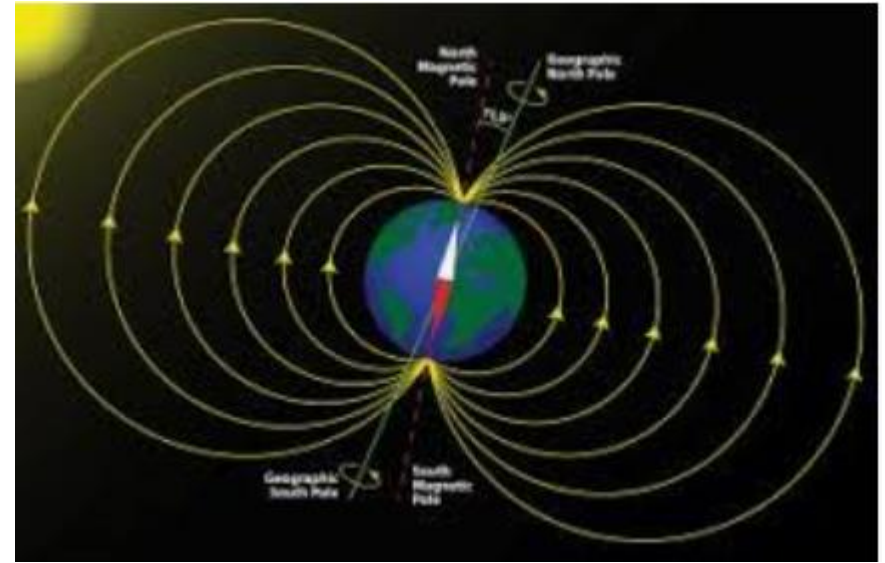
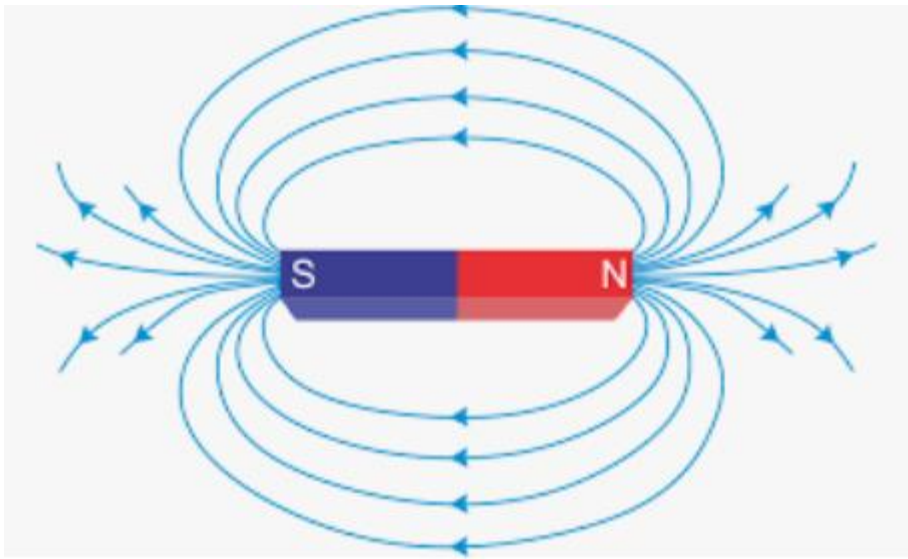




Metódy archeo-geofyzikálneho výskumu – Magnetometria

Meranie magnetického poľa Zeme
s cieľom detekcie archeologických objektov

Magnetometria 1

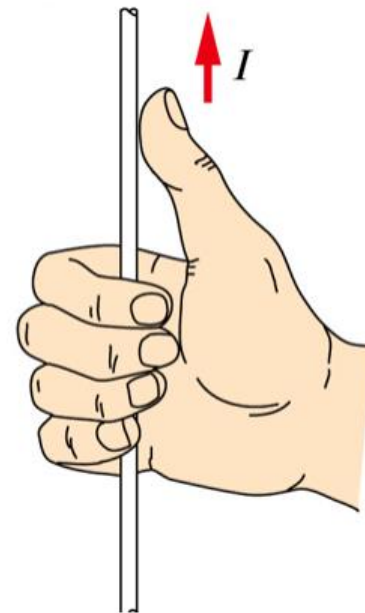
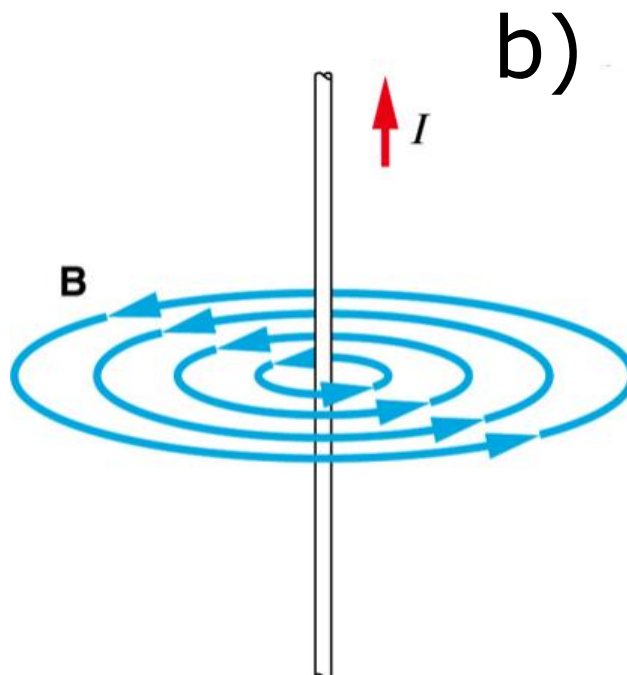
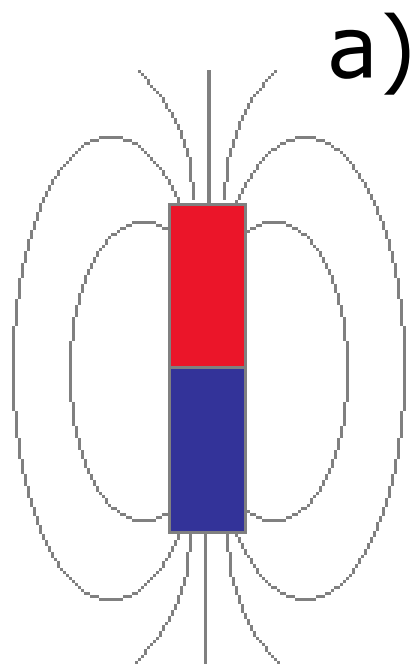
Obsah:

- úvod do teórie magnetického poľa,
- magnetické vlastnosti materiálov,
- základy magnetometrie,
- prístroje na meranie magnetického poľa,
- spracovanie a interpretácia magnetom. údajov.

čo je to magnetické pole?

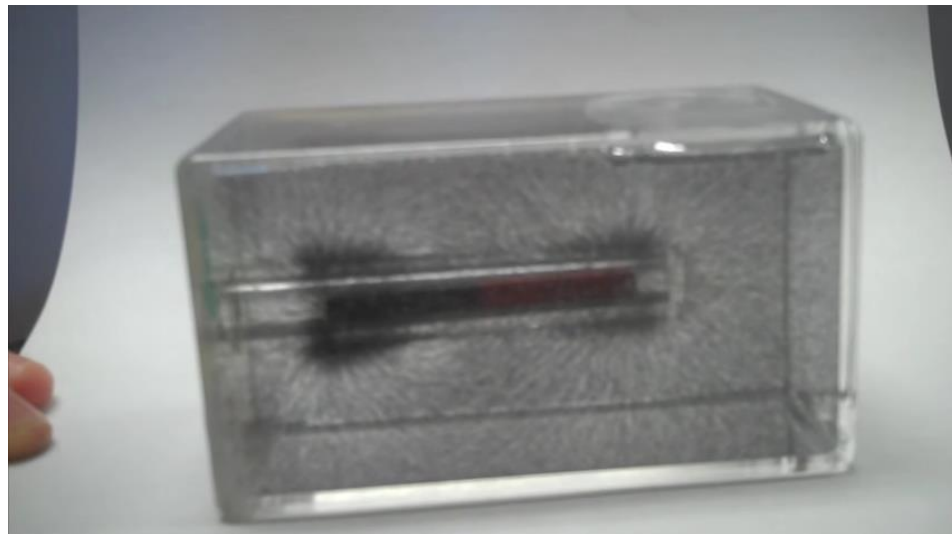
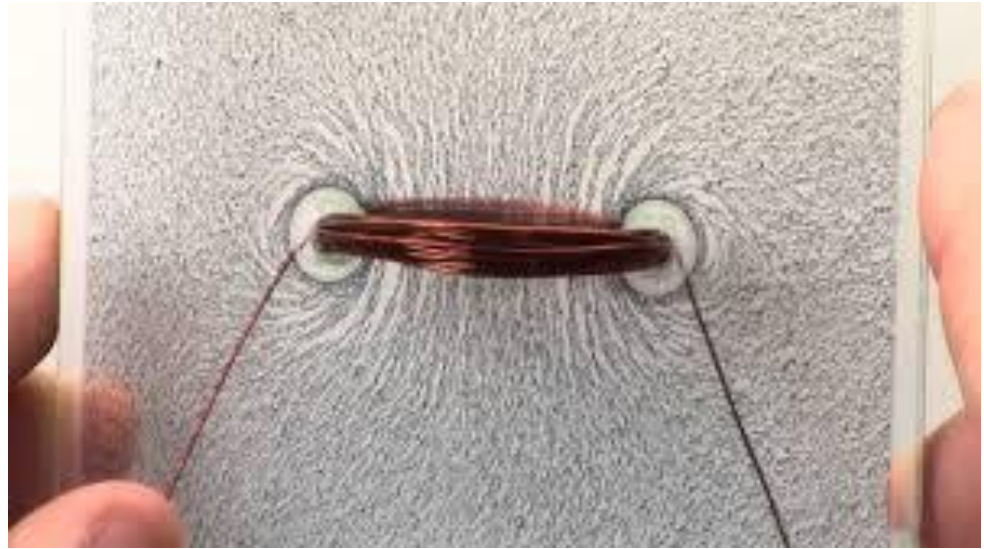
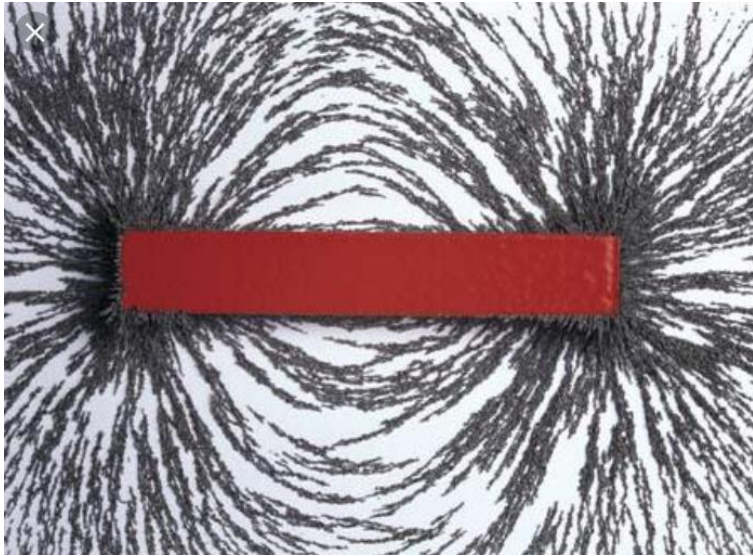
Magnetické pole vzniká v okolí:

- a) premanentných magnetov a
- b) vodičov vedúcich elektrický prúd.



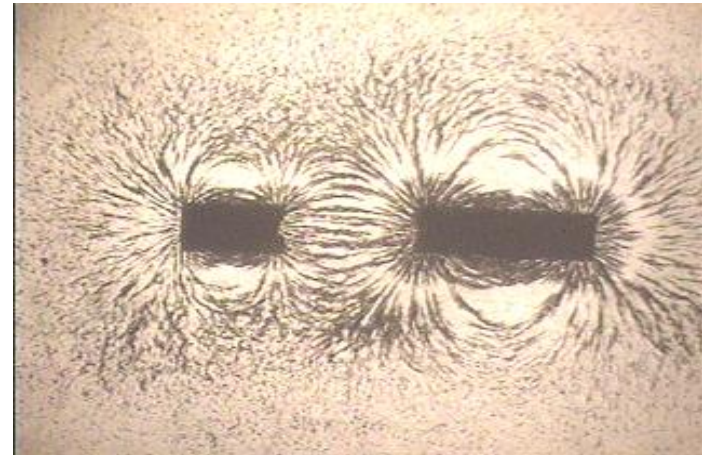
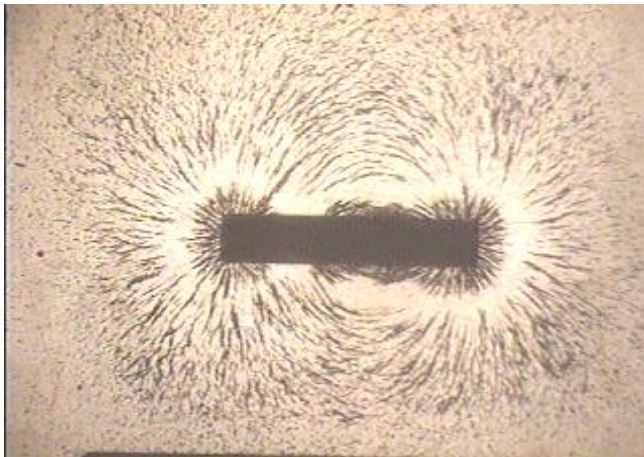
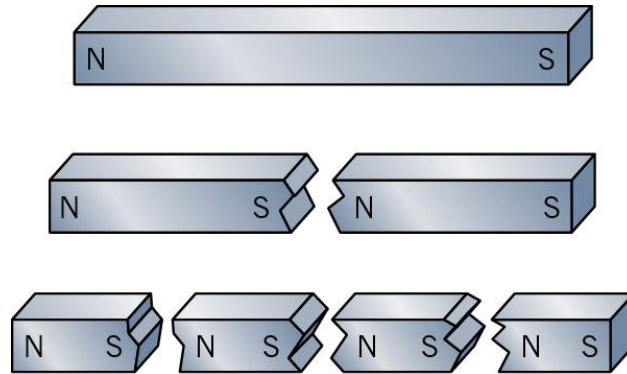
... a pôsobí tzv. magnetickou silou F_M – obdobnou, ako je aj mechanická sila (dokáže rozpohybovať rôzne telesá).

pokusy so železnými pilinami



video: <https://www.youtube.com/watch?v=8llkHQtaOlg>

magnety mají za každých okolností vždy 2 póly:
tzv. severný a južný (N a S),
vravíme, že magnetické pole má tzv. dipólový charakter



magnetické pole

V okolí permanentných magnetov a elektrických vodičov vzniká magnetické pole. Popisujeme ho 2 veličinami.

Magnetická intenzita $\mathbf{H}$ (vektorová veličina, jednotka, $[\text{A}\cdot\text{m}^{-1}]$).

Popisuje mieru silových účinkov magnetického poľa.

Na rozdiel od magnetickej indukcie nezahŕňa reakciu látky (vplyv magnetizačných prúdov v nej), ale iba účinok „vonkajších“ zdrojov poľa.

Magnetická indukcia $\mathbf{B}$ (vektorová veličina, $[\text{T}]$).

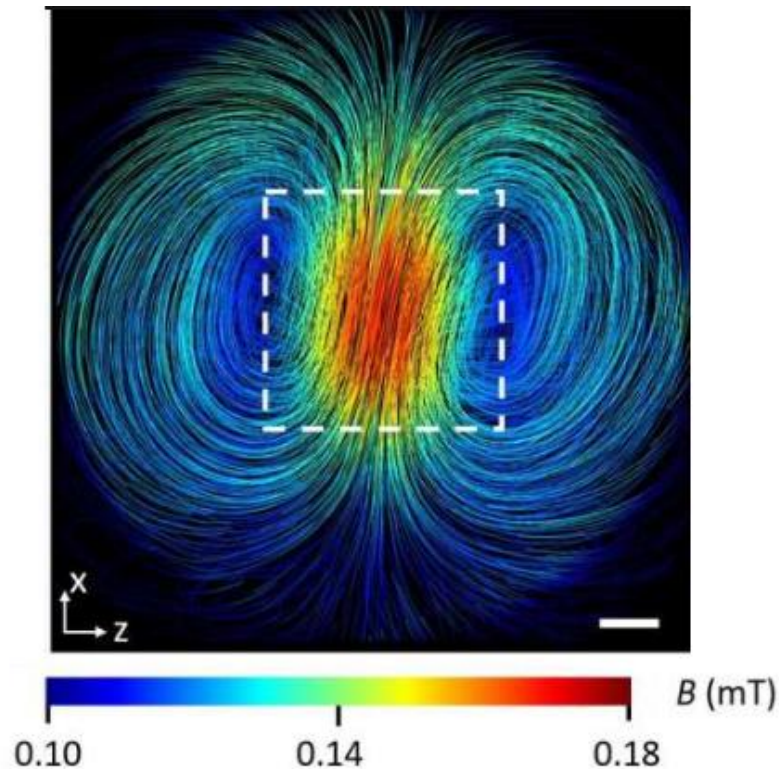
Charakterizuje silové účinky magnetického poľa na pohybujúci sa náboj, alebo na vodič s prúdom v magnetickom poli, pričom v sebe zahŕňa reakciu látky na vonkajšie magnetické pole (jej zmagnetizovanie alebo pôsobenie proti nemu).

Alternative names for B and H

B	
name	used by
magnetic flux density	electrical engineers
<u>magnetic induction</u>	electrical engineers
magnetic field	physicists
H	
name	used by
<u>magnetic field intensity</u>	electrical engineers
magnetic field strength	electrical engineers
auxiliary magnetic field	physicists
magnetizing field	physicists

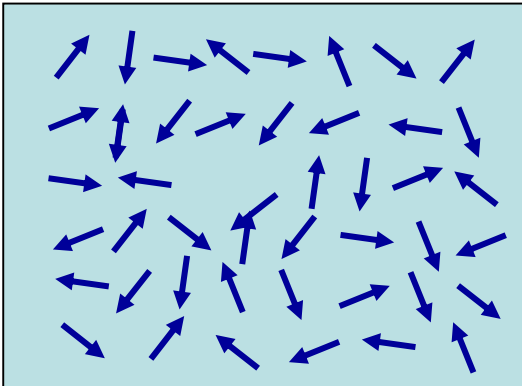
magnetické pole

Keď sa objekt zmagnetizuje vo vonkajšom magnetickom poli, tak sa stane “novým magnetom”. Hovoríme vtedy o tzv. **indukovanej magnetizácii**. Po zrušení vonkajšieho magnetizujúceho poľa sa táto magnetizácia taktiež zruší. Ak však zostane (“zapamätaná”), ide o tzv. **remanentnú magnetizáciu**.

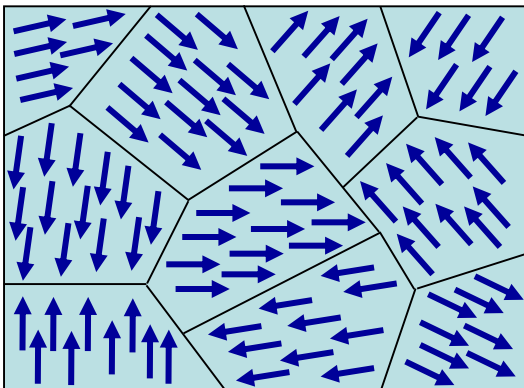


dipólový charakter magnetického poľa

Elektrón pri svojom pohybe okolo jadra atómu vytvára magnetické pole, čím si každý atóm vytvára vlastný (elementárny) **magnetický moment**. Tieto momenty sa môžu v látke navzájom rušiť alebo zosilňovať.

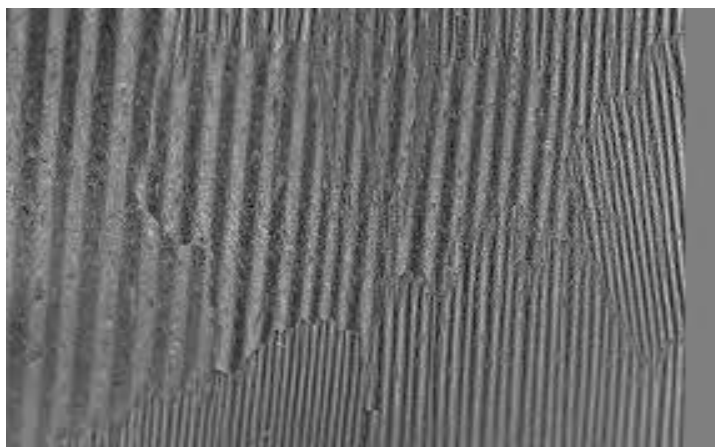
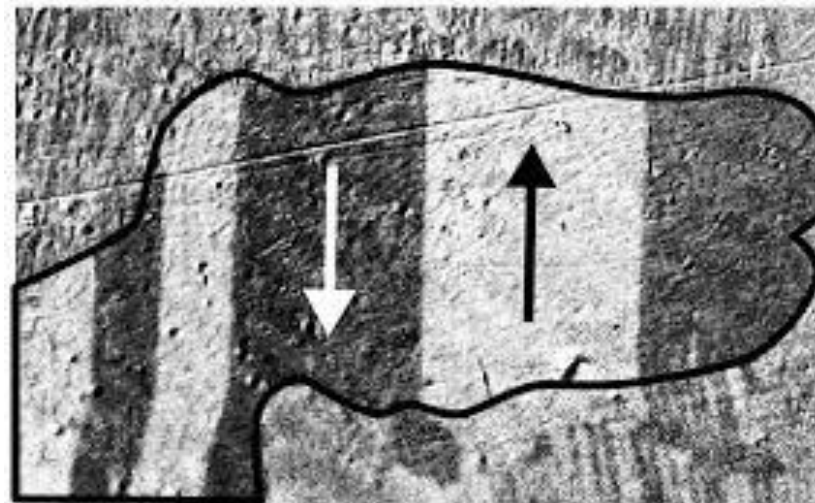
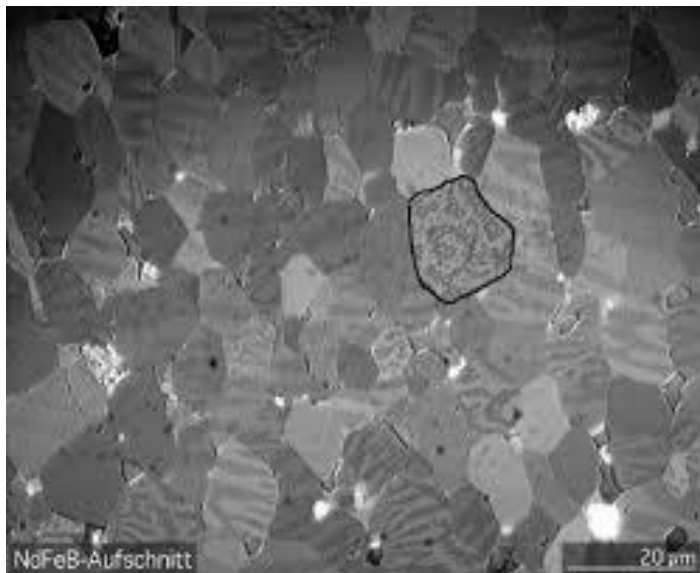


Vo väčšine látok sú tieto elementárne magnetické momenty usporiadané náhodne (tzv. diamagn. a paramagnetické), navonok sa ich magnetické vlastnosti neprejavujú. V niektorých (feromagn.) sa orientujú do určitých zón - **tzv. magn. domén**.



Ak látku vložíme do vonkajšieho magnetického poľa, sú elementárne magnetické momenty jeho pôsobením ovplyvnené a môžu zmeniť svoje usporiadanie v látke.

Magnetické domény (příklady z elektronového mikroskopu):



reakcie materiálov na magnetické pole

Rôzne materiály (objekty) reagujú na pôsobiace magnetické pole rôzny, spôsobom – buď sa bránia jeho vplyvu alebo sa ním nechajú zmagnetizovať.

Schopnosť látky zmagnetizovať sa vyjadruje parameter, ktorý nazývame ako **magnetická susceptibilita** (κ - kappa).

V sústave jednotiek SI má magnetická susceptibilita tzv. bezrozmernú jednotku, uvádza sa to ako [jedm. SI] alebo skrátene iba [SI].

Hodnoty magnetickej susceptibility dosahujú pre bežné materiály veľmi veľké rozpätia - **od 0.000001 po 20 [SI]**.

reakcie materiálov na magnetické pole

Podľa tejto vlastnosti delíme látky na:

diamagnetické, zoslabujú magn. pole (napr. voda, organické látky, ale aj niektoré kovy: Cu, Ag, Au, Hg, Bi,)

paramagnetické, zosilňujú magn. pole (napr. Al, Mn, Cr, Pt)

feromagnetické, výrazne zosilňujú magn. pole

(4 kovy: Fe, Ni, Co, Gd).

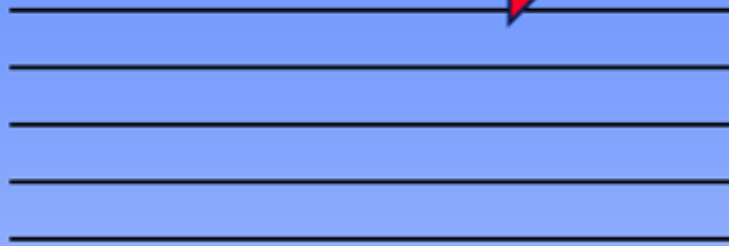
Diamagnetické látky sú z magnetického poľa vypudzované, paramagnetické a feromagnetické sú naopak do magnetického poľa vťahované (pohyb smerom do miesta s najvyššou intenzitou poľa).

Feromagnetické látky sú schopné si magnetizáciu „zapamätať“ – zostáva im aj po „vypnutí“ vonkajšieho indukujúceho poľa.

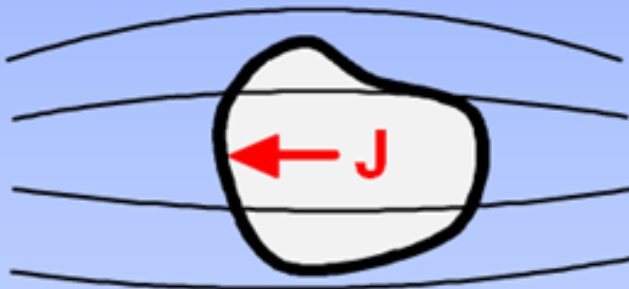
Najsilnejšie diamagnetické chovanie vykazujú supravodiče, ktoré môžu do určitej intenzity pôsobiaceho magnetického poľa úplne zabrániť vnikaniu poľa do svojho objemu (až na tenkú povrchovú vrstvu).

reakcie materiálov na magnetické pole

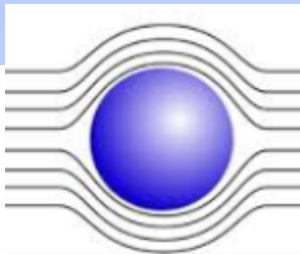
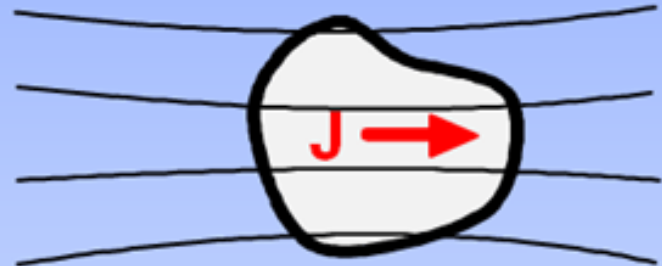
Magnetic field (B_0)



Diamagnetic



Para/Ferromagnetic



(supravodič)

reakcie materiálov na magnetické pole

$\kappa < 0$ – diamagnetické látky (minerály),
hodnoty: -10^{-6} až -10^{-5} [SI], napr.: kremeň,
vápenec, živce, grafit, sádrovec, halit, galenit

$\kappa > 0$ – paramagnetické látky (minerály),
hodnoty: 10^{-5} až 10^{-3} [SI], napr. pyroxén, olivín,
amfibol, biotit, pyrit, siderit, muskovit,...

$\kappa \gg 0$ – feromagnetické látky (minerály),
hodnoty: 10^{-2} až 10^{+2} [SI], napr. **magnetit**,
titanomagnetit, maghemit, ulvöspinel,
hematit, ilmenit, göthit, ...

Feromagnetické minerály sa nachádzajú v rudách, horninách,
ale aj v pôde, dokonca sú výrazne koncentrované v humuse.

reakcie materiálov na magnetické pole

Paramagnetické materiály vytvárajú tzv. **indukovanú magnetizáciu (M_i)** .

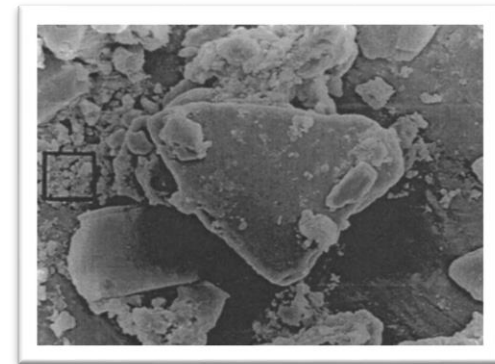
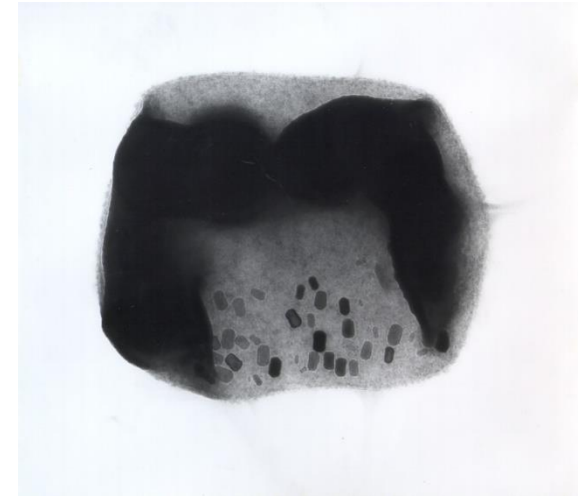
Feromagnetické materiály tzv. **remanentnú magnetizáciu (M_r)** – “zapamätanú” alebo “vpálenú”.

Pomer **M_i** a **M_r** sa nazýva tzv. **Königsbergerov koeficient** ($Q = M_r/M_i$).

Pri niektorých materiáloch môže dosiahnuť až desiatky (dokonca aj stovky).

magnetické minerály v pôde

Niektoré druhy baktérií (ktoré rozkladajú zelenú rastlinnú hmotu)
Produkujú feromagnetické minerály (magnetit, maghemit), ktoré
sa potom koncentrujú v humuse.



snímky z elektrónového mikroskopu

magnetické minerály v pôde (v humuse)

Niektoré druhy baktérií (ktoré rozkladajú zelenú rastlinnú hmotu)
Produkujú feromagnetické minerály (magnetit, maghemit), ktoré
sa potom koncentrujú v humuse.



stratigrafický rez vo výkope

magnetické minerály v pôde (pôsobenie ohňa)

Niektoré druhy minerálov zvýraznia svoje koncentrácie a orientáciu v miestach, kde pôsobí oheň (ohniská, pece,...).



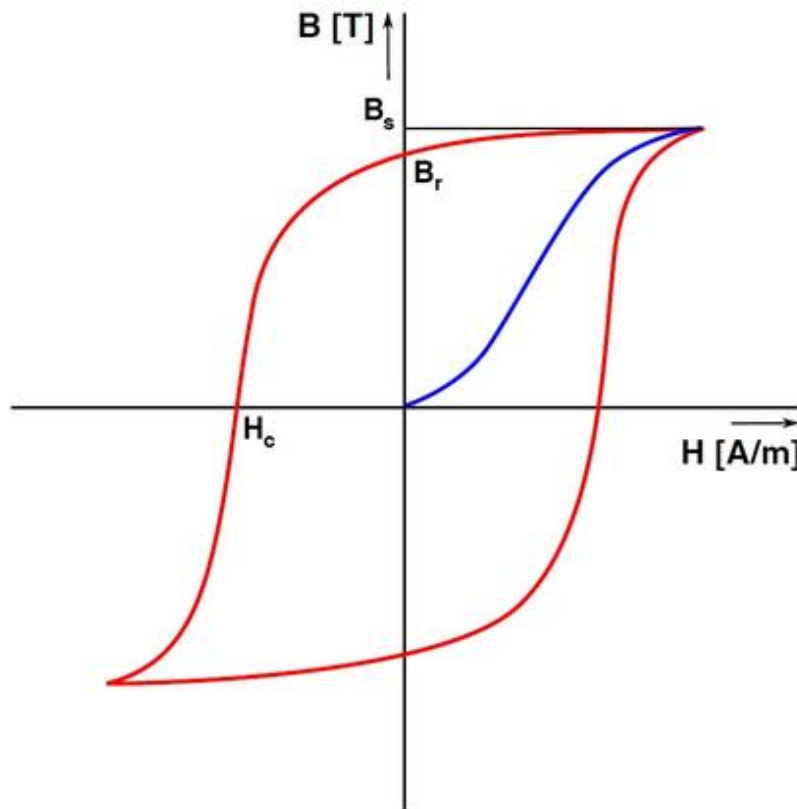
meranie s tzv. kappametrom v ohnisku

reakcie materiálov na magnetické pole

Paramagnetickým látkam nezostáva po „vypnutí“ vonkajšieho magnetického poľa jednotný magnetický moment.

V prípade feromagnetických je to rozdielne – zostávajú zmagnetizované. Hovoríme o tzv. **remanentnej magnetizácii**.

Tento jav opisuje **magnetická hysterézia** (slučka, krivka):



B_s – stav nasýtenia
(max. hodnota B),
 B_r – remanentná
magnetizácia,
 H_c – koercitívna
intenzita,

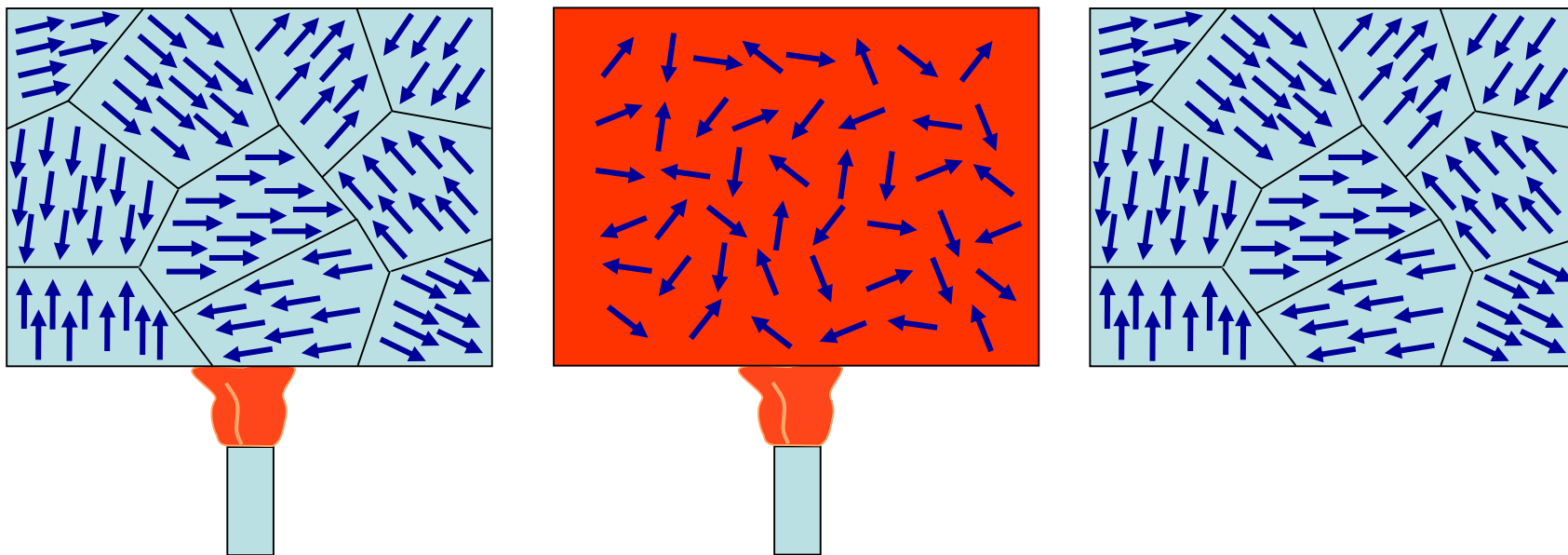
Podľa veľkosti H_c
delíme
feromagnetické látky
na magneticky mäkké
(malá H_c) a tvrdé
(veľká H_c)

feromagnetické látky

Pri zohriatí feromagnetickkej látky na určitú teplotu (**Curieho teplota** – napr. pre železo asi 770°C) sa látka zmení na paramagnetickú.

Keď teplota poklesne, látka sa znova stane feromagnetickou a obnoví sa doménové usporiadanie.

jednoduchý pokus: http://sirius.ucsc.edu/demoweb/images/e_m/curie-iron.gif



Pozn.: Uvedená vlastnosť sa prejavuje aj pri vzniku magnetizácie pôd v miestach s pôsobením ohňa (ohniská, pece).

Curieho teplota:

Material	Curie temperature (K)
Iron (Fe)	1043
Cobalt (Co)	1400
Nickel (Ni)	627
Gadolinium (Gd)	292
Dysprosium (Dy)	88
Mn Bi	630
MnSb	587
CrO ₂	386
MnAs	318
EuO	69
Iron(III) oxide (Fe ₂ O ₃)	948
Iron(II,III) oxide (FeOFe ₂ O ₃)	858

kovy (materiály)

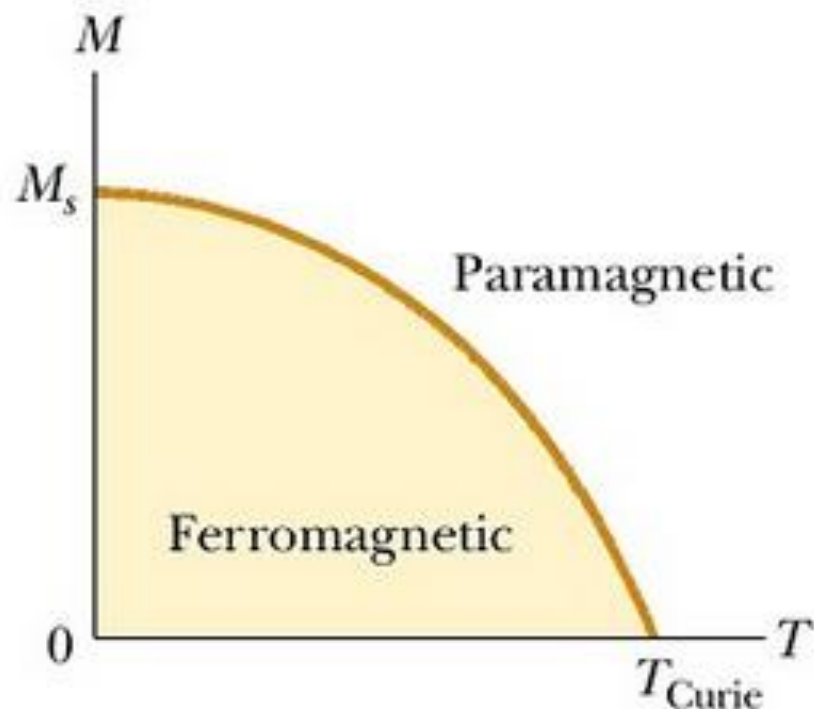
Mineral	Composition	Magnetic Order	T _c (°C)	σ _s (Am ² /kg)
Oxides				
Magnetite	Fe ₃ O ₄	ferrimagnetic	575-585	90-92
Ulvospinel	Fe ₂ TiO ₂	AFM	-153	
Hematite	αFe ₂ O ₃	canted AFM	675	0.4
Ilmenite	FeTiO ₂	AFM	-233	
Maghemite	γFe ₂ O ₃	ferrimagnetic	~600	~80
Jacobsite	MnFe ₂ O ₄	ferrimagnetic	300	77
Trevorite	NiFe ₂ O ₄	ferrimagnetic	585	51
Magnesioferrite	MgFe ₂ O ₄	ferrimagnetic	440	21
Sulfides				
Pyrrhotite	Fe ₇ S ₈	ferrimagnetic	320	~20
Greigite	Fe ₃ S ₄	ferrimagnetic	~333	~25
Troilite	FeS	AFM	305	
Oxyhydroxides				
Goethite	αFeOOH	AFM, weak FM	~120	<1
Lepidocrocite	γFeOOH	AFM(?)	-196	
Feroxyhyte	δFeOOH	ferrimagnetic	~180	<10

magnetické minerály
(magnetit: 580 °C)

Curieho teplota:

Material	Curie temperature (K)
Iron (Fe)	1043
Cobalt (Co)	1400
Nickel (Ni)	627
Gadolinium (Gd)	292
Dysprosium (Dy)	88
Mn Bi	630
MnSb	587
CrO ₂	386
MnAs	318
EuO	69
Iron(III) oxide (Fe ₂ O ₃)	948
Iron(II,III) oxide (FeOFe ₂ O ₃)	858

kovy (materiály)



čiže feromagnetické materiály sa pri zvýšení teploty nad úroveň Curieho t. stávajú paramagnetickými

Magnetometria 1

Obsah:

- úvod do teórie magnetického poľa,
- magnetické vlastnosti materiálov,
- základy magnetometrie,
- prístroje na meranie magnetického poľa,
- spracovanie a interpretácia magnetom. údajov.

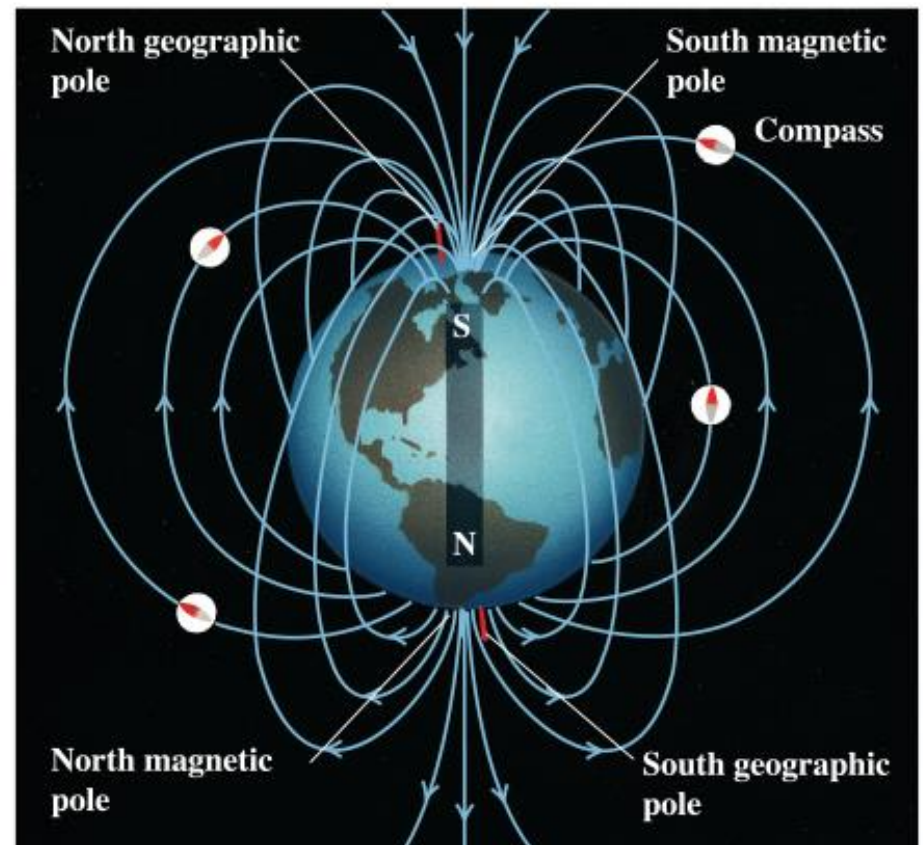
Základy magnetometrie

Úvodné poznámky:

- ❖ Patria medzi najstaršie geofyzikálne metódy
- ❖ Magnetické pole slúžilo najprv na navigáciu
- ❖ Prvým magnetickým prístrojom bol kompas (využívaný Číňanmi už od r.2637 pred n.l.)
- ❖ Spolu s geoelektrickými metódami sa najviac používa v archeológii
- ❖ Pravidelné merania ZMP prebiehajú už od r.1540

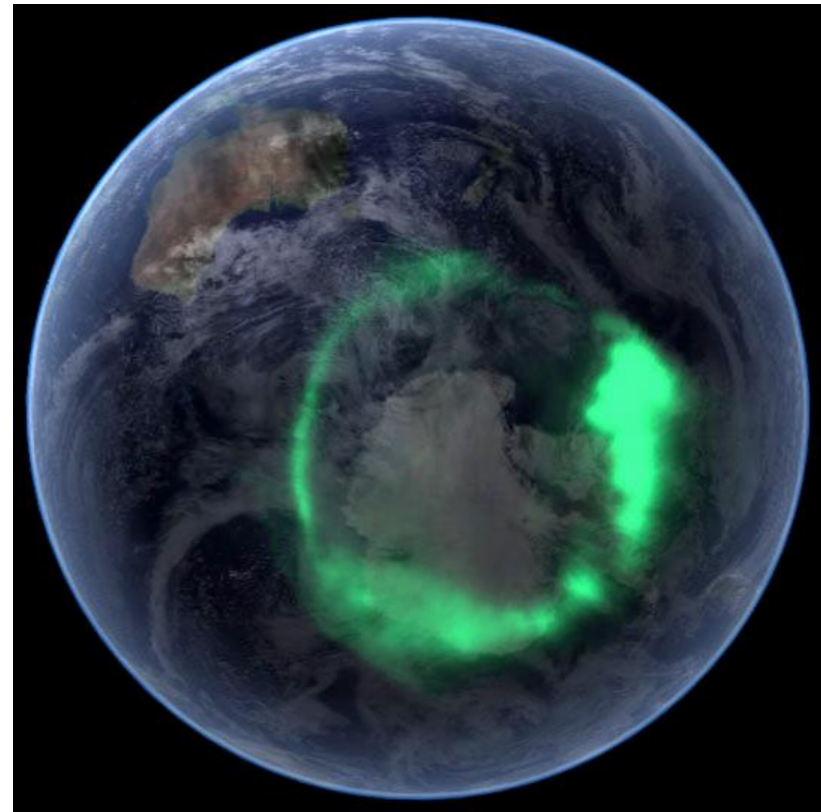
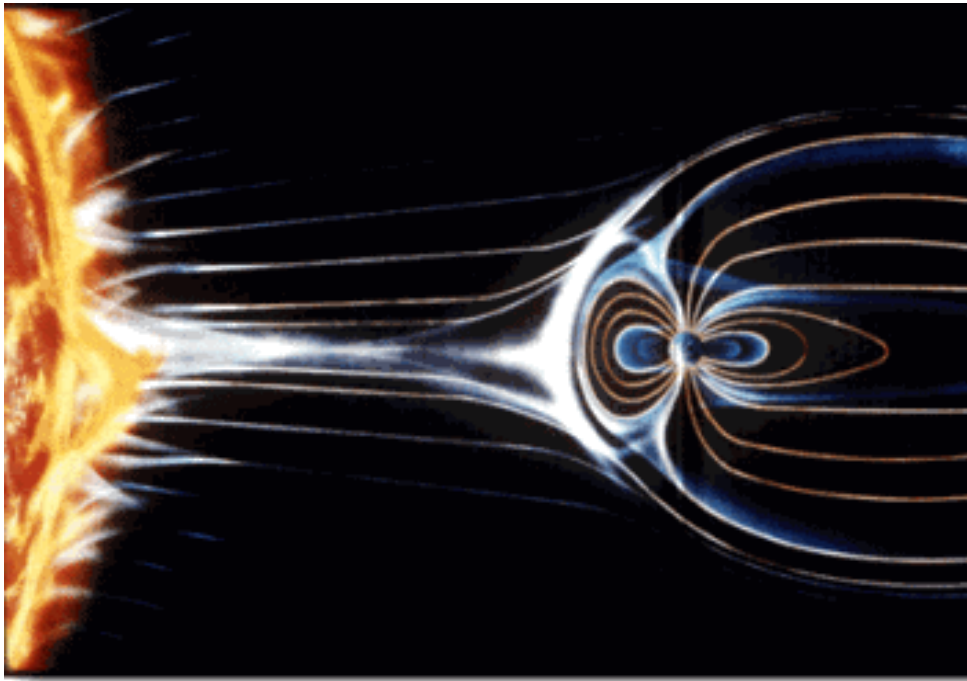
Zemské magnetické pole (ZMP)

Základom jeho generovania je pohyb vodivých hmôt (elektricky nabitých častíc) vo vonkajšom jadre – tzv. hydromagneto-dynamické javy.



Zemské magnetické pole (ZMP)

Z celoplanetárneho hľadiska sa zvykne hovoriť o magnetosfére – ktorá tvorí ochranný „štít“ Zeme pred tzv. slnečným vetrom (prúd vysoko energetických častíc, ktoré sú emitované z povrchu Slnka).



ZMP – časové zmeny

Príčina je vo vnútri Zeme:

☐ Inverzia polarity

(per. státisíce rokov, hlbinné procesy)

☐ Sekulárne variácie.

(per. ~ 500r, hlbinné procesy, až stovky nT)

Príčina je mimo Zeme:

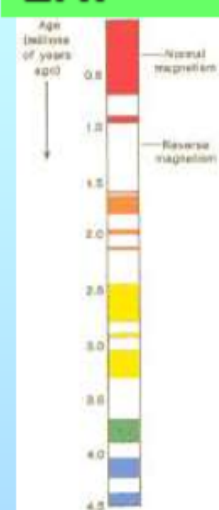
☐ Denné v.

(per. 1 deň, slnečná aktivita, desiatky nT)

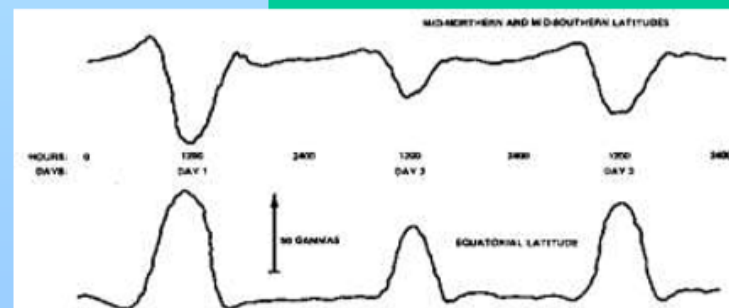
☐ Magnetické búrky

(neperiodické, slnečné erupcie, až tisícky nT)

Inverzia ZMP

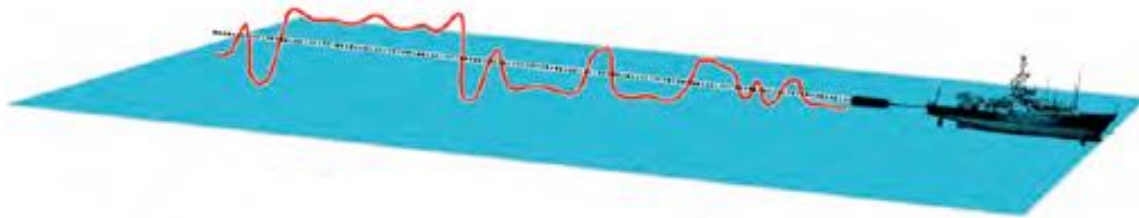


Denné variácie

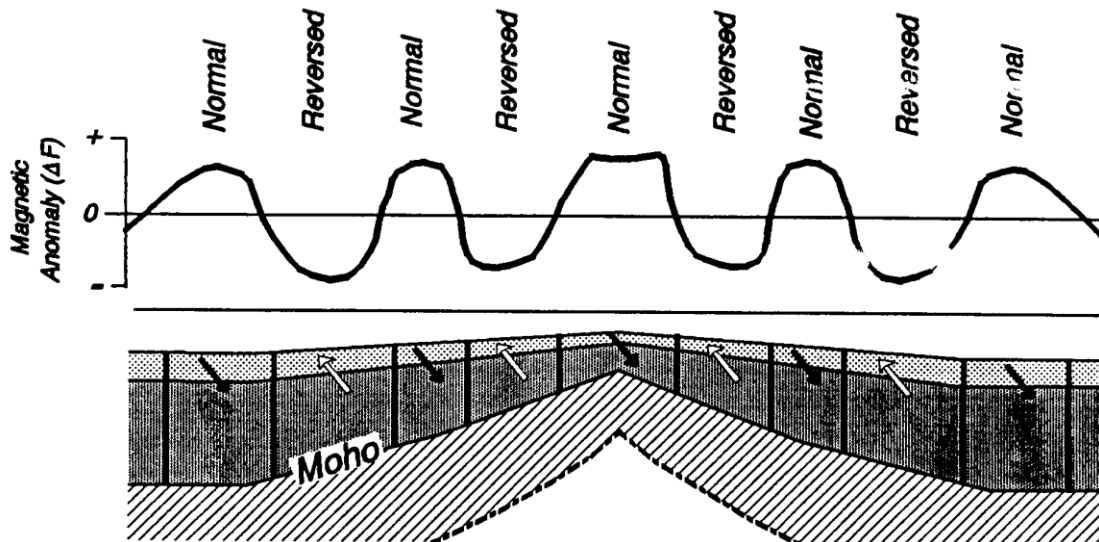


ZMP – časové zmeny

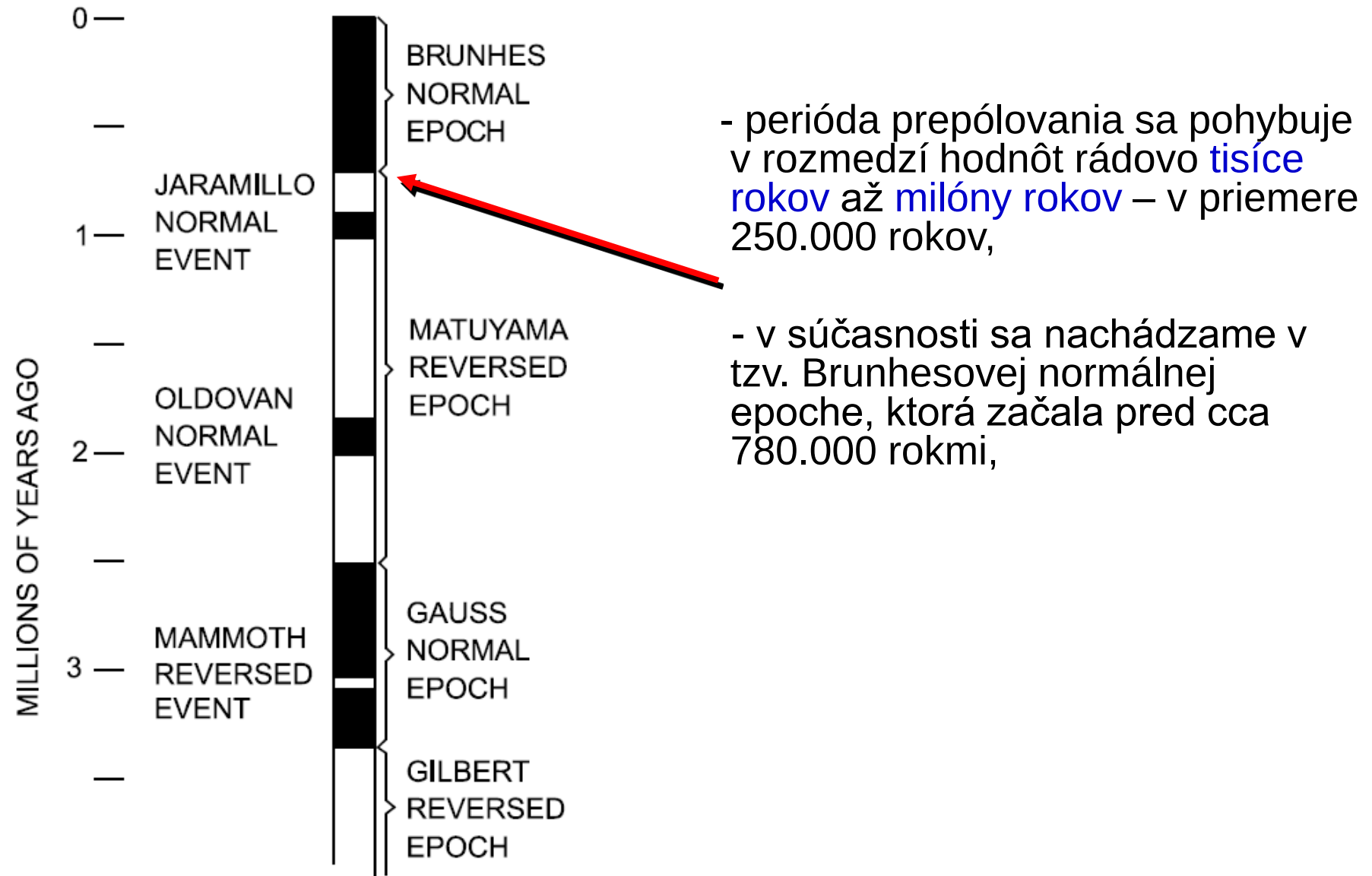
V priebehu historických dôb došlo ku niekoľkonásobnému prepólovaniu magnetických pólů – ku tzv. **inverzii**.



merania v priestore Atlantického oceánu
(Rald and Mason, 1961)



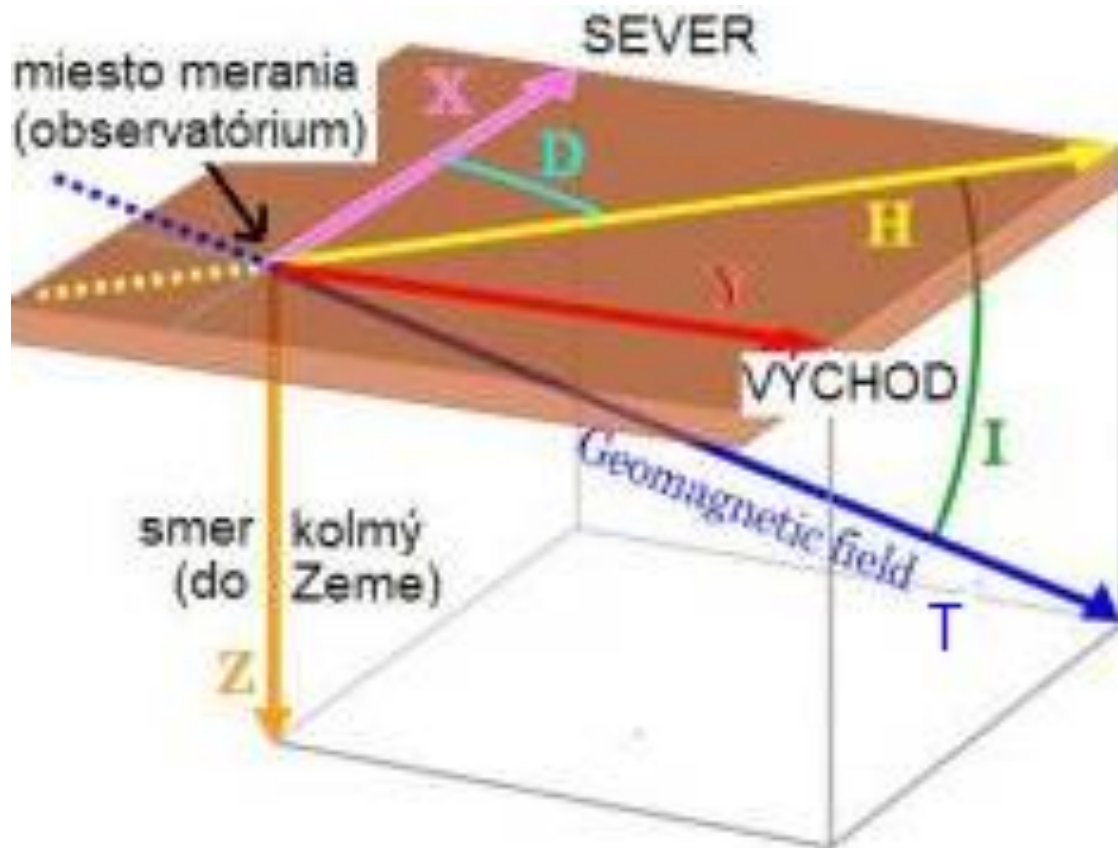
Zemské magnetické pole (ZMP)



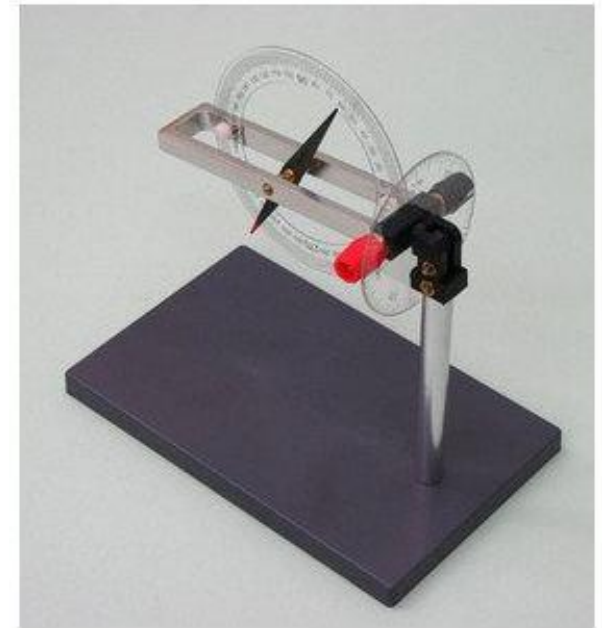
samostatné odvetvie geofyziky – paleomagnetizmus a archeomagnetizmus

Zemské magnetické pole (ZMP)

GEOGRAF.



MAGN.
SEVER



Hlavné parametre (veličiny) ZMP:

T – totálny vektor magnetickej indukcie

H, X, Y, Z – sú jeho zložky

I – inklinácia, D – deklinácia (dôležité uhly)

magnetometria – prístroje

sú založené na rôznych fyzikálnych princípoch:

- kappa-metre: meranie magnetickej susceptibility,
- magnetometre: veľkosť totálneho vektora magn. indukcie
- gradientometre: rozdiely vo veľkosti tot. vekt. mag. indukcie

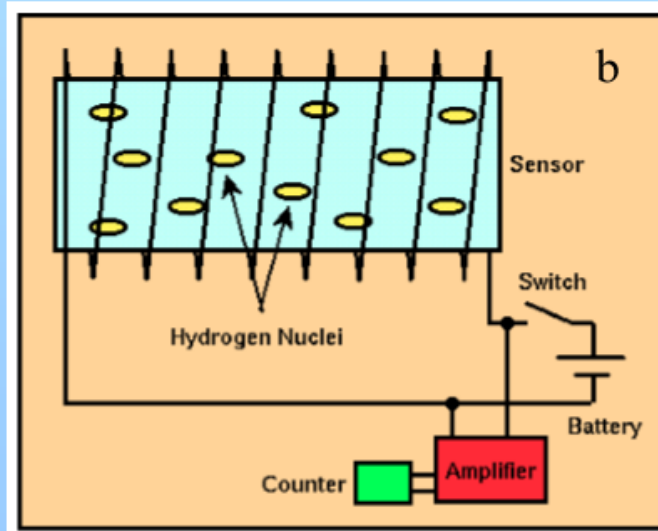
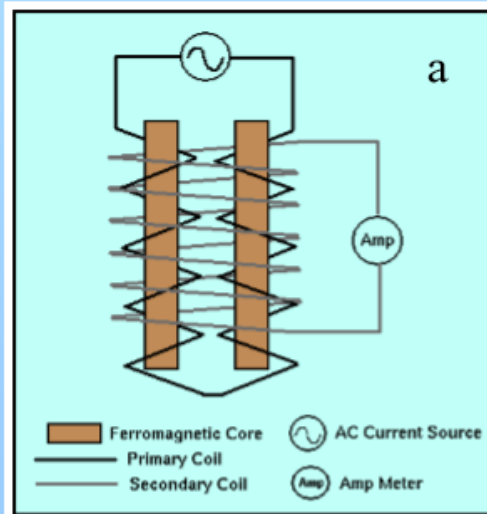
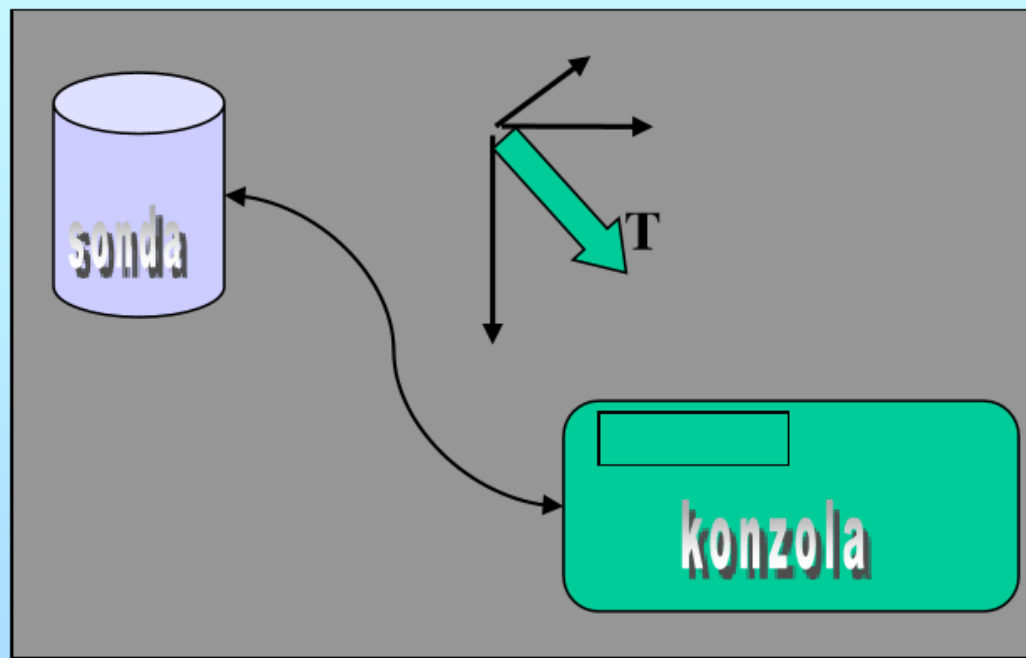


magnetometre a gradientometre

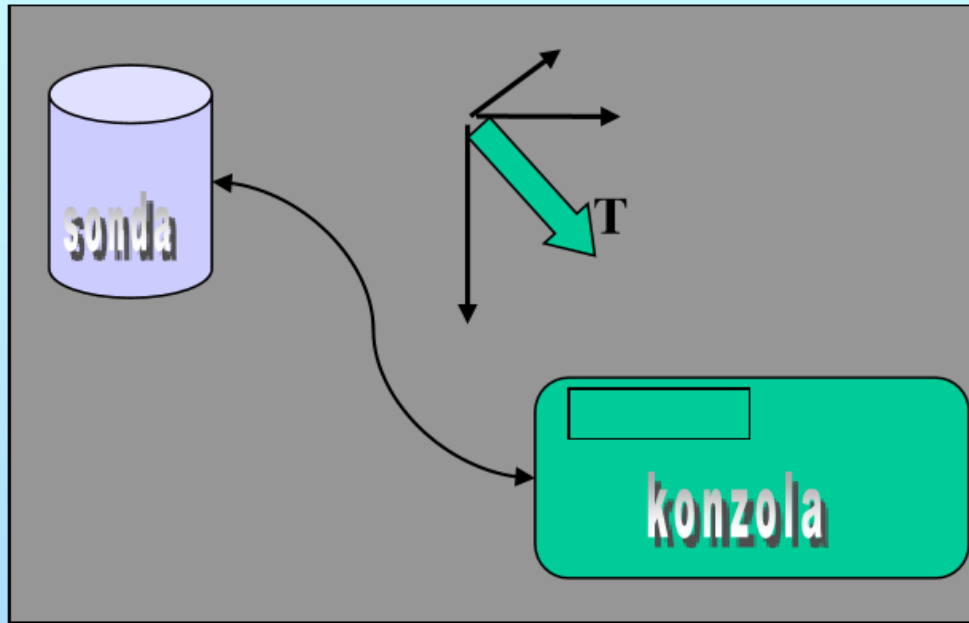
Existujú rôzne rozdelenia:

- skalárne (merajú veľkosť T), vektorové (trojzložkové),
- meranie na jednej úrovni (magnetometre)
alebo rozdielu T na dvoch úrovniach (gradientometre),
- spôsob merania – tzv. “stop and go” alebo “walking mode”
(v archeogeofyzike sa používa najmä “walking mode”)
- samostatná kategória sú letecké magnetometre (aj drony),
- rôzne fyzikálne princípy (magnetické váhy, flux-gate, protónový, céziový, SQUID).

fyzikálny princíp – reakcia súčastí senzora na vonkajšie magnetické pole



fyzikálny princíp – reakcia súčastí senzora na vonkajšie magnetické pole



magnetometre a gradientometre

Protónový magnetometer:

Merací čas sú rádovo sekundy, príp. zlomky sekundy (patrí medzi pomalšie prístroje).

Vnútoraná presnosť je na úrovni 0.1 nT, vonkajšia niekoľko nT.

Využíva sa najmä pri geologických aplikáciách.



magnetometre a gradientometre

Magnetometer s ferosondou (flux-gate):



Často používané v archeológii v tzv. gradientovom prevedení (pole je merané v 2 úrovniach) a v multi-senzorovom usporiadaní.



Presnejšie a najmä rýchlejšie ako protónové magnetometre.

magnetometre a gradientometre

"Céziový" magnetometer: (Cs-vapour magnetometer)

Merací čas sú rádovo desatiny až tisíciny sekundy (patrí medzi najrýchlejšie prístroje, ale aj najdrahšie).

Vnútrotná presnosť je na úrovni 0.01 nT, vonkajšia ± 1 nT.

Pozor – má tzv. mŕtvy uhol pri meraní (kedy nemeria správne).

Využíva sa najmä pri UXO, geol. a archeol. aplikáciách.



Niekedy sa používajú aj v gradientových usporiadaniach.

magnetometre a gradientometre

Magnetometer SQUID:

(Superconducting Quantum Interference Device)

Je to vysoko presný magnetometer, využívajúci jemné magnetické polia okolo supravodičov, využívajúc tzv. Josephsonov jav.

Vyžaduje chladenie tekutým dusíkom.

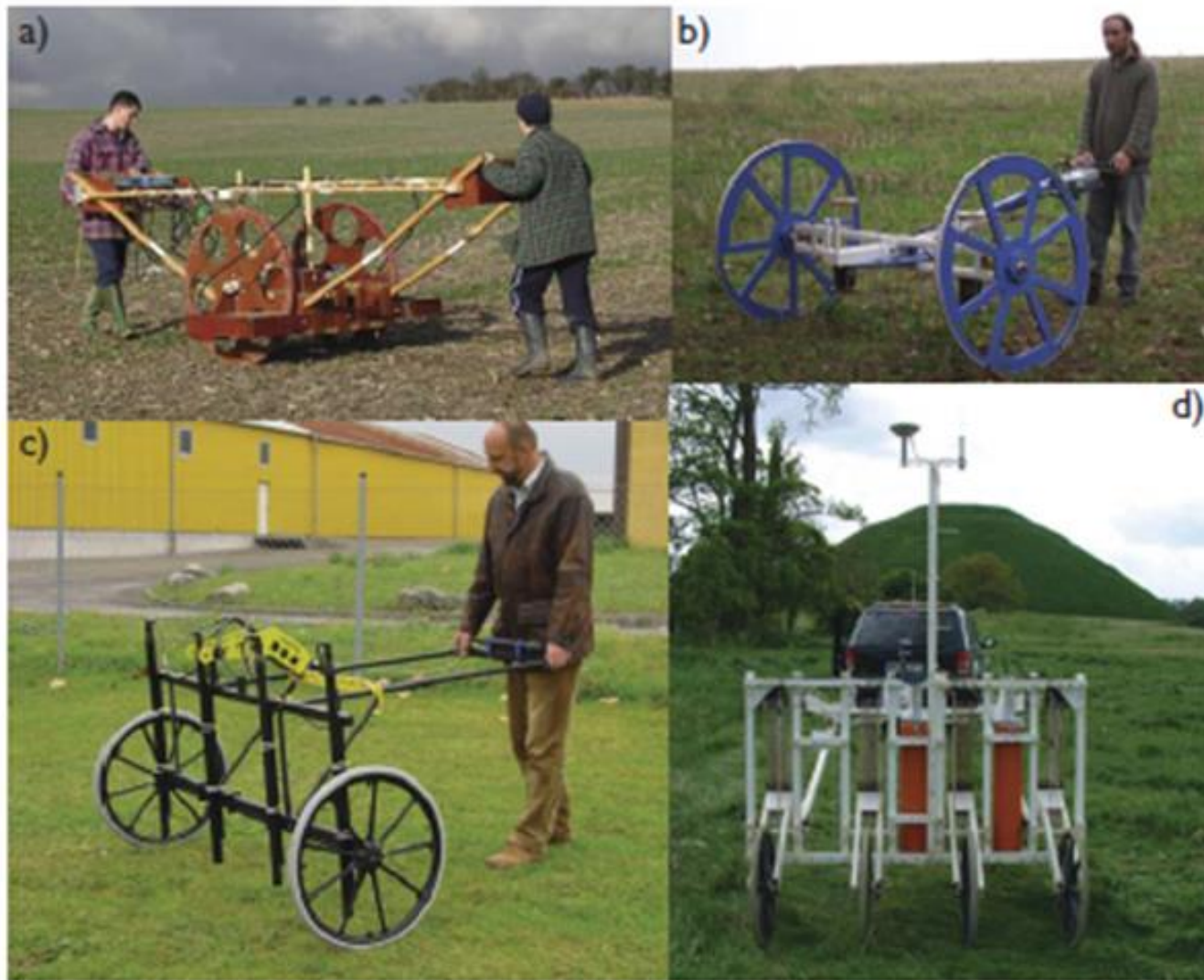
Väčšinou labortórne prístroje, existujú už však aj terénne verzie. Presnosti už pod 0.001 nT.



rôzne systémy magnetometrov a gradientometrov (ručne nesené)



rôzne systémy magnetometrov a gradientometrov (ručne tlačené)



rôzne systémy magnetometrov a gradientometrov (t'ahané za vozidlom)



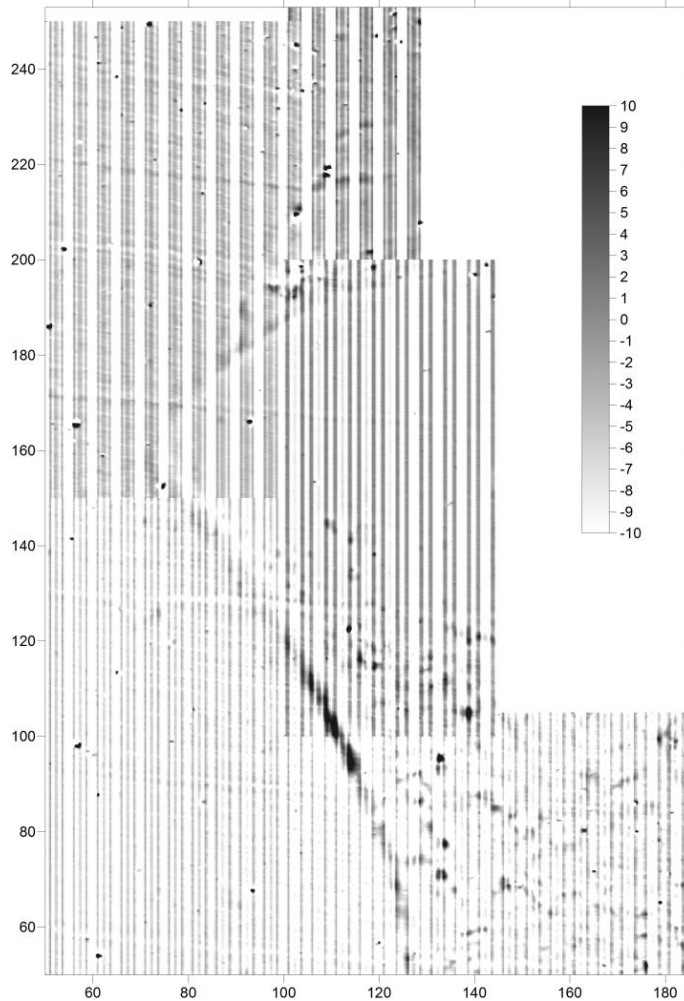
senzory: 0.25 m od seba, vzorkovanie pozdĺž meraných profilov: 0.1 m

Meranie a základné spracovanie dát v magnetometrii:

- príprava terénu (plánovanie profilov odpadá, meria sa vždy plošne)
- zber dát v teréne - samotné meranie s prístrojmi (min. 1 m medzi profilmi)
(poloha väčšinou snímaná pomocou GPS)
- oprava o variácie geomagnetického poľa (netreba robiť pri gradientoch)
(hodnoty z druhého magnetometra alebo pomocou filtrov)
- odpočítanie tzv. normálneho poľa: výpočet poľa ΔT (netreba pri gradientoch)
(štatistické metódy alebo globálne modely magn. poľa
– napr. IGRF alebo WMM)
- zavedenie špeciálnych opráv na hodnotové posuny
medzi senzormi (tzv. “heading error”) a iné deformácie zmeraného poľa
- interpolácia do máp poľa ΔT a vizualizácia
(farebné alebo ČB tieňované mapy – v archeológii nazývané ako magnetogramy)

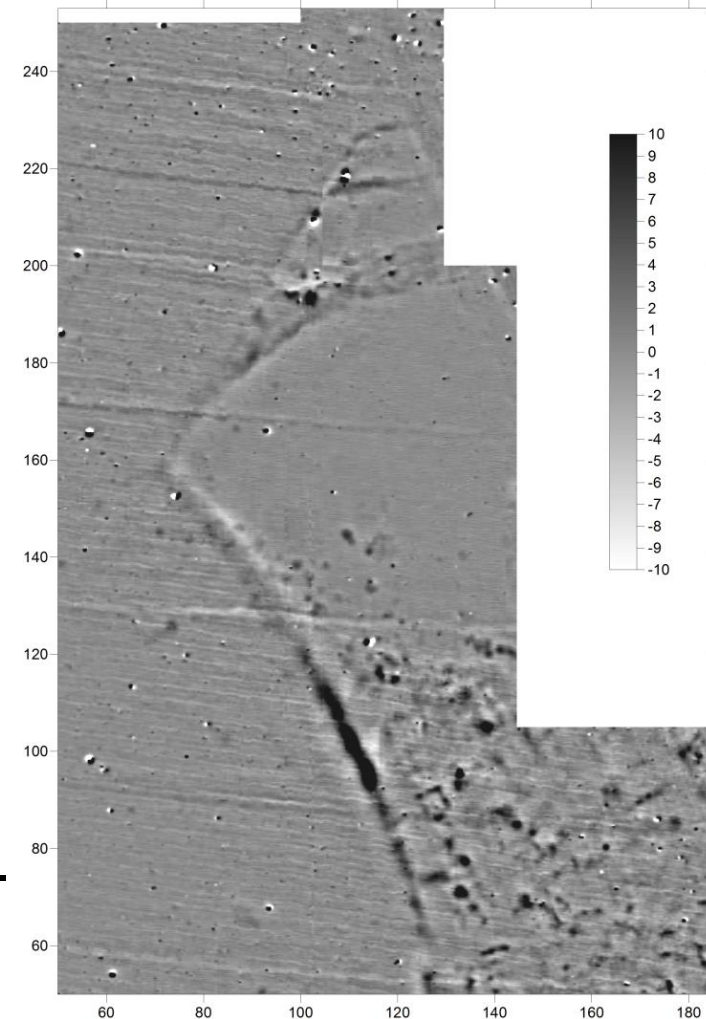
pri spracovaní dát s viacerých paralelne nesených (tlačených) senzorov vzniká tzv. “heading error”, ktorý sa prejavuje “umelými pásikami”

pôvodné dáta



rieši sa pomocou tzv. mediánových filtrov alebo postupom, ktorý sa nazýva ako tzv. mikroleveling.

filtrované dáta



Interpretácia dát v magnetometrii:

tvary získaných anomálií - závisia od:

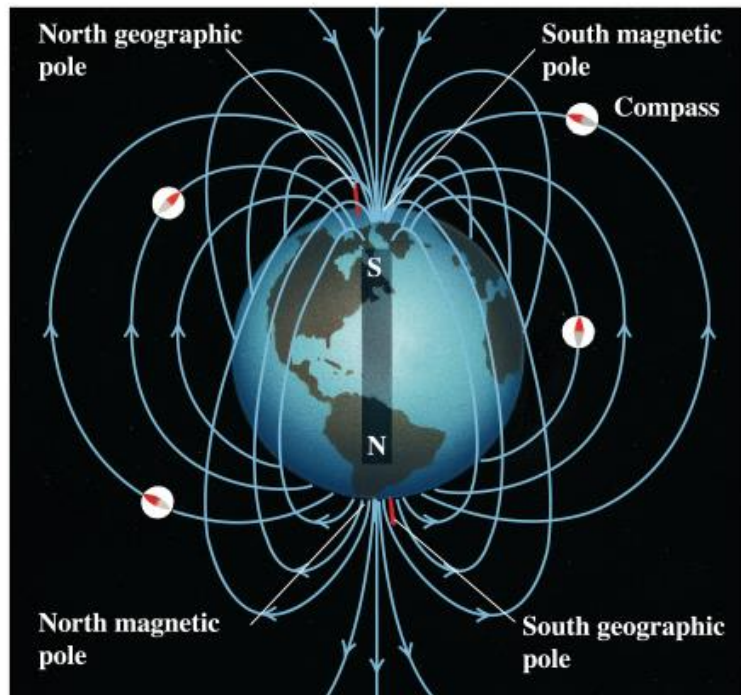
1. zemepisnej šírky (najmä pri indukovanej magn.),
2. magnetických vlastností objektu,
3. hĺbke uloženia a rozmerov objektu,
4. tvare objektu a orientácii jeho dlhšej osi,
5. pri zobrazovaní vo forme kriviek na profiloch –
aj od orientácie daného profile.

Interpretácia sa delí na **kvalitatívnu** (polohy objektov a ich približné rozmery) a **kvantitatívnu** (hĺbka uloženia, susceptibilia). Pri archeologických aplikáciách dominuje kvalitatívna interpr.

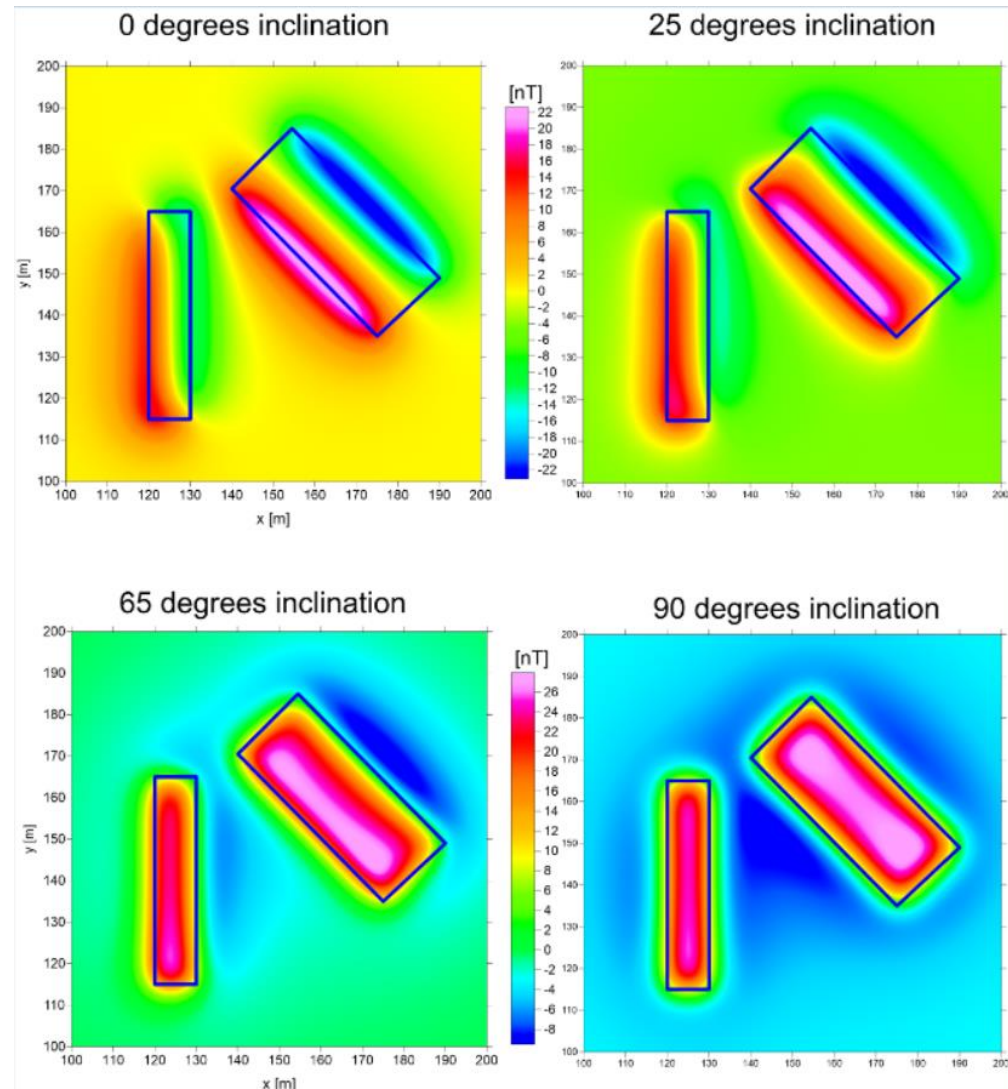
Interpretácia dát v magnetometrii:

tvary získaných anomálií (závislosť od zemepisnej šírky)

pre rôzne zemepisné šírky
platí iný uhol (inklinácia)
indukujúceho magn. poľa

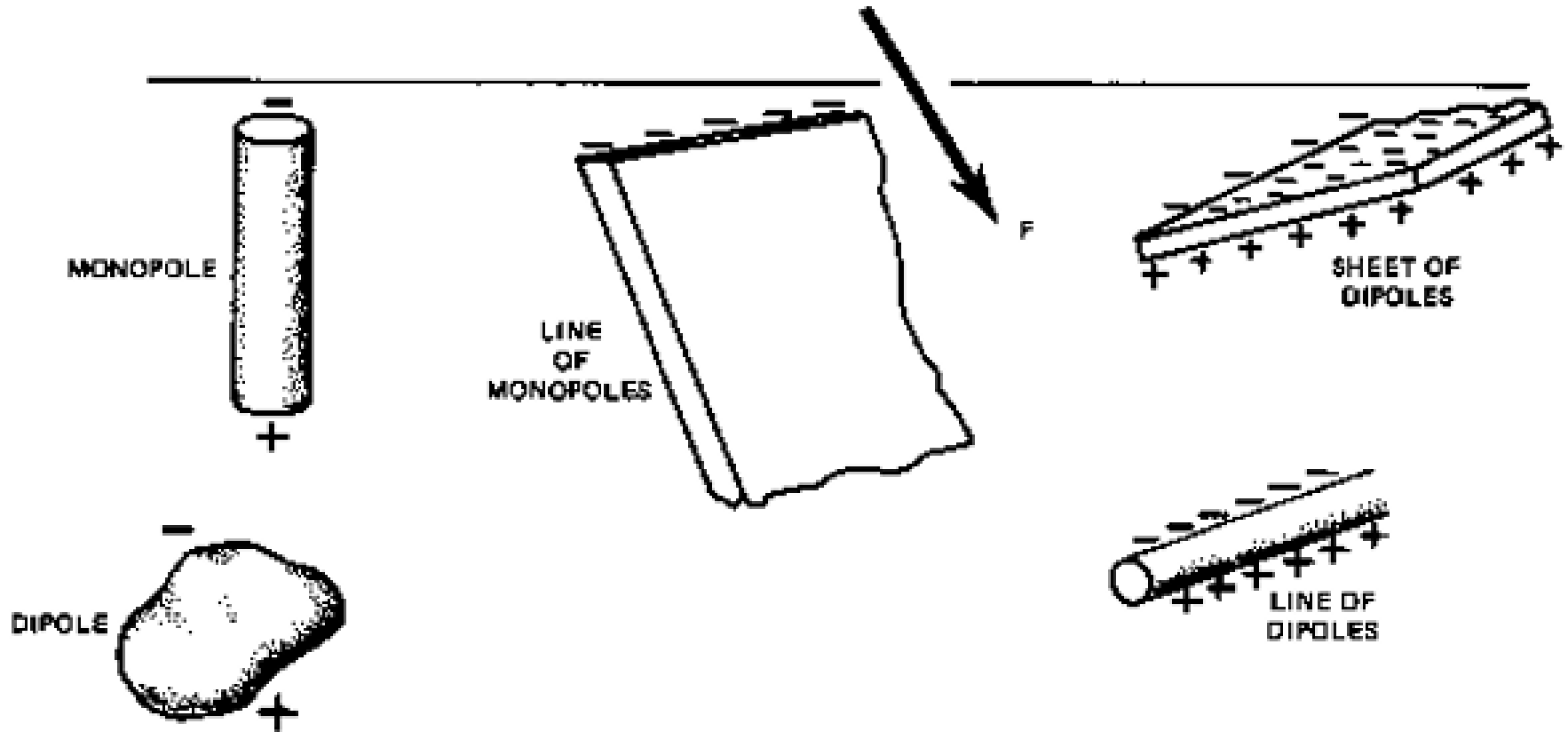


Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.



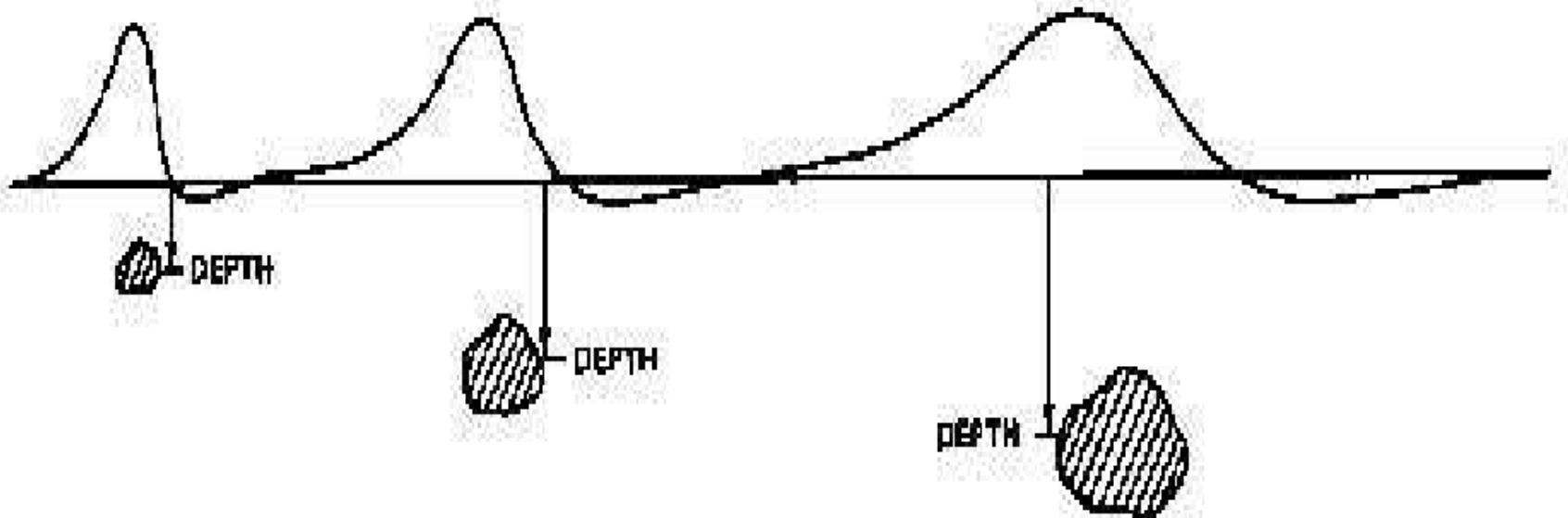
Interpretácia dát v magnetometrii:

tvary získaných anomálií (tvar objektu)



Interpretácia dát v magnetometrii:

tvary získaných anomálií (hĺbka uloženia)

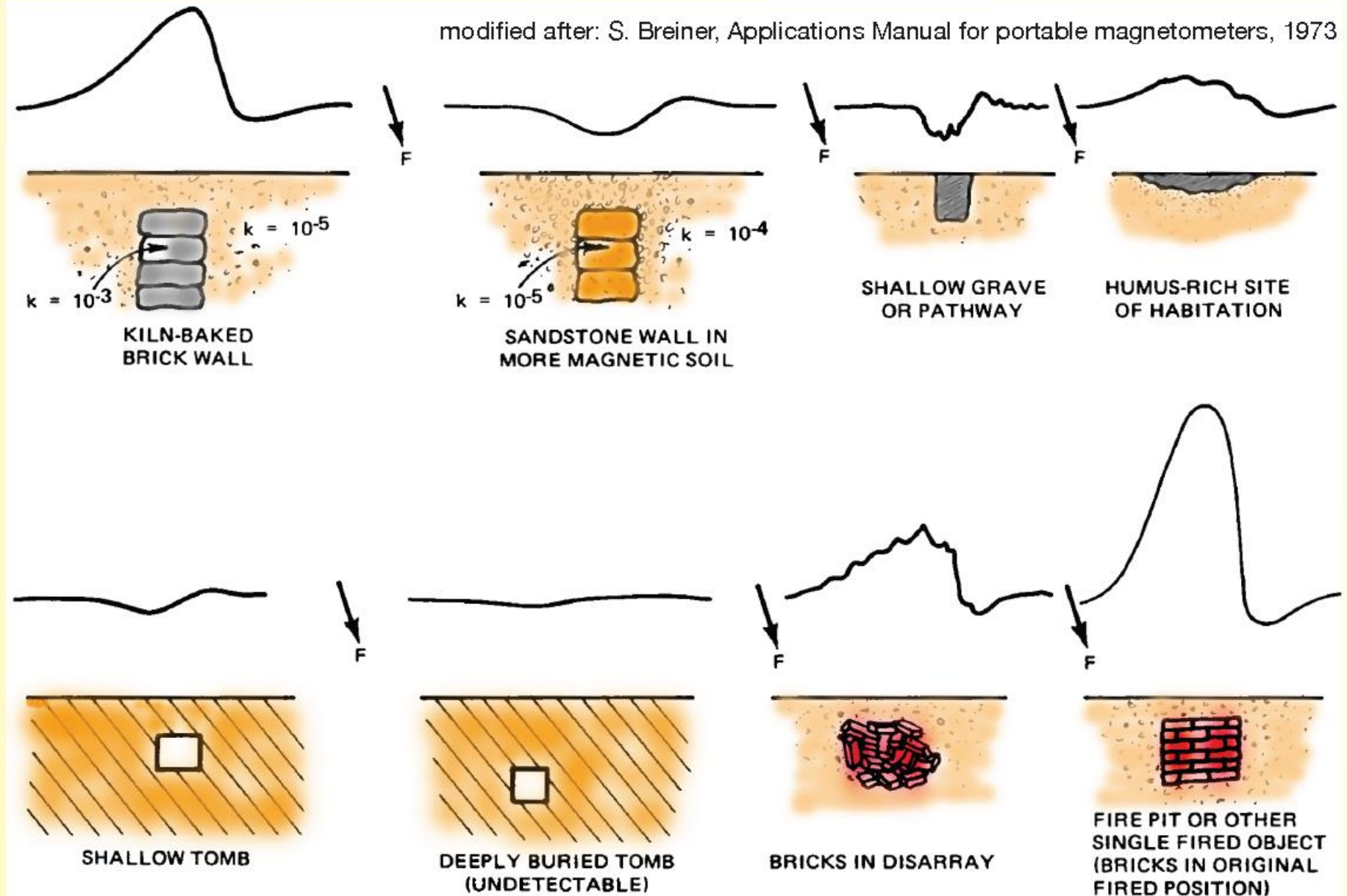


hlavné oblasti použitia magnetometrie v archeológii:

- 1. vyhľadávanie železných objektov (výrazné dipólové anomálie) (vysoká susceptibilita železa + reman.)**
- 2. vyhľadávanie starých žiarovísk, pecí, ohnísk, atď.**
(dlhšie pôsobiaci oheň zmagnetizuje podložné horniny – dodá im tzv. remanentnú magnetizáciu - „vpáli do nich aktuálne pole“)
- 3. detekcia bývalých priekop, jám, atď. – vyplnené objekty hlinou s vyšším obsahom humusu**
(vyššia susceptibilita hlin s prítomnosťou humusovej zložky) – sídliská, pohrebiská, rondely, hradiská (valy)
- 4. detekcia zakrytých múrov (vhodnejšia sú geoel. metódy a radar)**
funguje, ak sú z magnetickejších hornín alebo vytvárajú vhodný kontrast k okolitým hlinám s vyšším obsahom humusových zložiek

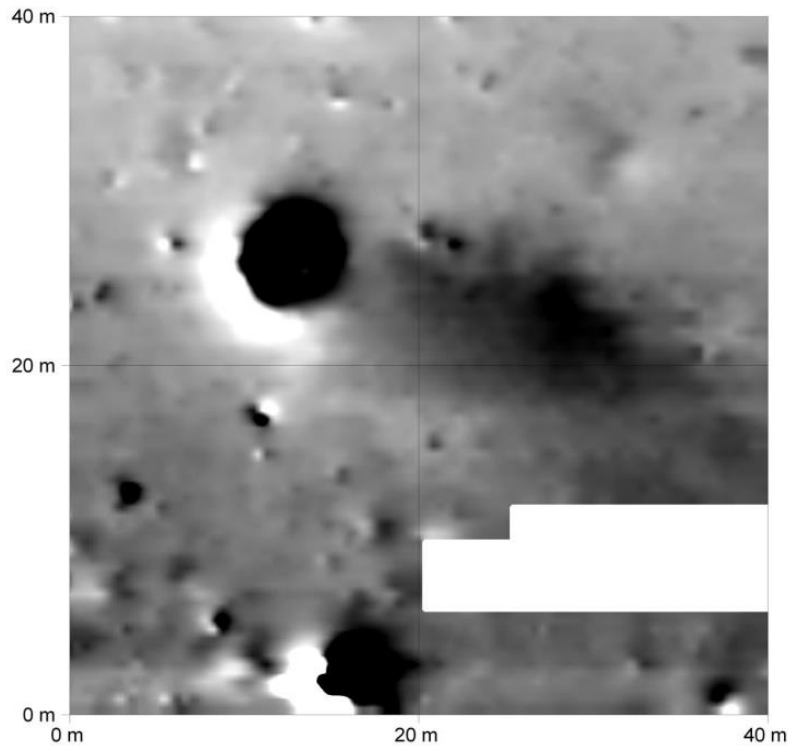
rôzne objekty a ich prejavy v anomálnom magnetickom poli

modified after: S. Breiner, Applications Manual for portable magnetometers, 1973

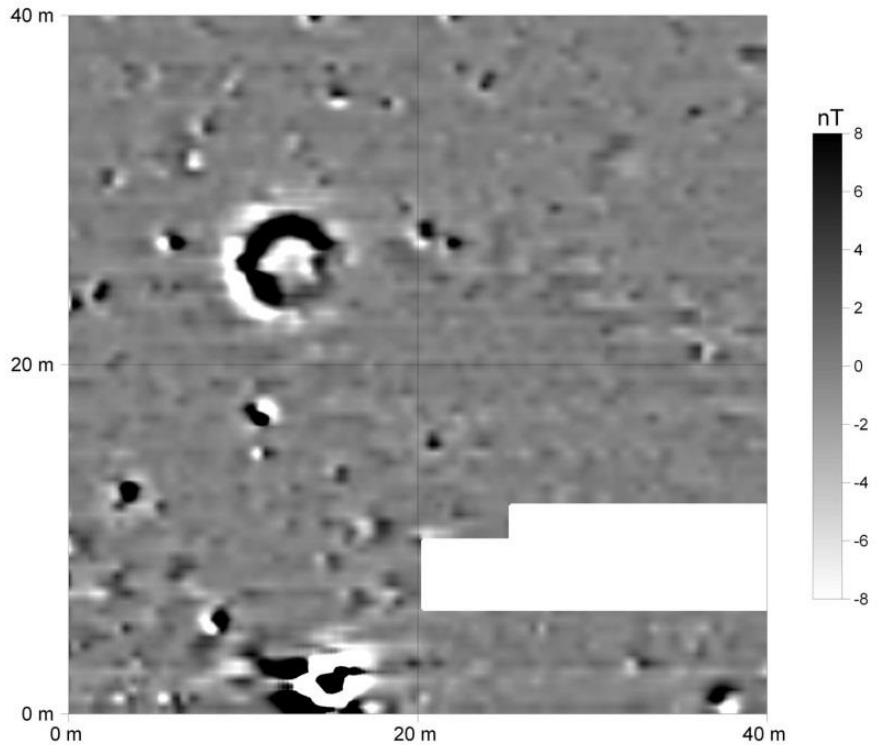


rôzne príklady:

žiaroviská, pece



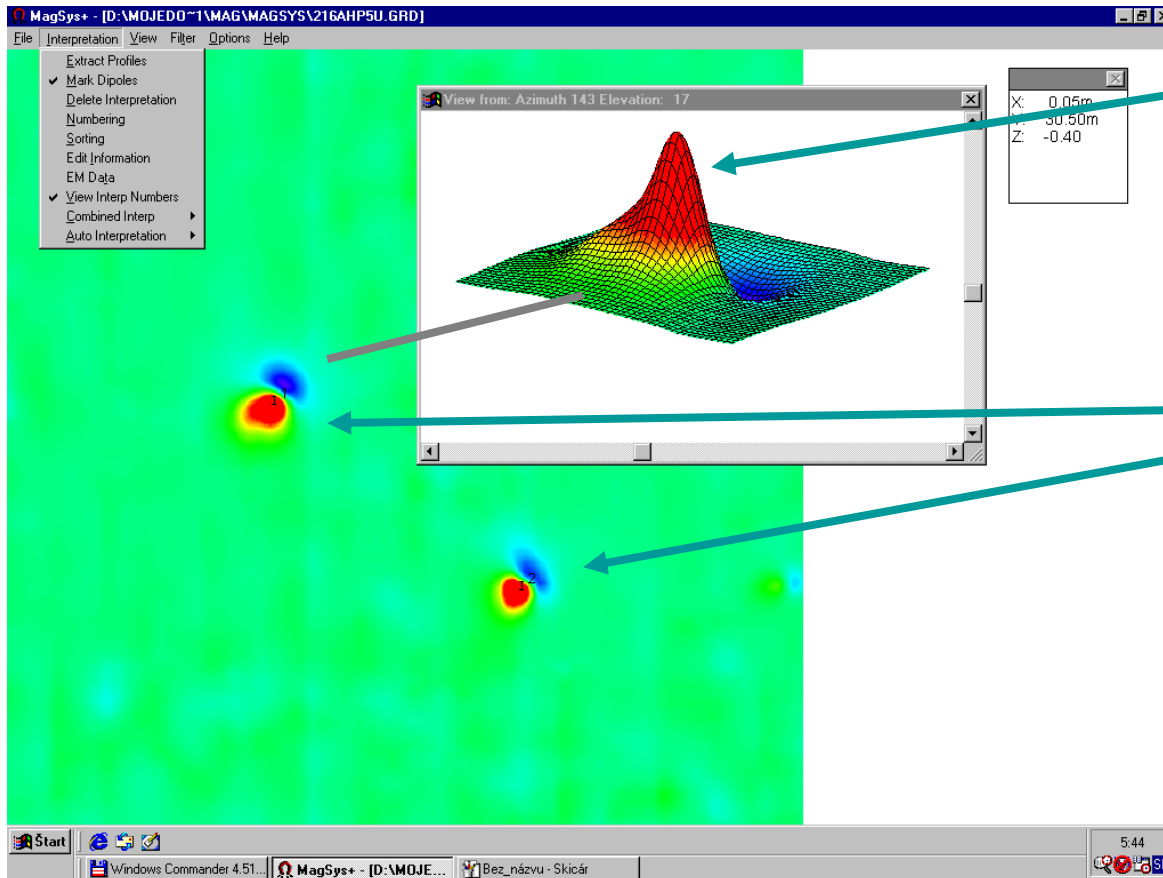
mapa magn. poľa



mapa vert. gradientu mag. poľa

rôzne príklady:

železné predmety

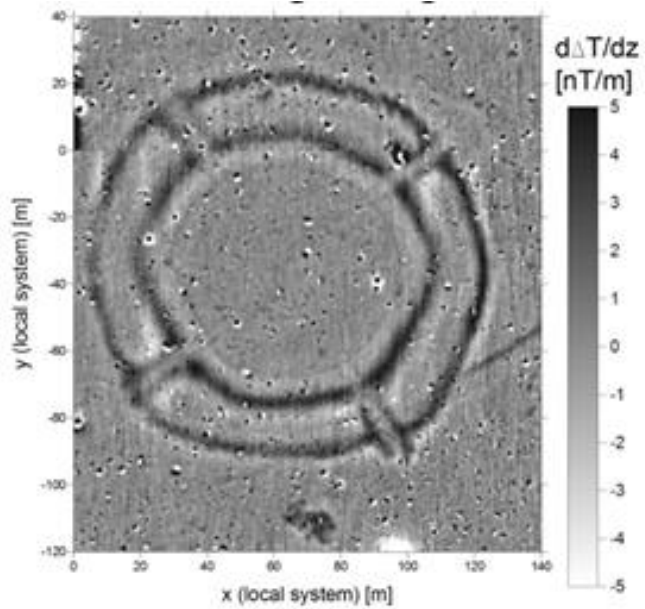


typický
dipólový
prejav

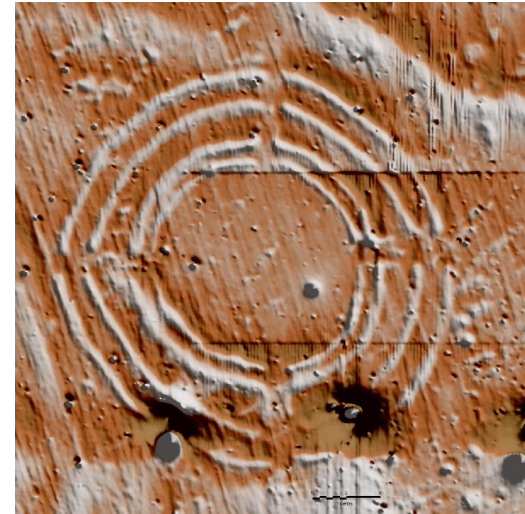
železné
hroty šípov

rôzne príklady:

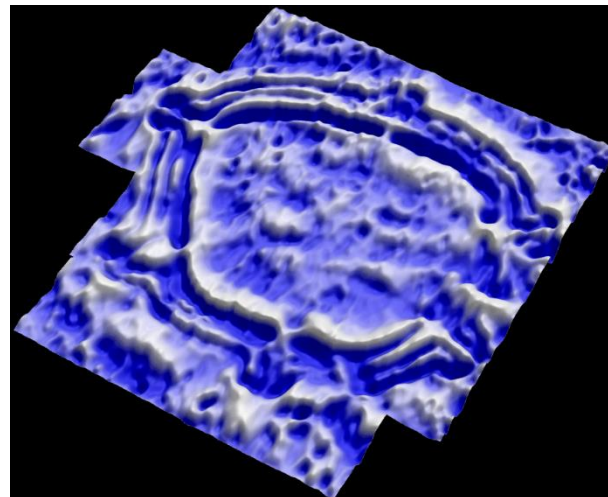
rondely



Milovice (ČR)



Cífer (SK)



Golianovo (SK)

rôzne príklady:

sídliská

letecká snímka



ranno-stredoveké sídlisko, ostrov Witsum (severné memecko) (priekopy, zemlianky, domy)

využitie magnetometrie

pithouses (zemlianky)

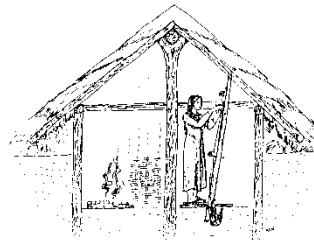
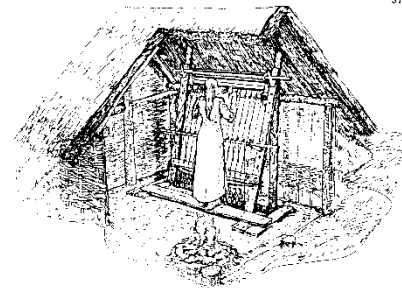
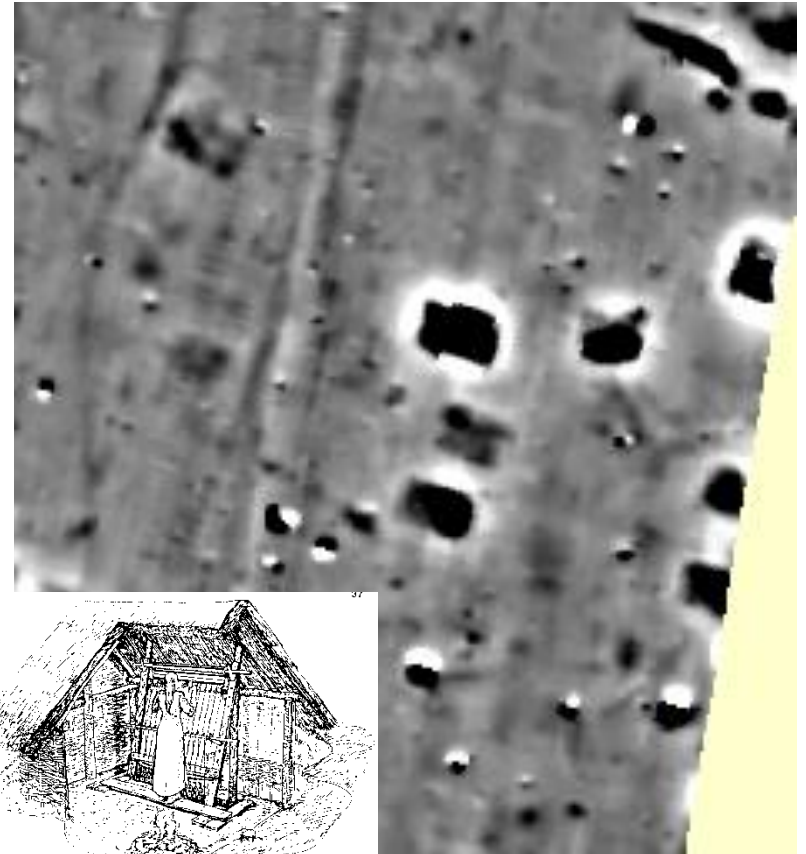
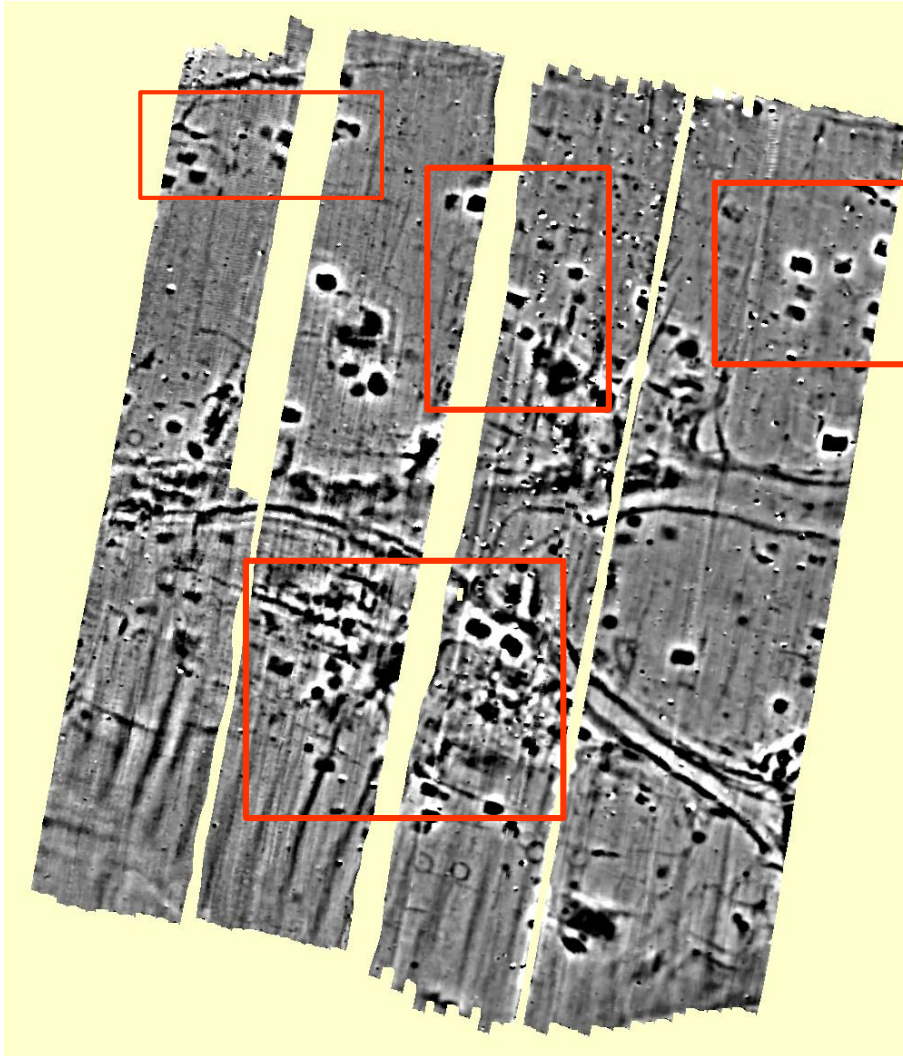
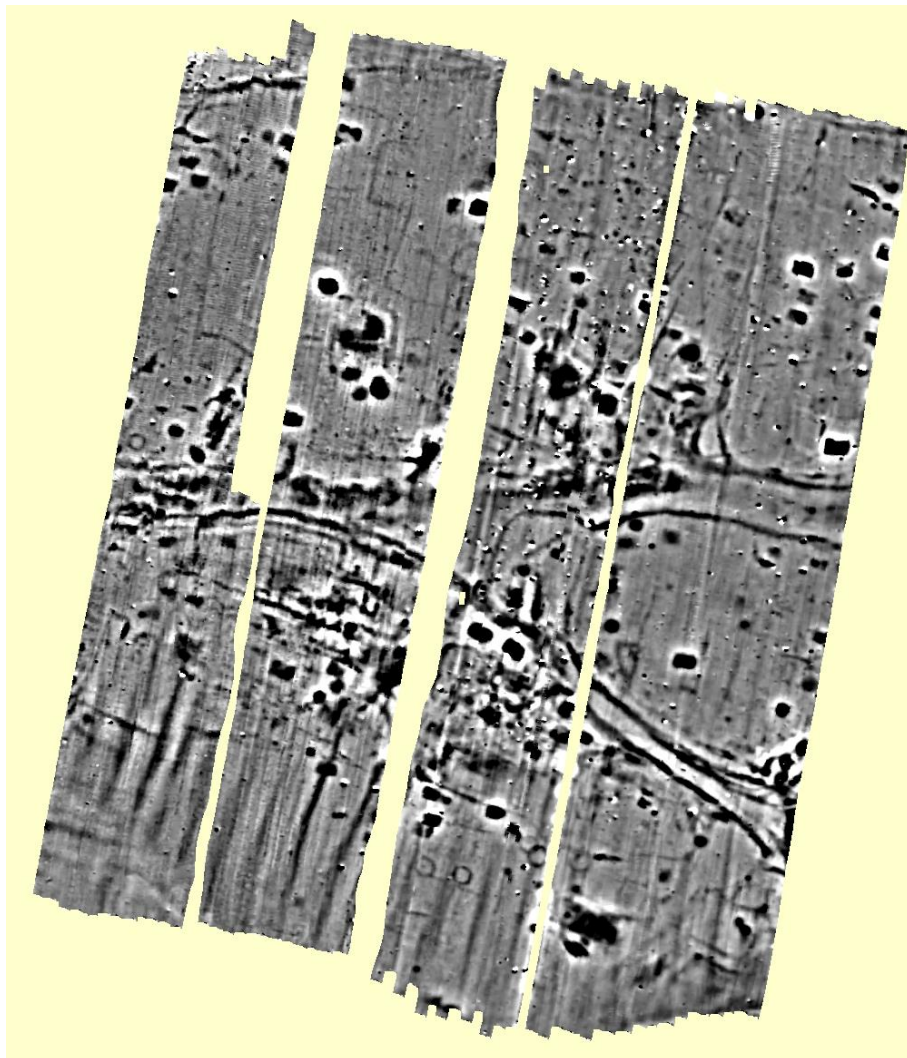


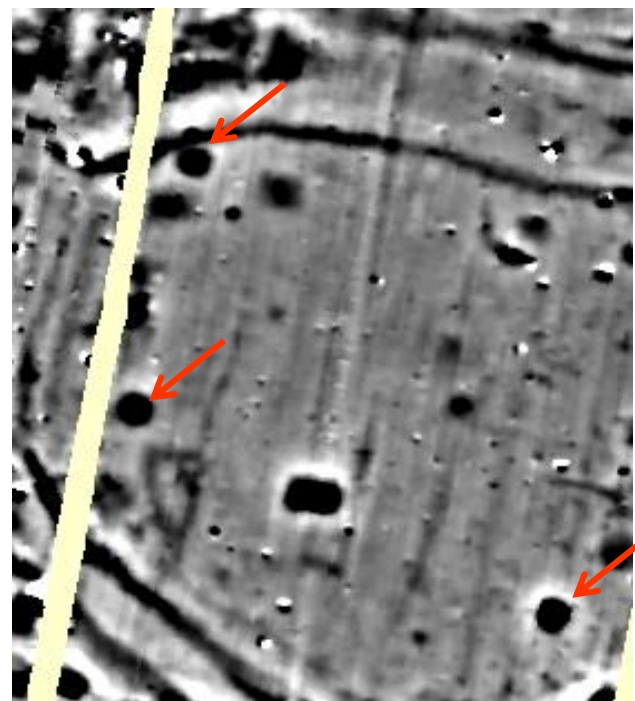
Abb. 7
Wittorf, Stadt Vinschbörde, Fig. 78
Rekonstruktion eines der Grubenhäuser 2
mit Wiedergabe der jüngeren Darstellungsweise.

ranno-stredoveké sídlisko, ostrov Witsum (severné memecko) (priekopy, zemlianky, domy)

využitie magnetometrie



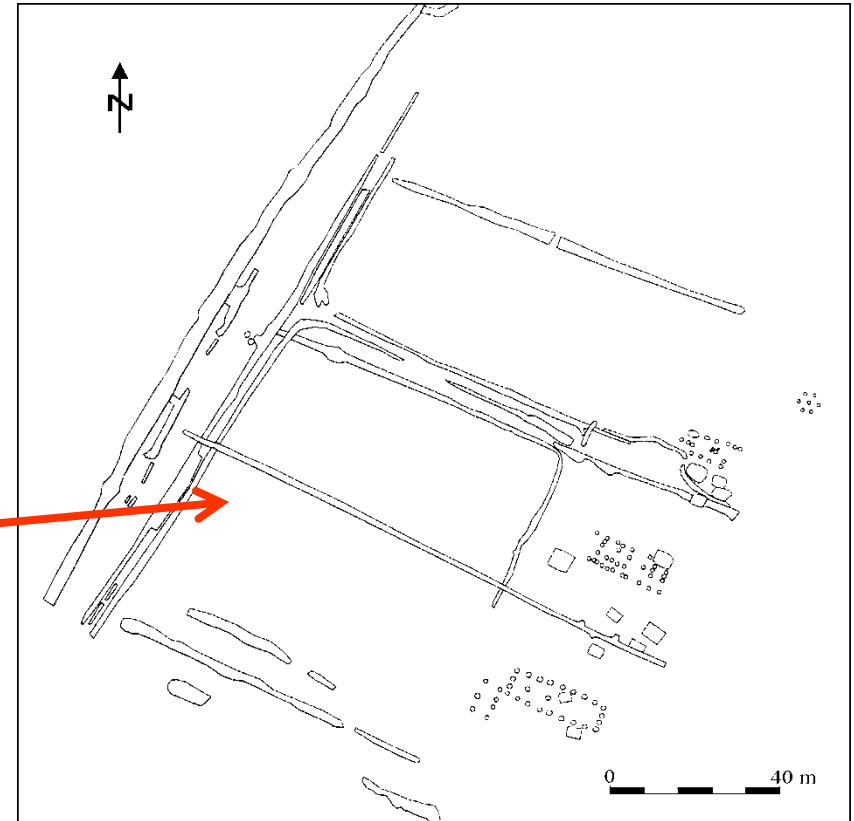
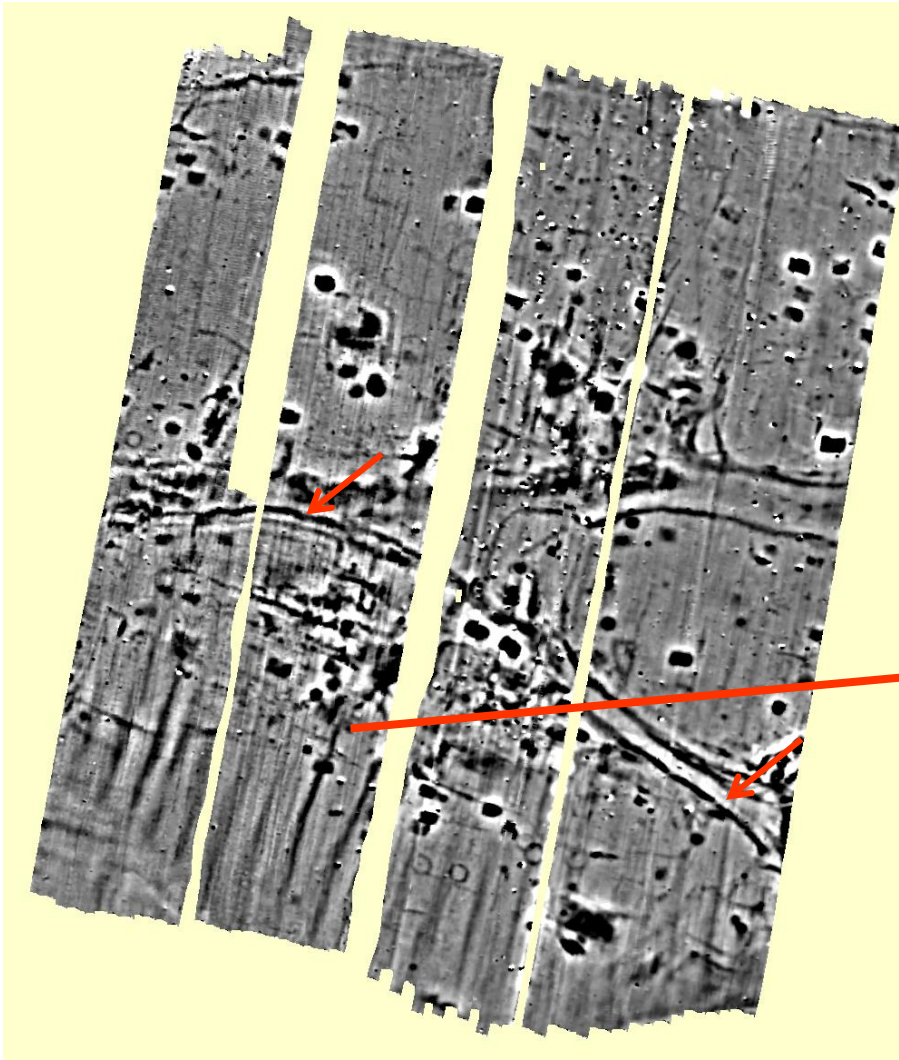
wells (studne)?



ranno-stredoveké sídlisko, ostrov Witsum (severné memecko) (priekopy, zemlianky, domy)

využitie magnetometrie

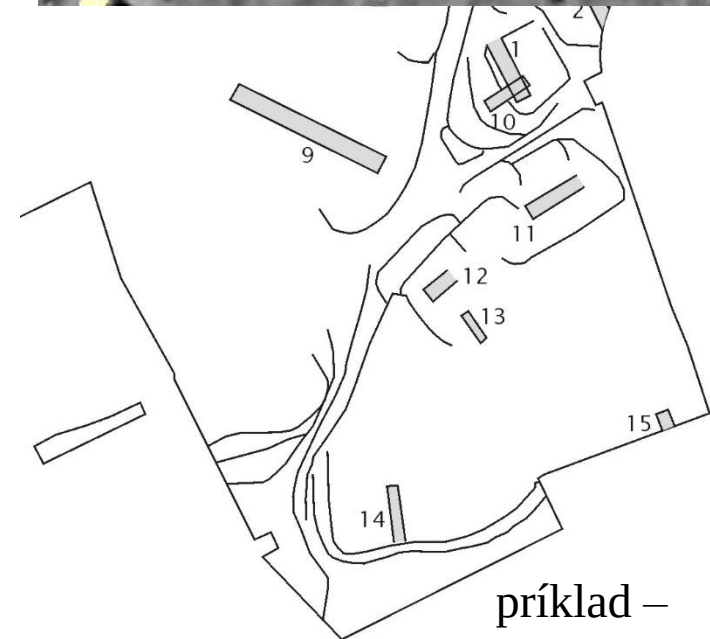
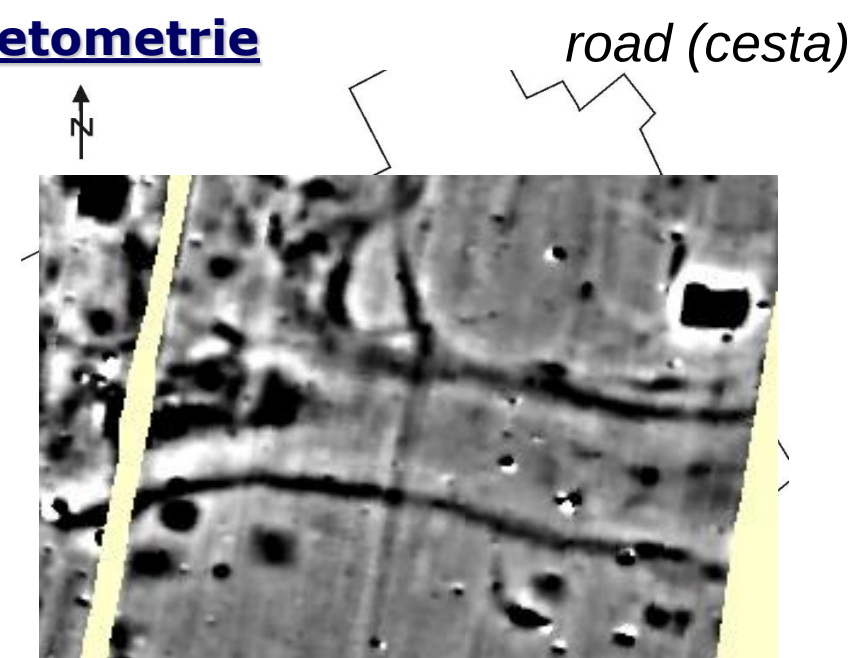
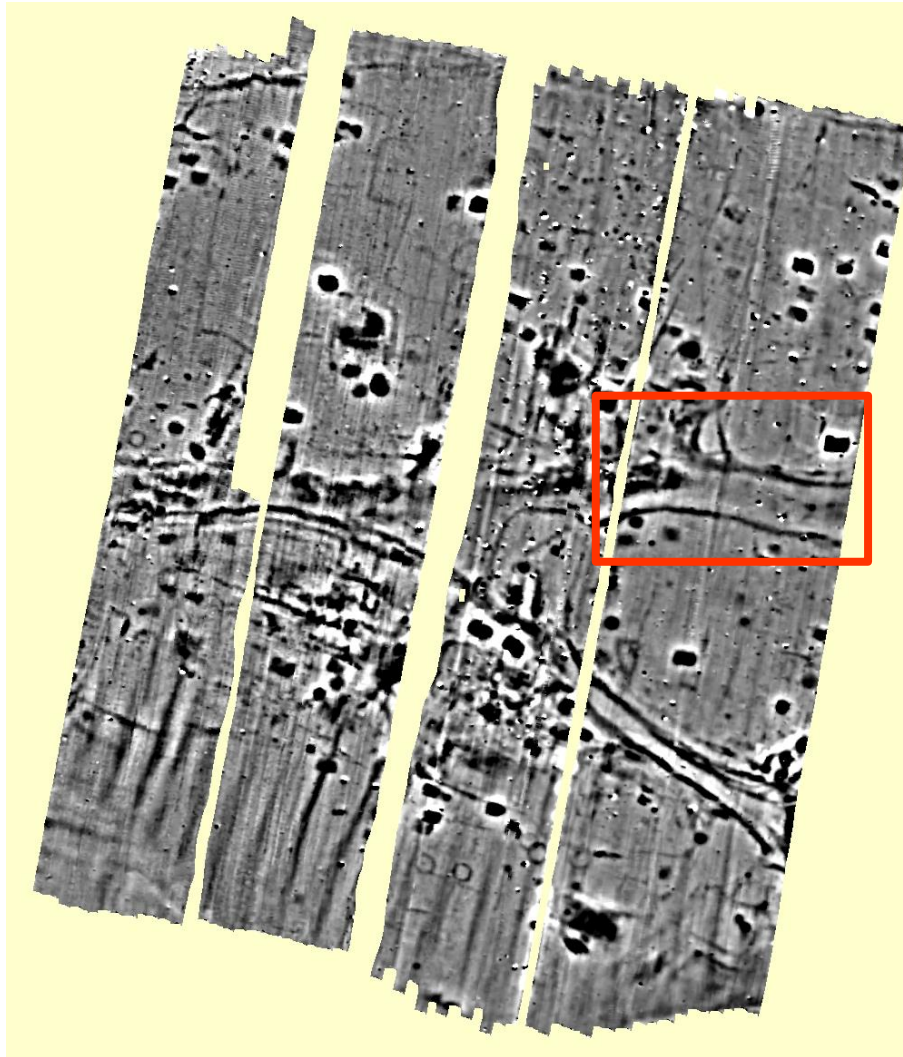
*ditches (priekopy)
boundaries of fields ?(hranice
polí?)*



príklad: sídlisko Oelde

ranno-stredoveké sídlisko, ostrov Witsum (severné memecko) (priekopy, zemlianky, domy)

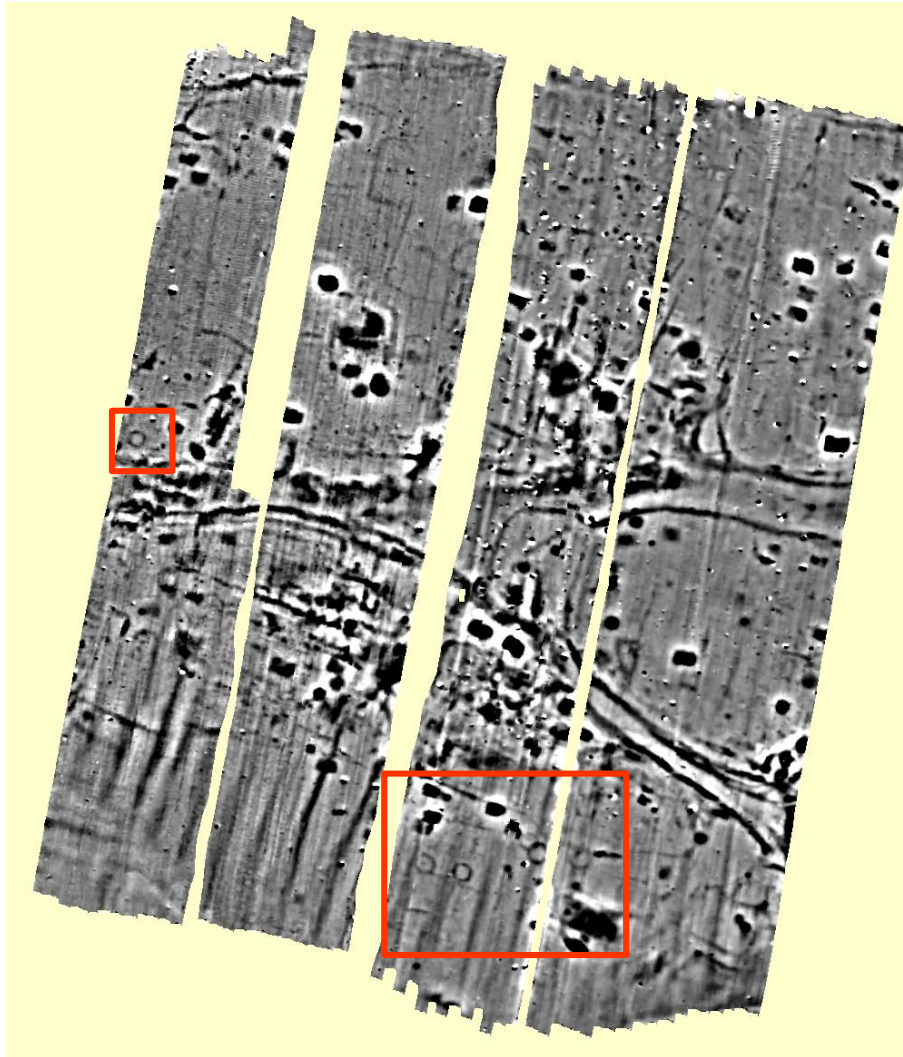
využitie magnetometrie



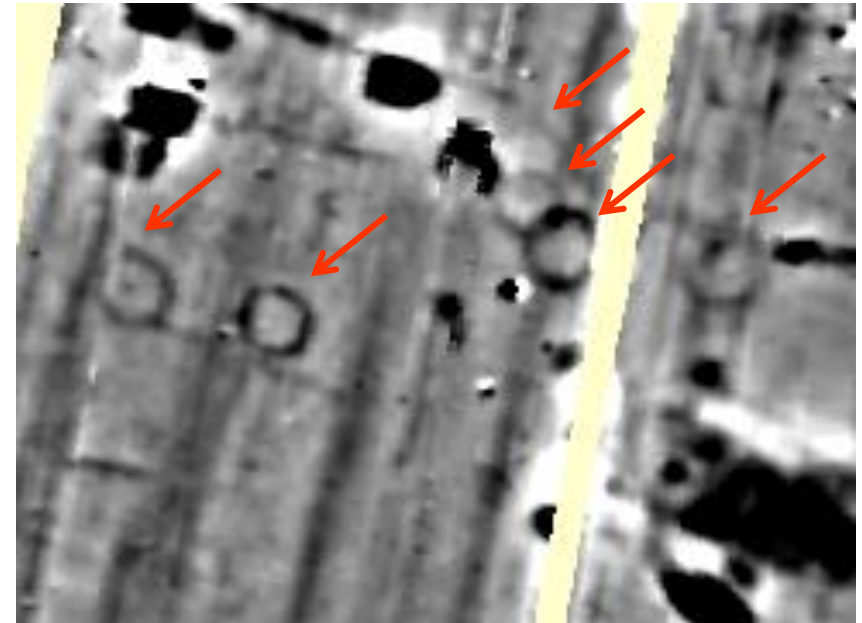
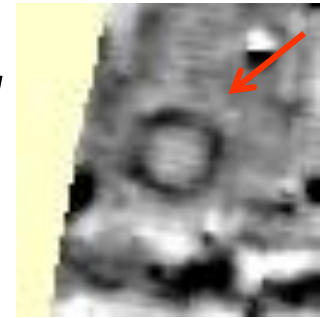
príklad –
Sídliisko Den Burg

ranno-stredoveké sídlisko, ostrov Witsum (severné memecko) (priekopy, zemlianky, domy)

využitie magnetometrie

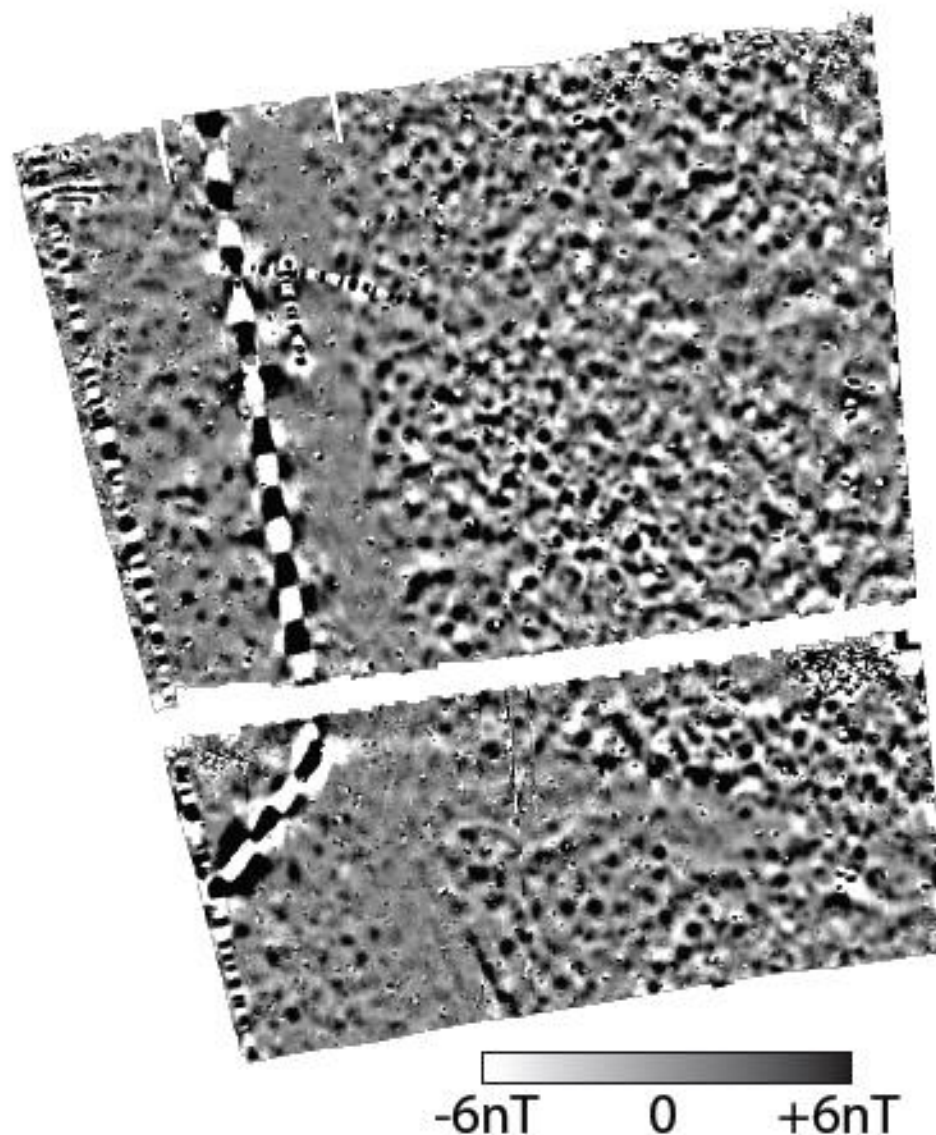
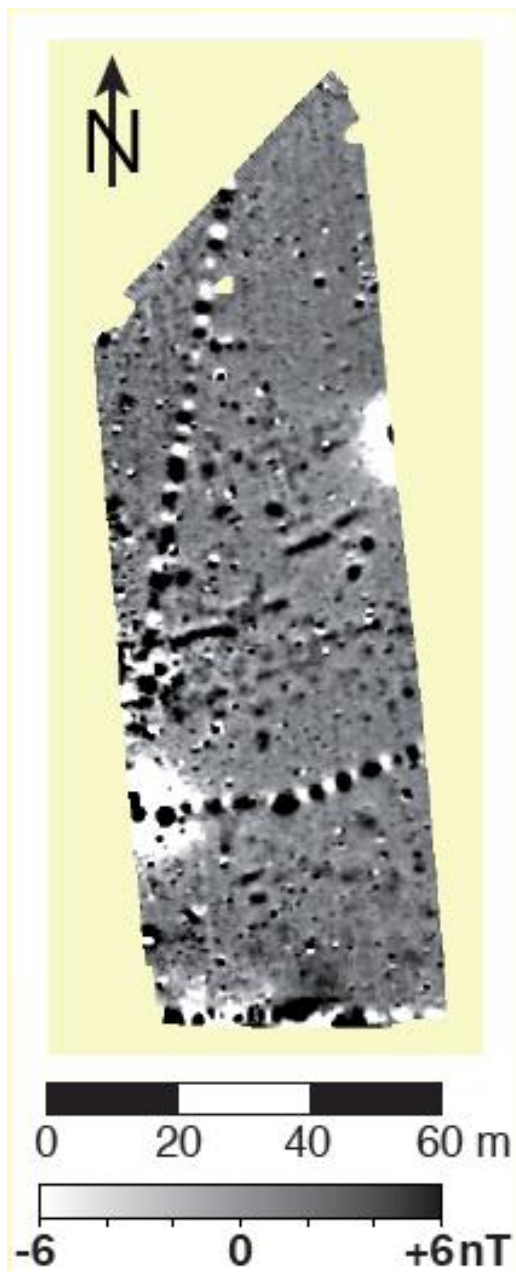


*graves, small
mounds?
(hroby, malé
mohyly?)*



ranno-stredoveké sídlisko, ostrov Witsum (severné memecko) (priekopy, zemlianky, domy)

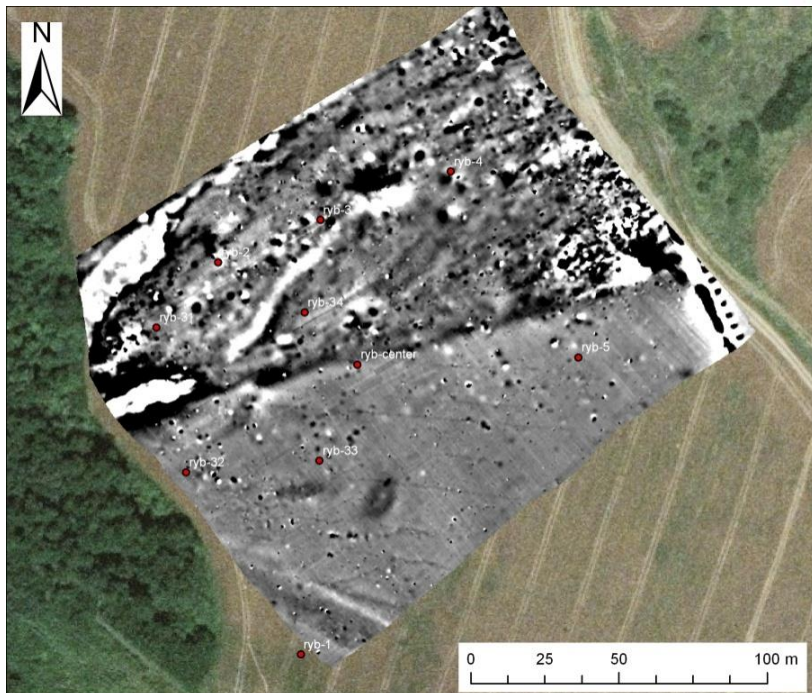
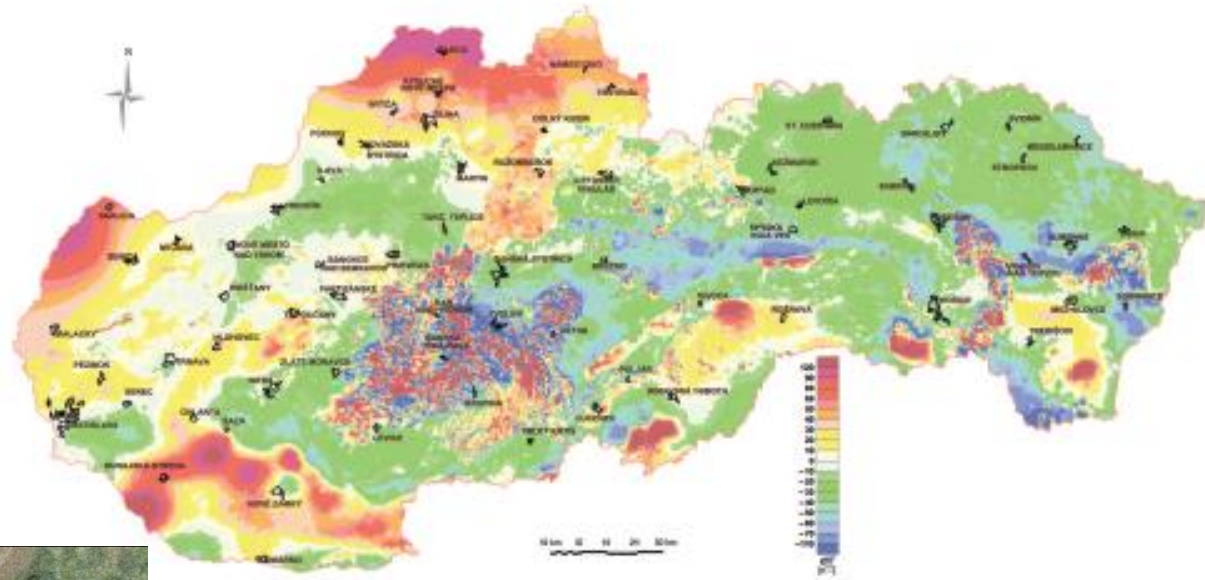
falošné anomálie (ocel'ové potrubia)



sekvencia po sebe idúcich dipólových anomálií

falošné anomálie (vplyv geologického podložia)

lokalita Rybník
(stredné Slovensko)



problém s vulkanickými
horninami (sú často magnetické),

(Štiavnické vrchy, Kremnické vrchy,
Poľana, Javorie, Vtáčnik, Pohronský
Inovec, Krupinská planina, Slanské
vrchy, Vihorlat)