5</b>	<b>98,4</b>	87,2	64,0	36,0
$B_x$ [mT]	5,9	8,3	13,1	17,4	<b>24,6</b>	<b>24,0</b>	16,3	10,3	7,6
Pro bod [2.3]									
$z$ [mm]	0	10	20	30	<b>40</b>	<b>50</b>	60	70	80
$B_y$ [mT]	12,4	24,3	44,4	72,0	<b>89,8</b>	<b>95,3</b>	83,2	60,4	35,2
$B_x$ [mT]	-4,0	-7,2	-10,9	-14,0	<b>-16,2</b>	<b>-18,6</b>	-18,9	-15,6	-8,9
Pro bod [2.4]									
$z$ [mm]	0	10	20	30	<b>40</b>	<b>50</b>	60	70	80
$B_y$ [mT]	8,9	15,6	27,8	43,1	<b>55,3</b>	<b>56,0</b>	49,4	30,4	19,6
$B_x$ [mT]	-13,4	-23,0	-33,4	-46,4	<b>-55,7</b>	<b>-56,7</b>	-48,4	-25,7	-24,1



Tabulka 5.3 : Naměřené hodnoty v bodech 3.1 – 3.4(viz. Obr. 5.3)

Pro bod [3.1]									
$z$ [mm]	0	10	20	30	<b>40</b>	<b>50</b>	60	70	80
$B_y$ [mT]	5,1	14,3	37,1	75,9	<b>96,6</b>	<b>110,3</b>	115,4	73,1	33,6
$B_x$ [mT]	18,5	34,0	60,5	92,5	<b>116,9</b>	<b>112,0</b>	85,1	63,2	39,3
Pro bod [3.2]									
$z$ [mm]	0	10	20	30	<b>40</b>	<b>50</b>	60	70	80
$B_y$ [mT]	10,5	26,3	64,0	121,9	<b>171,2</b>	<b>184,4</b>	162,5	96,3	50,6
$B_x$ [mT]	7,9	12,8	22,4	34,3	<b>42,9</b>	<b>46,0</b>	39,3	32,0	14,3
Pro bod [3.3]									
$z$ [mm]	0	10	20	30	<b>40</b>	<b>50</b>	60	70	80
$B_y$ [mT]	8,1	18,2	42,3	78,5	<b>106,8</b>	<b>115,2</b>	95,8	60,3	28,9
$B_x$ [mT]	-6,4	-11,7	-21,4	-32,6	<b>-33,6</b>	<b>-34,1</b>	-31,5	-22,2	-13,7
Pro bod [3.4]									
$z$ [mm]	0	10	20	30	<b>40</b>	<b>50</b>	60	70	80
$B_y$ [mT]	11,2	27,7	65,4	124,7	<b>175,7</b>	<b>188,0</b>	160,5	102,2	47,1
$B_x$ [mT]	-18,4	-33,3	-54,3	-79,3	<b>-100,2</b>	<b>-103,5</b>	-97,1	-71,5	-47,7

Tabulka 5.4 : Naměřené hodnoty v bodech 4.1 – 4.4(viz. Obr. 5.3)

Pro bod [4.1]									
$z$ [mm]	0	10	20	30	<b>40</b>	<b>50</b>	60	70	80
$B_y$ [mT]	1,6	8,6	33,0	106,3	<b>170,1</b>	<b>178,0</b>	159,4	81,6	21,4
$B_x$ [mT]	22,9	46,9	98,7	186,2	<b>239,4</b>	<b>234,2</b>	184,2	116,5	63,1
Pro bod [4.2]									
$z$ [mm]	0	10	20	30	<b>40</b>	<b>50</b>	60	70	80
$B_y$ [mT]	5,2	20,2	74,4	200,7	<b>292,2</b>	<b>310,0</b>	267,4	138,3	42,0
$B_x$ [mT]	8,0	16,4	38,0	56,6	<b>81,8</b>	<b>82,4</b>	65,7	52,4	22,4
Pro bod [4.3]									
$z$ [mm]	0	10	20	30	<b>40</b>	<b>50</b>	60	70	80
$B_y$ [mT]	6,4	21,9	78,4	202,9	<b>300,0</b>	<b>324,0</b>	280,5	146,4	45,1
$B_x$ [mT]	-5,4	-10,4	-17,6	-31,6	<b>-52,3</b>	<b>-70,4</b>	-52,4	-39,7	-22,7
Pro bod [4.4]									
$z$ [mm]	0	10	20	30	<b>40</b>	<b>50</b>	60	70	80
$B_y$ [mT]	4,5	14,4	48,1	118,7	<b>173,3</b>	<b>194,4</b>	166,6	85,0	27,6
$B_x$ [mT]	-23,1	-49,3	-98,7	-170,4	<b>-234,4</b>	<b>-234,7</b>	-178,6	-100,8	-63,1

### 5.3.2 Obdržené výsledky – výpočtem QF

Po praktickém proměření sestaveného magnetického obvodu byl proveden výpočet profesionálním programem Quick Field (QF), který řeší mnoho fyzikálních úloh (elektrické pole, teplotní pole, magnetické pole atd.). Obdržené výsledky měření byly srovnávány s výsledky tohoto programu. Pro co nejpřesnější výpočet bylo nutné ošetřit konvergenci. Tj. rozdělení výpočtové sítě na co nejvíce uzlů. Tyto hodnoty pak byly srovnávány s předchozími, a tak byl stanoven optimální počet uzlů pro výpočet (viz Tabulka 5.5). Z této tabulky je patrný rozdíl výsledných vypočtených hodnot s počtem 212 uzlů a 25 212 uzlů.

Tabulka 5.5 : Konvergence řešení v bodech 2.2, 2.3, 3.2, 3.3

Počet uzlů	2,2		2,3		3,2		3,3	
	$B_x$ [mT]	$B_y$ [mT]	$B_x$ [mT]	$B_y$ [mT]	$B_x$ [mT]	$B_y$ [mT]	$B_x$ [mT]	$B_y$ [mT]
212	38,5	124,6	-44,5	25	68,5	200	-68,6	98,9
866	39,4	121,7	-40,1	121,4	66,8	200,5	-65,6	202,8
4170	39,5	120,4	-39,5	120,4	66,4	201	-66,4	201
19754	39,4	120,3	-39,3	120,3	66,22	200,4	-66,4	201
25212	39,6	120,3	-39,3	120,4	66,3	200,9	-65,6	200,2
41848	39,4	120,3	-39,3	120,5	66,3	200,6	-66,3	200,5
121563	39,4	120,3	-39,3	120,5	66,3	200,6	-66,3	200,6
134869	39,4	120,3	-39,4	120,4	66,2	200,6	-66,3	200,7

Tabulka 5.6 :Srovnání naměřených a vypočítaných hodnot magnetického obvodu

Bod	Měření		Výpočet Quick Field		Porovnání	
	$B_{xm}$ [mT]	$B_{ym}$ [mT]	$B_{xQ}$ [mT]	$B_{yQ}$ [mT]	$\delta_x$ [mT]	$\delta_y$ [mT]
1.1	29,2	29,7	59	43	29,8	13,3
1.2	15,8	46	22,9	74	7,1	28
1.3	-10,3	45,6	-23	74	12,7	28,4
1.4	-28,5	27,5	-58,5	43	30	15,5
2.1	56,7	52,3	102	70,7	45,3	18,4
2.2	24,3	94	39	120	14,7	26
2.3	-17,4	92,6	-39,3	120	21,9	27,4
2.4	-56,2	55,7	-102	70,7	45,8	15
3.1	114,5	103,5	175	119	60,5	15,5
3.2	44,5	177,8	66,3	201	21,8	23,2
3.3	-33,9	111	-66,2	201	32,3	90
3.4	-101,9	181,9	-175	119	73,1	62,9
4.1	236,8	174,1	306	202	69,2	27,9
4.2	82,1	301,1	106	335	23,9	33,9
4.3	-61,4	312	-106	335	44,6	23
4.4	-234,6	183,9	-306	202	71,4	18,1

Příklady výpočtu :

$$\delta_x = |B_{x,Q} - B_{x,m}| \quad (5.1)$$

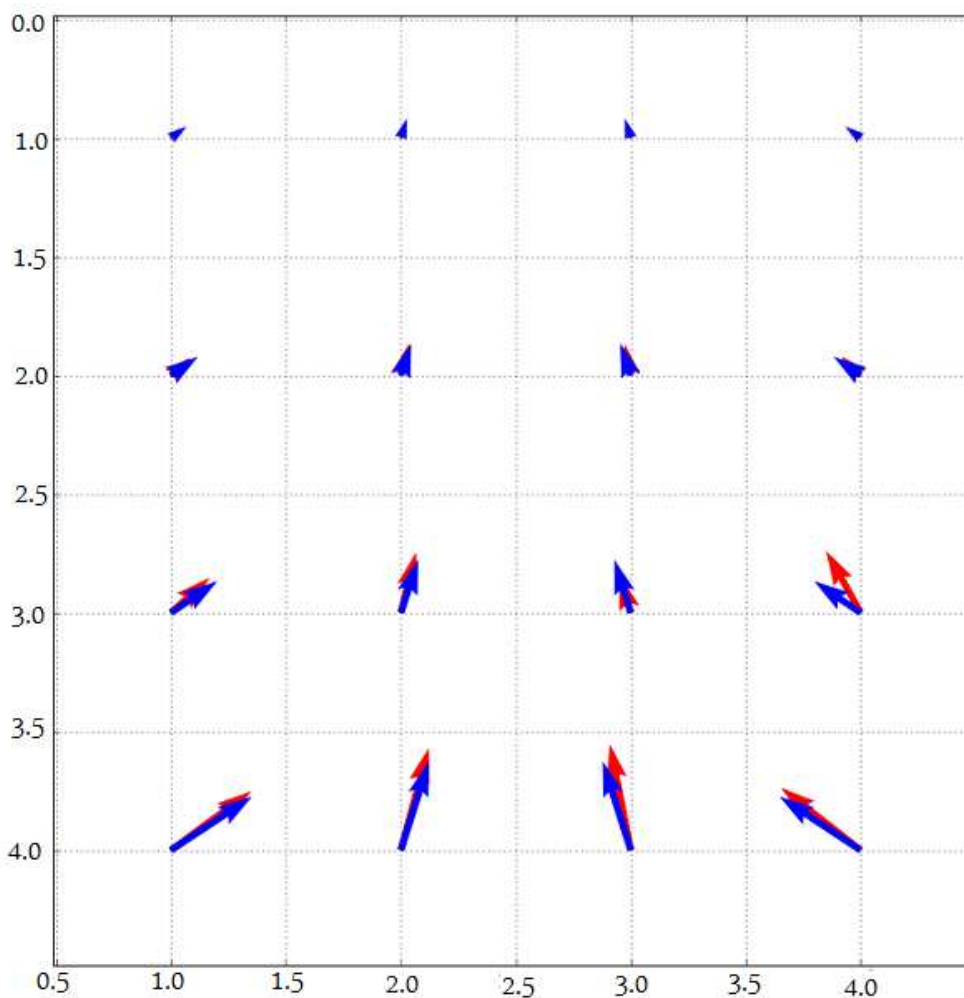
$$\delta_y = |B_{y,Q} - B_{y,m}| \quad (5.2)$$

hodnoty  $B_{xm}$  [mT] a  $B_{ym}$  [mT] byly získány z Tabulka 5.1 -5.4 (tučně zvýrazněno) podle těchto vzorců:

$$B_{x,m,1.1} = \frac{B_{x,m,1.1}(40) + B_{x,m,1.1}(50)}{2} \quad (5.3)$$

$$B_{y,m,1.1} = \frac{B_{y,m,1.1}(40) + B_{y,m,1.1}(50)}{2} \quad (5.4)$$

Na Obr. 5.4 jsou znázorněny výsledné vektory magnetické indukce  $B$  [mT] uprostřed pracovního prostoru (Cube). Červené šipky znázorňují vektory měření a modré vektory výpočtu. Z Obr. 5.4 vyplývá, že se vektory získané měřením a výpočtem liší. Důvod je popsán v kapitole 5.4 Zhodnocení měření a diskuze k výsledkům. Skript pro zobrazení Obr. 5.4 je v kapitole Přílohy.



Obr. 5.4 : Grafické znázornění vektorů magnetické indukce  $B$  [mT]

## 5.4 Zhodnocení měření a diskuze k výsledkům

Nejprve bylo provedeno měření pomocí Hallovy sondy (viz . kapitola 5.2. Měřicí síť, popis měření ). Po tomto změření byl zadán reálně vytvořený obvod (viz. kapitola 4.1.2 Magnetický obvod 3) do profesionálního programu řešícího fyzikální úlohy metodou konečných prvků - Quick Field (QF). Následně bylo provedeno řešení daného obvodu, po kterém byly obdrženy výsledné hodnoty. Aby bylo možné porovnávat hodnoty získané měřením a programem QF, musely se naměřené hodnoty vyhodnotit zvlášť. Vzhledem k tomu že výpočet programu QF byl uvažován ve středu magnetického obvodu, byly ze získaných hodnot měřením vybrány dvě hodnoty (ve vzdálenosti zasunutí Hallovy sondy 40 a 50 mm), a ty se zprůměrovaly (viz. rovnice 5.3 a 5.4).

Z obdržených výsledků (viz. Tabulka 5.6 : Srovnání naměřených a vypočítaných hodnot magnetického obvodu) je patrné, že naměřené hodnoty se oproti hodnotám získaným programem QF liší řádově o desetiny mT. Tento rozdíl může být způsoben natočením Hallovy sondy. Tj. není zajištěna její rovnovážná poloha ve všech měřících bodech stejně. Další nepřesnost měření mohla být způsobena vlastnostmi Hallovy sondy (viz. kapitola 5.1 Popis použitého zařízení ). Také použitý magnet nemusí mít v celém svém objemu stejné vlastnosti. Nepřesnost může být také následkem nějaké materiálové vady fokusátorů. To by bylo možné ověřit například magneticko-defektoskopickou metodou. Nepřesnost může být také způsobena programem QF, vzhledem k tomu , že se počítalo ve 2D souřadném systému.

Pro co nejpřesnější výpočet a analýzu magnetického obvodu bylo zapotřebí provést konvergenci řešení v bodech (viz. 6.3.2 Obdržené výsledky – výpočetem QF). Z Tabulka 5.5 je patrné, že při vyšším počtu uzlů jsou výsledné hodnoty přesnější. Nicméně od počtu 25 212 uzlů se výsledné hodnoty  $B_{xm}[\text{mT}]$  ( $B_{ym}[\text{mT}]$ ) nemění. Pro výpočet byl tedy zvolen počet uzlů 41 848.

## 6. Závěr

Cílem práce bylo vytvoření magnetického obvodu budícího v daném objemu magnetické pole o zadané velikosti. Nejprve bylo zapotřebí vytvořit několik návrhů a z nich pak následně zvolit nejpříjemnější řešení. To bylo vybráno na základě simulace v profesionálním programu Quick Field (QF) (viz kapitola 3. Příprava konstrukčního návrhu, obvod číslo 3). Akceptovaný obvod byl pak následně modifikován tak, aby jej bylo možné technologicky a konstrukčně provést. Z tohoto důvodu byl vytvořen v programu Solid Works model obvodu, ze kterého pak byly vytvořeny výrobní výkresy (viz. Přílohy). Po vyrobení jednotlivých dílů obvodu došlo k jeho složení. Celý obvod byl navržen jako stavebnice, to znamená, že zde můžeme přidávat či odebírat permanentní magnety a tím měnit magnetickou indukci  $B$  (celý obvod lze rozebrat na jednotlivé díly).

Po složení magnetického obvodu pak došlo k jeho proměření Hallovoú sondou. Z tohoto důvodu byl vyroben držák, který zajišťoval zamezení pohybu sondy a tím přesnější měření. Poté byl magnetický obvod zadán do programu QF a jeho výsledky pak byly porovnány s výsledky měření. Zde bylo zjištěno, že se výsledky měření od výsledků QF liší řádově o desítky mT.

Toto experimentální zařízení (magnetický obvod) lze využít pro výuku na Katedře teoretické elektrotechniky (KTE) : měření magnetického pole Hallovoú sondou. Též by mohl být použit pro výuku měření neelektrických veličin na Katedře technologií a měření (KET). Další využití tohoto obvodu by mohlo být v medicíně, kde by bylo možné zkoumat (sledovat) vliv stacionárního magnetického pole například na živou tkáň. V biologii by mohl posloužit pro zkoumání vlivu stacionárního magnetického pole na klíčení rostlin apod.

## Literatura

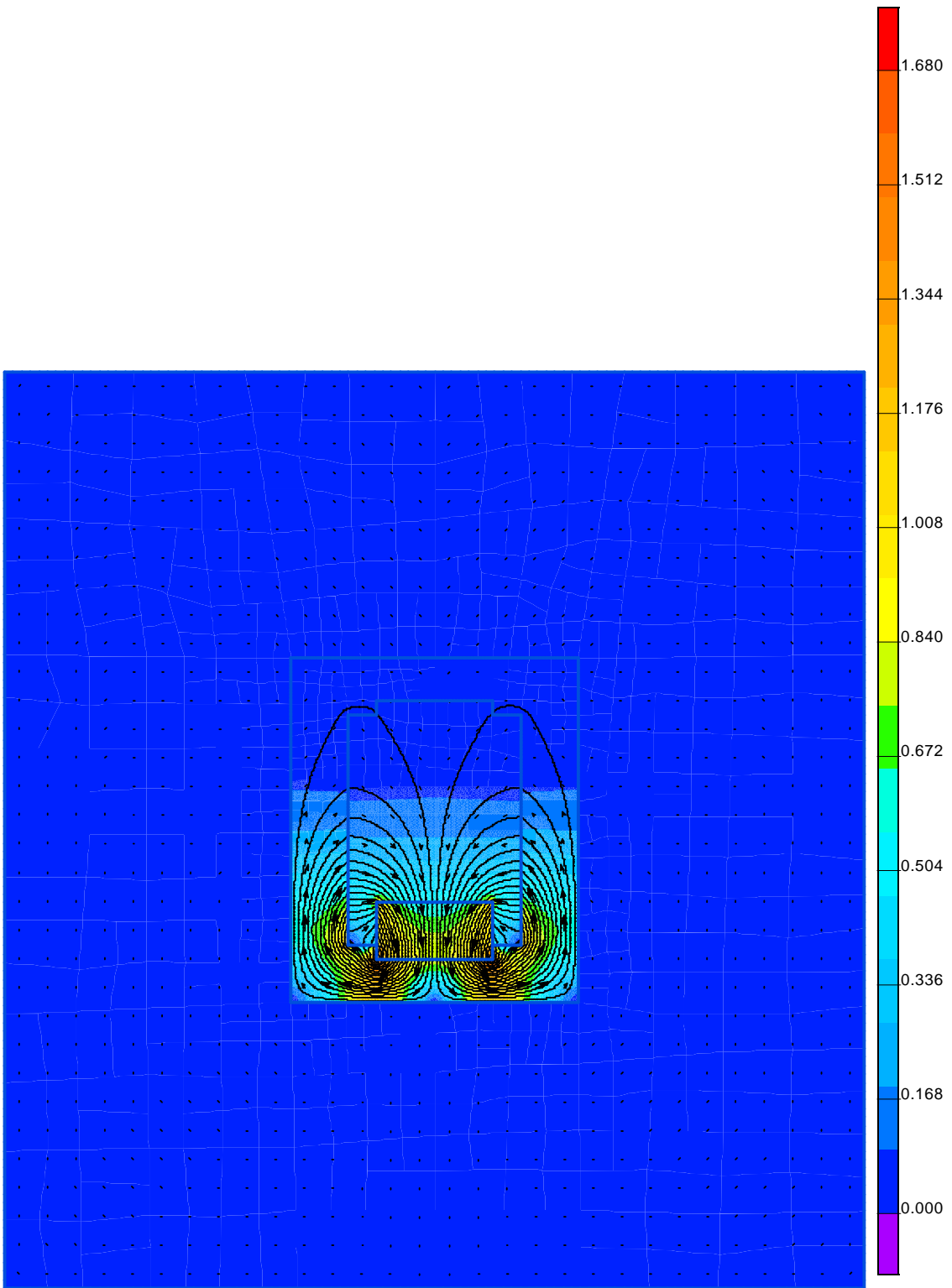
- [1] BENEŠOVÁ, Z., MAYER, D. : Základní příklady z teorie elektromagnetického pole. Plzeň: Západočeská univerzita, 2008
- [2] BLAHOVEC, A. : Elektrotechnika III. Praha: Informatorium, 1997
- [3] Magnetická indukce. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 15. 2. 2011 v 07:43 [cit. 2011-12-20]. Dostupné z WWW: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Magnetick%C3%A1\\_indukce](http://cs.wikipedia.org/wiki/Magnetick%C3%A1_indukce)
- [4] BENEŠOVÁ, Z., ULRYCH, B. : Příručka pro využití programů ve výuce Teorie elektromagnetického pole. Plzeň: Západočeská univerzita, 1997
- [5] Webs.zcu.cz [online]. 8.3.2006 12:50 [cit. 2010-02-12]. Ilustrativní příklad model feromagnetického aktivátoru. Dostupné z WWW: <[http://webs.zcu.cz/fel/kte/UPCE/UPCE\\_5.pdf](http://webs.zcu.cz/fel/kte/UPCE/UPCE_5.pdf)>.
- [6] Elidis s. r. o: měření magnetických polí - teslametry. [online]. [cit. 2012-01-08]. Dostupné z: <http://www.elidis.cz/soubory/1cz.pdf>
- [7] Encyklopedie fyziky: Hallův jev. In: [Http://fyzika.jreichl.com](http://fyzika.jreichl.com) [online]. 2.0. © 2006-2012, aktualizováno 5.11.2011 [cit. 2012-01-08]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/294-halluv-jev>

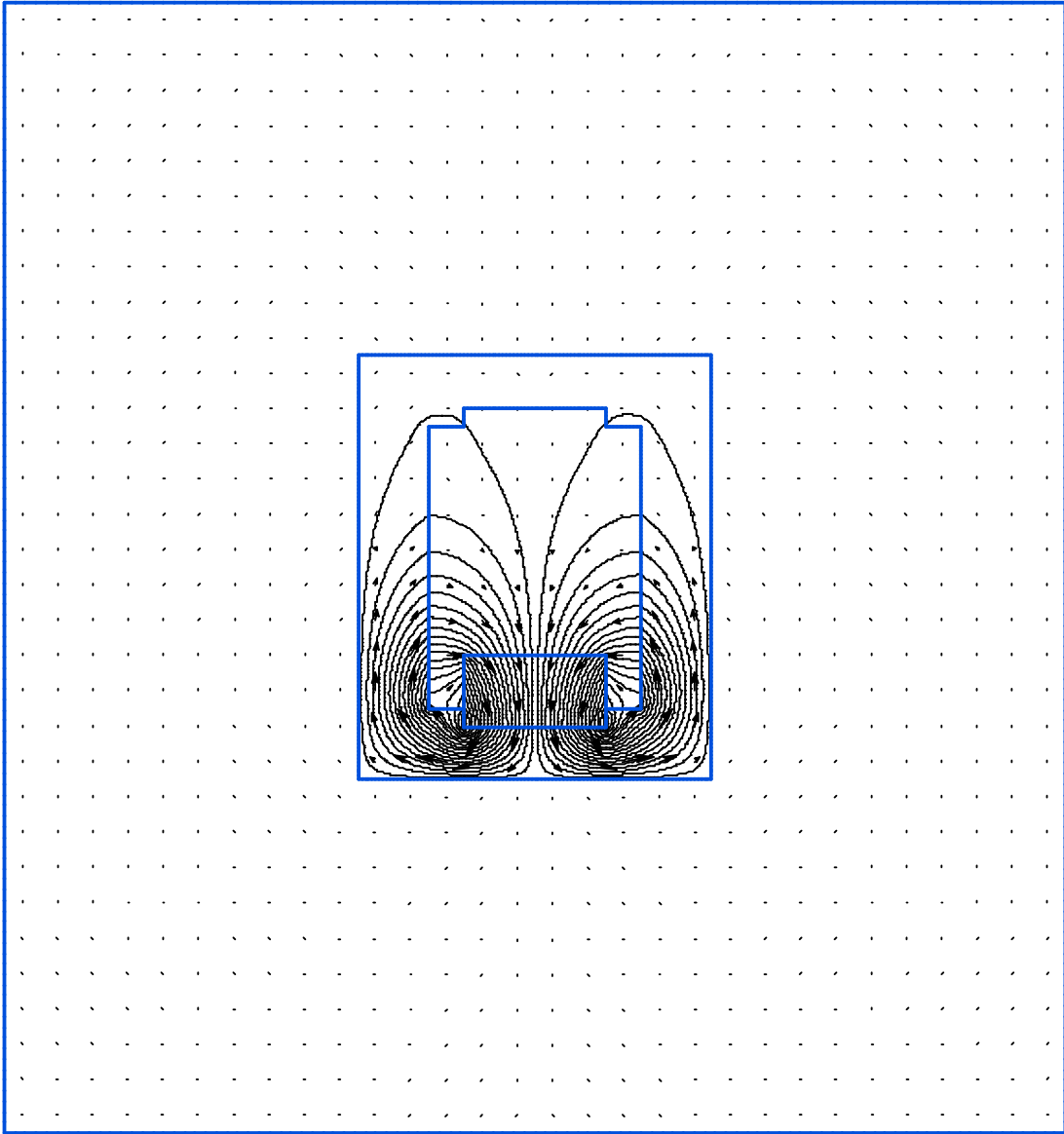
- [8] Magnetický materiál: Magnetizace. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2012, 15. 12. 2010 v 15:27 [cit. 2012-01-08]. Dostupné z:  
[http://cs.wikipedia.org/wiki/Magnetick%C3%BD\\_materi%C3%A1l#Rozd.C4.9Blen.C3.AD\\_magnetik](http://cs.wikipedia.org/wiki/Magnetick%C3%BD_materi%C3%A1l#Rozd.C4.9Blen.C3.AD_magnetik)
- [9] Spékání. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 10. 2. 2012 v 20:03., 10. 2. 2012 v 20:03. [cit. 2012-02-17]. Dostupné z:  
[http://cs.wikipedia.org/wiki/Sp%C3%A9k%C3%A1n%C3%AD#cite\\_note-sintrov.C3.A1n.C3.AD-0](http://cs.wikipedia.org/wiki/Sp%C3%A9k%C3%A1n%C3%AD#cite_note-sintrov.C3.A1n.C3.AD-0)
- [10] Magsy: neodymové magnety. MAGSY, s.r.o. Magsy: neodymové magnety [online]. 2005 [cit. 2012-02-17]. Dostupné z: <http://www.magsy.cz/page/155.magnet-neodymovy-ndfeb/>
- [11] Magsy: neodymové magnety. MAGSY, s.r.o. Magsy: neodymové magnety [online]. 2005 [cit. 2012-02-17]. Dostupné z: <http://www.magsy.cz/page/1810.ndfeb-magnety/>



## Přílohy

1. Technický výkres fokusátoru
2. Technický výkres vzpěry
3. Technický výkres krabičky (Cube)
4. Technický výkres víka krabičky
5. Technický výkres vodící lišty
6. Vlastnosti použitého plastu
7. Grafické znázornění magnetického pole uvnitř obvodu – barevné
8. Grafické znázornění magnetického pole uvnitř obvodu – černobílé
9. Skript pro vygenerování Obr. 5.4





07.09.2011

Lieferschein / Delivery note / Bon de livraison  
7200569618 010

## Abnahmeprüfzeugnis / Inspection Certificate / Certificat de reception 3.1 - DIN EN 10204

Kundenmaterial-Nr. / Cust.mat.no. / N° materielle client: 1028597  
 Material-Nr. / Mat.no. / N° materielle: 030003407  
 Material: PE 100 Platte, extrudiert  
 Material: PE 100 Sheet, extruded  
 Produit: PE 100 Plaque, extrudée  
 Chargen-Nr. / Batch.No. / N° du lot VK10027187 Rohst./ Raw mat./ Matière prem. Vestolen A 6060 R 10000  
 Liefermenge / Quantity / Volume de livraison 25 ST  
 Formmasse / Moulding batch / Matière moulable PE,EACH,50 T 003  
 Lieferbedingung / Delivery conditions / Conditions de livraison DIN EN ISO 14632

Farbe/Colour/couleur	SCHWARZ/BLACK/NOIR	Länge/Length/longueur	3000 MM
Farb-Nr./Colour no./n° couleur	09500	Stärke/Thickness/épaisseur	20,0 MM
Breite/Width/largeur	1500 MM		

### Prüfergebnisse aus spezifischer Kontrolle / Test results of the specific control / Resultats des controles spécifique

Prüfung Test/Essai	Norm Norm/Norm	Soll Set.val/Val.exigée	Ist Act.val/Val.réelle	Einheit Unit/Unité
Dichte-Formmasse Density-moulding material Densité-matière moulable	DIN EN ISO 1183-1	0,9560 - 0,9620	0,9594	g/cm3
MFR-Formmasse (190/5) MFR-moulding material(190/5) Matière moulable MFR (190/5)	DIN EN ISO 1133	0,2300 - 0,3600	0,2600	g/10min
Schmelzindex (190/5) Melt flow index (190/5) Indice de fusion (190/5)	DIN EN ISO 1133	0,2000 - 0,6000	0,2600	g/10min
Streckspannung Tensile strength at yield Resistance au seuil de fluage	DIN EN ISO 527-2	>=24,0000	25,1100	MPa
Streckdehnung Elongation at yield Allongement au seuil de fluage	DIN EN ISO 527	>=8,0000	8,4200	%
E-Modul E-modulus E a la flexion	DIN EN ISO 527-2	>=1000,0000	1.214,3900	MPa
Schrumpf laengs Shrinkage along Traitement thermique long.	ISO 11501	<=3,0000	0,1200	%

Die Angaben befreien den Verarbeiter nicht von eigenen Prüfungen und Versuchen.  
 The provision of this data does not release users from their obligation to conduct their own tests and inspections.  
 Les informations disponibles ne dispensent pas le technicien de réaliser ses propres contrôles et essais.

