

FYZIKÁLNÍ GEODÉZIE



Michal Šprlák

FYZIKÁLNÍ GEODÉZIE



**FAKULTA APLIKOVANÝCH VĚD
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI**

**KATEDRA
GEOMATIKY**

FYZIKÁLNÍ GEODÉZIE

Michal Šprlák

Recenzent: prof. Ing. Jan Kostecký, DrSc.

Grafický návrh obálky: Tereza Saitzová

Vydala: Západočeská univerzita v Plzni, Univerzitní 2732/8, 301 00 Plzeň

První vydání, 189 stran

Pořadové číslo: 2445, ediční číslo: 55-019-26

Plzeň 2026

ISBN 978-80-261-1356-0

ISBN 978-80-261-1355-3 (brožovaná vazba)

DOI <https://doi.org/10.24132/ZCU.2026.13560>

© Západočeská univerzita v Plzni, 2026

Předmluva

Gravitace je přírodní fenomén odrážející stav přitahujících se hmot a patří mezi čtyři základní fyzikální interakce. Její znalost je nezbytná například při: 1) definicích planetárních referenčních systémů pro určování polohy a předpovídání oběžných drah umělých družic v geodézii; 2) studiu vnitřního složení, podpovrchových procesů a tepelného vývoje planetárních těles v geofyzice a planetárních vědách; 3) monitorování transportu hmoty při pochopení klimatických změn v environmentálních vědách; 4) navigaci pozemních a vesmírných vozidel v dopravě, průzkumu vesmíru a vojenských operacích. Obecně gravitace napomáhá pokrokům vědy, průmyslu a výzkumu; a při řešení široké škály společenských problémů, jako je udržitelná energie, environmentální aspekty nebo rozvoj infrastruktury.

Disciplína zabývající se určováním makroskopických gravitačních polí se nazývá fyzikální geodézie. Tato je nedílnou součástí Mezinárodní asociace geodézie a oficiálně se považuje za jeden ze tří hlavních pilířů moderního geodetického výzkumu. Významnou pozici fyzikální geodézie také demonstruje nespočet vědců z jiných vědeckých a technických oborů, kteří pro své účely rutinně používají produkty ve formě statických a časově proměnných gravitačních polí. Tyto argumenty přirozeně motivují ke vzdělávání následujících generací studentů a výzkumníků v oblasti měření a modelování gravitačního pole. Je nezbytné jim poskytnout zdroje informací, například ve formě vhodného učebního textu.

Za standardní učebnici fyzikální geodézie, určenou zejména univerzitním studentům, se považuje monografie v anglickém jazyce (Heiskanen a Moritz, 1967), případně její revidované vydání (Hofmann–Wellenhopf a Moritz, 2006). Soubor pokročilých partií fyzikální geodézie, vhodný pro doktorandy a výzkumníky, byl publikován v (Moritz, 1989). Guo (2023) napsal momentálně nejaktuálnější učebnici o teoretických základech fyzikální geodézie v anglickém jazyce. V anglicko–jazyčné literatuře existuje množství geovědných a multidisciplinárních titulů, zejména monografií a příruček, které věnují gravitačnímu poli vybrané kapitoly, viz např. (Torge a Müller, 2012; Sansò a Sideris, 2013; Freeden a kol., 2015; Michel, 2022). V Česko–slovenském prostředí také vzniklo několik unikátních publikací z fyzikální geodézie. Za zmínku stojí klasické učebnice (Pick a kol., 1973; Burša, 1977; Burša a Pěč, 1988) nebo vysokoškolská skripta (Mojzeš, 1989; Janák a kol., 2006;

Zeman, 2008; Janák, 2010; Zeman, 2010).

Při výuce fyzikální geodézie je evidentně z čeho čerpat. Je však třeba si uvědomit, že uvedené zdroje nemusí reflektovat nejmodernější teoretické a technologické pokroky. Některé zdroje dokonce viditelně sledují výklad v klasické monografii (Heiskanen a Moritz, 1967), případně se obsáhle věnují tématům, která jsou v současnosti neaktuální až irelevantní. Tyto důvody a výsledky mé vlastní systematické vědecké práce přispěly ke vzniku nových skript, které právě čtete.

Předkládaný učební text sestává z dvanácti kapitol, které lze rozdělit do tří částí. Úvodní část v kapitole 1 představuje pojem „geodézie“, tak jak je chápán v pojetí Mezinárodní asociace geodézie. Kapitoly 2–4 jsou postupně zaměřeny na souřadnicové systémy; pole, diferenciální operátory a tenzory; a ortogonální systémy funkcí. Jejich účelem je představit základní symboliku, některé fundamentální pojmy a matematické funkce a je třeba je chápat jako druhou přípravnou část. Konkrétní problémy fyzikální geodézie jsou přebírány až ve třetí části v kapitolách 5–12. V těchto se postupně věnujeme řešení Laplaceovy rovnice, vybraným partiím teorie potenciálu, rozvoji gravitačního potenciálu a jeho vyšších derivací do řad harmonických funkcí, skutečnému tíhovému poli a jeho geometrii, normálnímu a poruchovému tíhovému poli, gravimetrii a výškám, a vnějším okrajovým úlohám. Obdobná struktura v pořadí motivace, nomenklatura a řešení problému je vlastní mému způsobu předávání informací, rutinně ji používám i při psaní odborných článků a zdá se být schůdná i pro čtenáře.

Zvolené partie fyzikální geodézie mohou být předmětem i jiných učebních textů uvedených výše. Tato skripta jsou však unikátní, a to nejen v Česko–slovenském prostředí, minimálně ze dvou důvodů. Za prvé je uvažována široká škála veličin gravitačního (tíhového) pole v podobě potenciálu, tří složek gradientu potenciálu a šesti složek tenzoru druhého stupně. Za druhé se uvedený matematický aparát neomezuje jen na symetrickou sférickou geometrii, ale je systematicky rozvíjen i pro mnohem komplikovanější geometrii rotačního elipsoidu.

Samotný obsah a způsob výkladu mohou být předmětem dalekosáhlé diskuse. Tyto aspekty nebyly zvoleny náhodně bez uvážení, naopak jsou výsledkem dlouhodobějšího procesu. První návrh tohoto učebního textu vznikl v roce 2020 pro potřeby výuky předmětu Matematická a fyzikální geodézie (v současnosti Fyzikální geodézie I) na Západočeské univerzitě v Plzni pro studenty navazujícího studia a do předkládané podoby se vykrytalizoval iterativně. O oprávněnosti zvoleného obsahu a způsobu výkladu, mě postupně přesvědčovaly i jiné skutečnosti. V průběhu let 2022–2025, po absolvování předmětů Matematická a fyzikální geodézie nebo Fyzikální geodézie I, bylo několik nejen nadaných studentů zapojených do řešení projektů základního výzkumu v oblasti modelování gravitačního pole. Všichni tito studenti byli schopni řešit komplexní úkoly a aktivně prezentovali výsledky své výzkumné činnosti na vědeckých sympoziích, v odborných publi-

kacích nebo v rámci závěrečných prací. Dovolím si tedy tvrdit, že předkládaný učební text opravdu může mít potenciál podat solidní základy předmětu fyzikální geodézie v přímé návaznosti na aktuální výzkumné problémy a výzvy.

Plzeň, duben 2026

Michal Šprlák

Poděkování

Rád bych poděkoval všem, kteří se přímo či nepřímo podíleli na této práci. Zejména bych rád vyjádřil poděkování všem svým mentorům, kolegům a studentům za nespočetné odborné diskuze a podněty. Děkuji Mgr. Jakubovi Pokornému z vydavatelství ZČU v Plzni za veškerou nakladatelskou práci spojenou s vydáním těchto skript. Prof. Ing. Jan Kostecký, DrSc. byl ochoten rukopis skript recenzovat. Úpřímně mu děkuji za čas strávený čtením textu a vypracování lektorského posudku. V neposlední řadě jsem vděčný své rodině za jejich neustálou psychickou podporu.

Seznam zkratek

BIH Bureau International de l'Heure

CHAMP Challenging Minisatellite Payload

CSR Center for Space Research

CTRS Conventional Terrestrial Reference System

DORIS Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite

ESA European Space Agency

ETRF European Terrestrial Reference Frame

ETRS89 European Terrestrial Reference System 89

EUREF Regional Reference Frame Sub-Commission for Europe

GFZ Helmholtz-Zentrum für Geoforschung

GGOS Global Geodetic Observing System

GLONASS Globalnaja navigacionnaja sputnikovaja sistěma

GNSS Global Navigation Satellite System

GOCE Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer

GPS Global Positioning System

GRACE Gravity Recovery and Climate Experiment

GRACE-FO GRACE Follow-On

GRAIL Gravity Recovery And Interior Laboratory

GRS Geodetic reference system

IAG International Association of Geodesy

ICGEM International Centre for Global Earth Models

ICRF International Celestial Reference Frame

ICRS International Celestial Reference System

IERS International Earth Rotation and Reference Systems Service

ISC International Science Council

ITRF International Terrestrial Reference Frame

ITRS International Terrestrial Reference System

IUGG International Union of Geodesy and Geophysics

LLR Lunar Laser Ranging

NASA National Aeronautics and Space Administration

NAVSAT Navy Navigation Satellite System

RCR Remove–Compute–Restore

SLR Satellite Laser Ranging

VLBI Very Long Baseline Interferometry

WGS World Geodetic System

Seznam obrázků

2.1	Kartézský souřadnicový systém v 3D	14
2.2	Globální a lokální sférické souřadnicové systémy	15
2.3	Polární souřadnicový systém na kouli	17
2.4	Globální a lokální Gaussovy elipsoidické souřadnicové systémy	19
2.5	Globální a lokální Jacobiho elipsoidické souřadnicové systémy	21
6.1	Geometrie Newtonova gravitačního zákona v skalárním tvaru	62
6.2	Geometrie Newtonova gravitačního zákona ve vektorové tvaru	62
6.3	Gravitační účinek reálného tělesa	63
6.4	Gravitační účinek bodové hmoty v Kartézském souřadnicovém systému v 3D	64
6.5	Směrová derivace gravitačního potenciálu	65
6.6	Bodová hmota m a výpočetní bod P v Kartézském souřadnicovém systému v 3D.	69
6.7	Plocha S a hmota s tloušťkou ζ	72
7.1	Obecné těleso a sférická geometrie	75
7.2	Nekonečně tenká vrstva a sférická geometrie	81
7.3	Obecné těleso a elipsoidická geometrie	84
7.4	Nekonečně tenká vrstva a elipsoidická geometrie	91
8.1	Gravitační, odstředivá a tíhová síla	94
8.2	Ekvipotenciální plochy a tížnice	97
8.3	Křivka v rovinném souřadnicovém systému	99
8.4	Ekvipotenciální plocha a tížnice v bodě P	100
8.5	Přirozený souřadnicový systém	103
9.1	Ekvipotenciální elipsoid	106
9.2	Definice výšky geoidu	115
9.3	Definice výškové anomálie	115
9.4	Vektory tíhového zrychlení v bodě P	116
9.5	Vektory tíhového zrychlení v bodech P_0 a Q_0	117
9.6	Vektory tíhového zrychlení v bodech P a Q	117

9.7	Tížnicová odchylka	118
9.8	Vztah mezi geoidem a tížnicovou odchylkou	120
10.1	Nesymetrický volný pád	125
10.2	Symetrický volný pád	126
10.3	Absolutní gravimetr FG5	128
10.4	Absolutní gravimetr A10	128
10.5	Translační princip	130
10.6	Rotační princip	130
10.7	Páková pružinová váha	131
10.8	Relativní gravimetr Scintrex CG-5	132
10.9	Relativní gravimetr Burris ZLS	132
10.10	Schéma supravodivého gravimetru	133
10.11	Supravodivý gravimetr v laboratoři	133
10.12	Schéma torzních vah	134
10.13	Torzní váhy	135
10.14	Družicová mise CHAMP	137
10.15	Družicová mise GRACE	138
10.16	Družicová mise GOCE	140
10.17	Koncept fyzikálních výšek	142
11.1	Obecné těleso a sférická geometrie	149
11.2	Obecné těleso a elipsoidická geometrie	161
12.1	Nomenklatura na sféře a její rozdělení na blízkou a vzdálenou zónu	173
12.2	Průběh integrálního jádra podle rovnice (11.54)	176
12.3	Průběh koeficientů vzdálených zón Q_n	176
12.4	Diskretizace blízké zóny	179
12.5	Průběh koeficientů vzdálených zón Q_n a $Q_n^{(M)}$	182

Seznam tabulek

3.1	Přehled elementárních veličin, diferenciálních operátorů a tenzoru druhého stupně ve sférických souřadnicích.	37
3.2	Přehled elementárních veličin, diferenciálních operátorů a tenzoru druhého stupně v Jacobiho elipsoidických souřadnicích.	41

Obsah

Předmluva	i
Poděkování	iv
Seznam zkratk	v
Seznam obrázků	vii
Seznam tabulek	ix
1 Geodézie – definice, náplň, historie, mezinárodní organizace, instituce a literatura	1
1.1 Definice a náplň geodézie	1
1.2 Historie geodézie	2
1.2.1 Země jako koule	3
1.2.2 Země jako rotační elipsoid	4
1.2.3 Země jako geoid a mezinárodní spolupráce	5
1.2.4 Geodézie v 3D	6
1.2.5 Geodézie v 4D	7
1.3 Mezinárodní vědecké organizace	7
1.3.1 International Science Council (ISC)	7
1.3.2 International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG)	8
1.3.3 International Association of Geodesy (IAG)	8
1.4 Národní geodetické instituce	11
1.5 Geodetická literatura	11
2 Souřadnicové systémy	13
2.1 Základní souřadnicové systémy	14
2.1.1 Kartézský souřadnicový systém v 3D	14
2.1.2 Globální sférický souřadnicový systém	15
2.1.3 Lokální sférický souřadnicový systém	16
2.1.4 Polární souřadnicový systém na kouli	17

2.1.5	Globální Gaussův elipsoidický souřadnicový systém	18
2.1.6	Lokální Gaussův elipsoidický souřadnicový systém	20
2.1.7	Globální Jacobiho elipsoidický souřadnicový systém	21
2.1.8	Lokální Jacobiho elipsoidický souřadnicový systém	22
2.2	Souřadnicové referenční systémy v geodézii	23
2.2.1	International Terrestrial Reference System (ITRS)	23
2.2.2	International Celestial Reference System (ICRS)	24
2.2.3	World Geodetic System (WGS)	25
2.2.4	European Terrestrial Reference System 89 (ETRS89)	25
2.2.5	Geodetic reference system (GRS)	25
3	Definice pole, diferenciální operátory a tenzory	27
3.1	Definice pole	27
3.2	Diferenciální operátory a tenzory v Kartézském souřadnicovém systému v 3D	28
3.2.1	Hamiltonův (del, nabla) operátor	28
3.2.2	Gradient	28
3.2.3	Divergence	29
3.2.4	Rotace	29
3.2.5	Laplaceův operátor	30
3.2.6	Tenzory	31
3.3	Obecnější tvar diferenciálních operátorů a tenzorů druhého stupně	32
3.4	Vyjádření elementárních veličin, diferenciálních operátorů a tenzoru druhého stupně ve sférických souřadnicích	34
3.5	Vyjádření elementárních veličin, diferenciálních operátorů a tenzoru druhého stupně v Jacobiho elipsoidických souřadnicích	37
3.6	Gradient a složky tenzoru druhého stupně v polárním systému na kouli	41
4	Ortogonální systémy v problémech modelování gravitačních polí planetárních těles	44
4.1	Legendreovy polynomy	44
4.1.1	Legendreovy polynomy 1. druhu a jejich vlastnosti	44
4.1.2	Legendreovy polynomy 2. druhu	46
4.2	Přidružené Legendreovy funkce	46
4.2.1	Přidružené Legendreovy funkce 1. druhu a jejich vlastnosti	46
4.2.2	Normované Legendreovy polynomy a normované přidružené Legendreovy funkce 1. druhu	48
4.2.3	Přidružené Legendreovy funkce 2. druhu	49

4.3	Plošné sférické harmonické funkce	49
4.3.1	Plošné sférické harmonické funkce a jejich vlastnosti	49
4.3.2	Normované plošné sférické harmonické funkce	50
4.4	Rozšíření pro plochu rotačního elipsoidu	51
5	Řešení Laplaceovy rovnice	54
5.1	Řešení Laplaceovy rovnice ve sférických souřadnicích	55
5.2	Řešení Laplaceovy rovnice v Jacobiho elipsoidických souřadnicích	58
6	Vybrané kapitoly z teorie potenciálu	62
6.1	Základní pojmy	62
6.2	Popis gravitačního pole gravitačním potenciálem	65
6.3	Vlastnosti gravitačního potenciálu bodové hmoty	67
6.4	Gravitační potenciál obecného tělesa a jeho vlastnosti	70
6.5	Gravitační potenciál nekonečně tenké vrstvy a jeho vlastnosti	71
7	Rozvoj gravitačního potenciálu a jeho derivací do řady harmonických funkcí	74
7.1	Rozvoj do řady sférických harmonických funkcí	74
7.1.1	Gravitační potenciál obecného tělesa	74
7.1.2	Gravitační potenciál obecného tělesa vně nejmenší Brillouinovy sféry	77
7.1.3	Gravitační potenciál nekonečně tenké vrstvy vně nejmenší Brillouinovy sféry	80
7.1.4	Určení povrchové hustoty ze znalosti gravitačního potenciálu vně nejmenší Brillouinovy sféry	82
7.2	Rozvoj do řady elipsoidických harmonických funkcí	84
7.2.1	Gravitační potenciál obecného tělesa	84
7.2.2	Gravitační potenciál obecného tělesa vně nejmenšího Brillouinova rotačního elipsoidu	87
7.2.3	Gravitační potenciál nekonečně tenké vrstvy vně nejmenšího Brillouinova rotačního elipsoidu	90
7.2.4	Určení povrchové hustoty ze znalosti gravitačního potenciálu vně nejmenšího Brillouinova rotačního elipsoidu	92
8	Skutečné tíhové pole a jeho geometrie	94
8.1	Skutečné tíhové pole	94
8.2	Ekvipotenciální (hladinové) plochy a tížnice	96
8.3	Křivost ekvipotenciálních ploch a tížnic	99
8.3.1	Křivost křivky	99

8.3.2	Křivost ekvipotenciální plochy	99
8.3.3	Křivost tížnice	101
8.4	Přirozený souřadnicový systém	103
9	Normální a poruchové tíhové pole	105
9.1	Normální tíhové pole	105
9.1.1	Normální tíhové pole ekvipotenciálního elipsoidu	105
9.1.2	Geodetic reference system 1980	113
9.2	Poruchové tíhové pole	114
9.2.1	Veličiny poruchového tíhového pole	114
9.2.2	Matematické vztahy mezi poruchovým potenciálem a ostatními veličinami poruchového tíhového pole	118
10	Gravimetrie a výšky používané v geodézii	123
10.1	Gravimetrie	123
10.1.1	Pozemní gravimetrie	124
10.1.2	Družicová gravimetrie	136
10.1.3	Gravimetrický referenční systém	141
10.2	O výškách používaných v geodézii	141
10.2.1	Elipsoidické výšky	146
10.2.2	Vertikální referenční systém a rámec	146
11	Vnější okrajové úlohy teorie potenciálu a jiné integrální transformace	148
11.1	Vnější okrajové úlohy a odvozené integrální transformace ve sférické apro- ximaci	149
11.1.1	Řešení vnější sférické Dirichletovy okrajové úlohy	150
11.1.2	Řešení vnější sférické Neumannovy okrajové úlohy	152
11.1.3	Řešení vnější sférické Stokesovy okrajové úlohy	154
11.1.4	Odvozené sférické integrální transformace	156
11.1.5	Uzavřené tvary izotropních integrálních jader	159
11.2	Vnější okrajové úlohy a odvozené integrální transformace v elipsoidické aproximaci	160
11.2.1	Řešení vnější elipsoidické Dirichletovy okrajové úlohy	162
11.2.2	Řešení vnější elipsoidické Neumannovy okrajové úlohy	164
11.2.3	Odvozené integrální transformace	166
12	Praktické aspekty numerického výpočtu veličin poruchového tíhového pole pomocí integrálních transformací	171
12.1	Rozklad globální integrace	172

12.1.1 Rozklad globální integrace v prostorové oblasti	172
12.1.2 Metoda Remove–Compute–Restore	177
12.2 Diskretizace integrálu pro výpočet vlivu blízkých zón	179
12.3 Modifikace integrálního jádra	180
12.4 Inverzní problém	183
Literatura	184

Kapitola 1

Geodézie – definice, náplň, historie, mezinárodní organizace, instituce a literatura

1.1 Definice a náplň geodézie

Geodézie je jedna z nejstarších vědních disciplín spolu s astronomií, fyzikou, geografii a matematikou. Název pochází z řečtiny ($\gamma\eta$ = Země, $\delta\alpha\iota\omega$ = Já dělím), což doslovně znamená dělení Země.

Z historického hlediska se náplň geodézie a její definice postupně modifikovaly. Klasickou definici uvedl významný německý geodet Friedrich Robert Helmert (1843 – 1917) ve znění (Helmert, 1880): „Geodézie je věda o měření a zobrazování zemského povrchu.“ Tuto definici geodézie můžeme pořád najít v učebních textech, nereflexuje však současnou náplň tohoto oboru. Terminologický slovník zeměměřičství a katastru nemovitostí uvádí komplexnější a novější definici ve znění: „Geodézie je přírodní věda, jedna z věd o Zemi, která pomocí geometrických a fyzikálních metod získává o Zemi údaje metrického a fyzikálního charakteru; je to současně technický obor, zjišťující geometrické údaje pro tvorbu map a pro potřeby jiných oborů.“ Podle definice Českého úřadu zeměměřického a katastrálního je tedy geodézie současně přírodní věda i technický obor. V terminologii jiných států se obvykle používají dva odlišné termíny pro označení přírodní vědy (angl. geodesy, něm. geodäsie) a technického oboru (angl. surveying, něm. vermessungswesen).

Terminologický slovník zeměměřičství a katastru nemovitostí dokonce obsahuje paradoxní definici zeměměřičství jako: „Souhrn geodetických, fotogrammetrických a kartografických činností včetně technických činností v katastru nemovitostí. Především v názvech institucí nahrazuje často termíny geodézie a kartografie.“ V dalším výkladu budeme postupovat v rozporu s Terminologickým slovníkem zeměměřičství a katastru nemo-

vitostí, přesto zcela logicky a v souladu se zvyklostmi v jiných státech. Konkrétně budeme používat pojem geodézie pro přírodní vědu a pojem zeměměřičství pro technický obor.

Pro takto specifikovanou přírodní vědu teď uvedeme pravděpodobně nejaktuálnější a nejobecnější definici: „Geodézie je vědní disciplína zabývající se měřením a reprezentací tvarů a gravitačních polí planetárních těles v trojrozměrném prostoru spolu s časovými změnami.“ Je důležité zdůraznit, že geodézie má jednoznačný předmět svého studia, vlastní terminologii a vlastní vědecké metody. Splňuje tedy požadavky vědy.

V literatuře se můžeme setkat s celou řadou přívlastků specifikujících určitou část geodézie, např. fyzikální geodézie, družicová geodézie, matematická geodézie, inženýrská geodézie, nižší geodézie, vyšší geodézie, tenzorová geodézie, polární geodézie, diferenciální geodézie, inerciální geodézie, a pod. Používání těchto přívlastků je dosti subjektivní a nemění náplň (základní funkce) geodézie, kterými jsou:

- polohování (určování polohy),
- gravitační pole,
- časové variace (polohy i gravitačního pole).

V následujících kapitolách se budeme zabývat zejména gravitačním polem, podrobným studiem kterého se zabývá právě fyzikální geodézie.

1.2 Historie geodézie

Historické kořeny geodézie (a také zeměměřičství) sahají až do časů prvních usedlostí a kmenů několik desítek tisíc let zpátky. Už tehdejší člověk čelil úloze lokalizace v prostoru při každodenním hledání potravy, výběru vhodného stanoviště pro usazení, nebo při sezonní migraci.

Z časů starověkých civilizací Egypta, Indie, Číny a Mezopotámie existuje málo přímých zmínek o geodézii. Bohaté dědictví těchto prvních moderních civilizací, jako např. monumentální stavby a kalendáře, jsou přinejmenším znakem znalosti orientace Země v prostoru. Budování zavlažovacích systémů a úpravy vodních toků prostřednictvím nivelace jsou důkazem respektování tíhového pole, dle kterého voda ve skutečnosti teče.

Ve starověkém Řecku se systematicky zabývalo určováním tvaru a rozměrů Země několik významných vzdělanců. V tomhle období také začneme historický výčet geodézie. Rozsáhlý materiál o geodetické historii lze najít např. v (Todhunter, 1873; Fischer, 1975; Smith, 1986).

1.2.1 Země jako koule

V minulosti převládaly různé názory na tvar Země. Táles (~625 – ~547 př.n.l.) si představoval Zemi jako disk plovoucí v nekonečném oceánu. Anaximander (~611 – ~545 př.n.l.) definoval tvar naší planety jako válec. Pythagoras (~580 – ~500 př.n.l.) a jeho škola navrhla kulovitý tvar Země. Do doby Aristotela (384 – 322 př.n.l.) byla tato aproximace obecně přijímána a dokonce zdůvodňována pozorováním. Pozorovatelé si všimli kruhového stínu Země v měsíčních zatměních a zřejmého stoupání přibližující se lodi na obzoru. V Číně byl sférický tvar Země uznán později v prvním století našeho letopočtu.

Eratosthenes (276 – 195 př.n.l.) byl první, kdo určil velikost poloměru sférické Země, a je často považován za zakladatele geodézie. Pro tento účel potřeboval poznat úhlovou odchylku mezi dvěma body na stejném poledníku a jejich vzájemnou vzdálenost. V době letního slunovratu změřil (pomocí slunečních paprsků) úhlovou odchylku o velikosti $7^{\circ} 12'$ mezi městy Syene (dnes Assuan) a Alexandrie. Pravděpodobně z egyptských katastrálních map odhadl vzdálenost mezi těmito městy na 5000 stadií (délková jednotka, podle egyptské normy rovná asi 158,7 m). Výsledný poloměr Země tedy mohl být ~6270 km.

Také Posidonius (135 – 51 př.n.l.) určil poloměr Země. Jeho odhad byl o několik desítek kilometrů menší než odhad Eratosthenův. Použil k tomu znalost přibližné vzdálenosti mezi Alexandrií a ostrovem Rhodos. Úhlovou odlehlost těchto bodů odhadl pozorováním hvězdy Canopus (zatímco se Canopus nacházel na horizontu na Rhodosu, v Alexandrii byla tato hvězda ve výšce $7^{\circ} 30'$ nad horizontem).

Klaudios Ptolemaios (~75 – ~151) zavedl geocentrický světový systém v publikacích o astronomii (s arabským názvem „Almagest“) a geografii („Geographike hyphegesis“). Tato díla zahrnovala katalogy hvězd, mapy a seznamy zeměpisných souřadnic mnoha míst.

Během středověku se geodézie (ale také jiné vědy) v Evropě nijak zvláště nerozvíjela kvůli převládající moci církve. Další experimenty na určení poloměru Země byly však vykonány také mimo evropský kontinent. Za zmínku stojí astronomické a geodetické měření v Číně, které provedly Nankung Yüeh a I-Hsing (kolem roku 725), a měření mezi Bagdádem a Al Raqqah pod vedením kalifa Al-Mamuna (kolem roku 827). V období renesance se pak Jean Fernel pokusil kolem roku 1525 určit poloměr Země měřením mezi Paříží a Amiens.

Pozdější pokroky v geodézii zásadně ovlivnil vynález dalekohledu v Nizozemsku (kolem roku 1600). Začala se vyvíjet optická zařízení na měření směrů (úhlů) a v měřičské praxi se stále více uplatňovala metoda triangulace. Ta se používala po více než 350 let až do příchodu elektronických dálkoměrů a umělých družic Země. První triangulační měření provedli Gemma Frisius (1508 – 1555) v Nizozemsku a Tycho Brahe (1546 – 1601) v Dánsku. Snellius (1580 – 1626) využil měření v triangulační síti (v letech 1614 – 1615)

mezi Bergen op Zoom a Alkmaar pro stanovení poloměru Země. Jean Picard (1620 – 1682) stanovil v letech 1669 – 1670 délku poledníkového oblouku měřením v triangulační síti mezi Malvoisine a Amiens a odpovídající poloměr Země na 6328,9 km. Tuto hodnotu poloměru Země použil i sám Isaac Newton (1642 – 1727) při formulaci svého gravitačního zákona.

1.2.2 Země jako rotační elipsoid

Nová astronomická pozorování a revoluční myšlenky ve fyzice v šestnáctém a sedmnáctém století měly zásadní vliv na vnímání tvaru Země a její pozice ve vesmíru. Nicolaus Copernicus (1473 – 1543) navrhl heliocentrický systém vesmíru, který předpokládal již Aristarchos (~310 – ~250 př.n.l.). Johannes Kepler (1571 – 1630) zformuloval zákony pohybu planet. Galileo Galilei (1564 – 1642) podal základy mechaniky experimentálním pozorováním padajících těles.

Zploštění Jupiteru na pólech pozoroval v roce 1666 Giovanni Domenico Cassini (1625 – 1712). Jean Richer (1630 – 1696) vykonával experimenty s kyvadlem v Paříži a v Cayenne ve Francouzské Guyaně téměř na rovníku. V Cayenne musela být délka kyvadla zkrácena, aby kmitalo se stejnou periodou jako v Paříži. Z tohoto pozorování a na základě zákona pohybu kyvadla lze vydedukovat nárůst tíže směrem k pólům. Podobný efekt také potvrdil Edmund Halley (1656 – 1742) při porovnání měření kyvadla na ostrově Svaté Heleny a v Londýně.

Isaac Newton na základě těchto pozorování a svojí teoretické práce o gravitaci a hydrostatice navrhl rotační elipsoid (zploštělý na pólech) jako adekvátní model Země. Také postuloval nárůst tíhového zrychlení od rovníku směrem k pólům. Obdobný model Země navrhl také Christian Huygens (1629 – 1695). Jacques Cassini (1677 – 1756) analyzoval starší stupňová měření a došel k závěru, že adekvátním tvarem Země je elipsoid prodloužený na pólech.

Rozpor mezi příznivci Newtona a Cassiniho se rozhodla vyřešit Francouzská akademie věd a zorganizovala dvě unikátní kampaně pro určení délky stupňových oblouků v rovníkové a polární oblasti. Pierre Louis Maupertuis (1698 – 1759) a Alexis Claude Clairaut (1713 – 1765) se zúčastnili expedice do Laponska v letech 1736 – 1737. Pierre Bouguer (1698 – 1758), Charles Marie de La Condamine (1701 – 1774) a Louis Godin (1704 – 1760) se podíleli na druhé expedici na území dnešního Ekvádoru v letech 1735 – 1744 (Ferreiro, 2013). Obě výpravy experimentálně potvrdili zploštění Země na pólech a potvrdili tak Newtonovu hypotézu tvaru naší planety.

Clairaut v roce 1743 našel matematický vztah mezi zploštěním a tíží. Tento teorém využil Pierre Simon de Laplace (1749 – 1827) a určil zploštění Země z pouhých patnácti tíhových měření. Výrazně přesnější určení zploštění Země bylo možné až s využitím

družicových metod.

Po akceptaci rotačního elipsoidu jako dostatečně výstižného tvaru Země se vykonávala celá řada stupňových měření. Z délky poledníkového oblouku byla také odvozená přirozená hodnota jednoho konvenčního metru v roce 1799. Akceptována byla až v roce 1875 mezinárodní dohodou na konferenci v Paříži.

Ve stejném časovém období byly také položeny teoretické základy modelování gravitačního pole. K tomu přispěly práce významných osobností světové vědy, jako např. Jean-Baptiste le Rond d'Alembert (1717 – 1783), Joseph Louis Lagrange (1736 – 1813), Pierre Simon de Laplace, Adrien-Marie Legendre (1752 – 1833), a později také Carl Friedrich Gauss (1777 – 1855) a George Green (1793 – 1841). George Gabriel Stokes (1819 – 1903) odvodil integrál, který transformuje tíhové měření na výšku geoidu.

1.2.3 Země jako geoid a mezinárodní spolupráce

Na začátku devatenáctého století (v roce 1806) Adrien-Marie Legendre a Carl Friedrich Gauss vyvinuli metodu nejmenších čtverců a, kromě jiných aplikací, ji použili při vyrovnání triangulačních sítí. V jejich i pozdějších vyrovnáních se výrazně projevil vliv úhlové odlehlosti skutečné tížnice a normály k elipsoidu. Vliv tížnicové odchylky vedl k přesnější definici tvaru Země. Carl Friedrich Gauss a Friedrich Wilhelm Bessel (1784 – 1846) striktně rozlišovali fyzický povrch Země, geoid jako matematickou plochu a rotační elipsoid jako plochu aproximující geoid. Friedrich Robert Helmert (1843 – 1917) systematicky shrnul veškeré poznatky o tvaru Země a jeho aproximacích (Helmert, 1880). Navzdory těmto nesrovnalostem se metoda triangulace nadále používala při určování rozměrů lokálních rotačních elipsoidů a pro tvorbu národních triangulačních sítí až do družicové éry. Kromě měření geometrického charakteru se také začala provádět pravidelná tíhová měření pomocí kyvadel.

Rozsah triangulačních sítí se výrazně zvětšoval. Historicky významná byla zejména měření mezi městy Göttingen a Altona (1821 – 1824); triangulace přes Velkou Británii, Francii, Španělsko a Alžírsko podél Pařížského poledníku; nebo tzv. Struveho triangulace (1816 – 1855) s počátkem v severním Norsku a koncem na pobřeží Černého moře. Propojování národních triangulací odstartovalo mezinárodní spolupráci a nakonec vedlo k založení Mezinárodní asociace geodézie, viz níže.

Přibližně od roku 1880 se budovaly národní vertikální výškové systémy, avšak nezávisle od systémů horizontálních. Nákladná a časově náročná měření se prováděla od zvolené střední hladiny moře, tzv. nulového bodu nivelační sítě.

Kromě mezinárodního standardu délky bylo nutné zavést systém světového času a nulový poledník pro definici zeměpisné délky. Na mezinárodní konferenci v roce 1884 v americkém Washingtonu D.C. byl přijat Greenwichský poledník jako výchozí a střední

sluneční den jako časová jednotka.

1.2.4 Geodézie v 3D

Myšlenka trojrozměrné geodézie spočívá ve společném vyrovnání úhlových, délkových a nivelačních měření v rámci jediného matematického modelu. Výsledkem jsou 3D souřadnice bodů. Tento přístup navrhl Ernst Heinrich Bruns (1848 – 1919). Praktická realizace byla ale značně omezená kvůli nezávislosti vertikálních a horizontálních sítí. Antonio Marussi (1908 – 1984) a Martin Hotine (1898 – 1968) později oživil tento přístup, navíc ale zakomponovali geometrii tíhového pole. Mikhail Sergeevich Molodenskii (1909 – 1991) ukázal, že fyzický povrch Země a vnější gravitační pole lze určit pouze z povrchových měření a bez jakéhokoliv použití geoidu.

První elektronické dálkoměry se začaly používat v padesátých letech dvacátého století. Způsobily revoluční automatizaci měřičských postupů, zejména v zeměměřičství. V roce 1957 byla vypuštěna první umělá družice Země Sputnik 1. Český astronom a geodet Emil Buchar (1901 – 1979) odhadl z vizuálních pozorování družic Sputnik 1 a 2 zploštění Země. Umělé družice obíhající kolem naší planety otevřeli éru realizace globálních geocentrických 3D referenčních systémů.

Primárně pro vojenské účely byly v osmdesátých letech vybudované komplexní družicové systémy na určování polohy, a to GPS (Global Positioning System) a GLO-NASS (Globalnaja navigacionnaja sputnikovaja sistema). Množina existujících systémů na určení polohy je dnes známá pod zkratkou GNSS (Global Navigation Satellite System). Kromě GNSS se také vyvinuly, na základě technologických pokroků, i jiné prostorové techniky známé jako DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite), LLR (Lunar Laser Ranging), SLR (Satellite Laser Ranging) a VLBI (Very Long Baseline Interferometry). Jednou z výzev geodézie se stala transformace mezi moderními referenčními rámci a rámci klasickými.

Geodetická komunita dosáhla výrazných pokroků i v problematice modelování gravitačního pole Země. Výzkum v této oblasti byl často teoretického charakteru z důvodu utajení nebo nedostupnosti tíhových měření. Odvozené modely gravitačního pole Země byly značně nehomogenní a jejich využití dosti omezené. Revoluce v tomto směru přišla po roce 2000, kdy byly postupně vypuštěny čtyři družicové mise známé pod zkratkami CHAMP (Challenging Minisatellite Payload, 2000 – 2010), GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment, 2002 – 2017), GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer, 2009 – 2013) a GRACE-FO (GRACE Follow-On, 2018 – současnost).

1.2.5 Geodézie v 4D

Počátky čtyřrozměrné geodézie sahají do konce devatenáctého století. Karl Friedrich Küstner (1856 – 1936) v letech 1884 – 1885 vysvětlil změnu zeměpisné šířky pozorované hvězdy jako pohyb zemského pólu. Ernst von Rebeur-Paschwitz (1861 – 1895) pozoroval v letech 1889 – 1893 vliv slapů při měření tíže kyvadlem. Ve Skandinávii započali přesnou nivelaci a registraci hladiny moří na mareografech kolem roku 1880. Cílem těchto měření bylo určení postglaciálního zdvihu. V Japonsku a USA se po více jak 100 let monitorují deformace zemské kůry způsobené seismickou činností.

V současnosti jsou změny rotace Země a pohyby tektonických desek pravidelně monitorovány pomocí prostorových observačních technik. Na rozhraní tektonických desek a v okolí vulkánů byly stabilizovány lokální monitorovací sítě. Variace globálního gravitačního pole byly v letech 2002 – 2017 měřeny družicovou misí GRACE, a od roku 2018 je monitoruje mise GRACE-FO. Lokální změny gravitačního pole se detekují kontinuálním měřením supravodivých gravimetrů.

Na celém světě se dnes vyvíjí velké úsilí k pochopení dynamiky systému Země a procesů globálních změn. Geodézie k této snaze nezastupitelně přispívá svou infrastrukturou, která se označuje jako GGOS (Global Geodetic Observing System).

1.3 Mezinárodní vědecké organizace

1.3.1 International Science Council (ISC)

Mezinárodní rada pro vědu je nevládní organizace, která zastřešuje vědecké orgány (asociace, unie, a pod.) v sociálních a přírodních vědách. ISC byla založena dne 4. července 2018 spojením dvou předchozích organizací, a to: International Council for Science a International Social Science Council.

ISC svolává a mobilizuje mezinárodní vědeckou komunitu v otázkách zásadního vědeckého a veřejného významu. Její činnost se zaměřuje na:

- Podporu mezinárodního vědeckého výzkumu a podporu komunikace vědy, která je relevantní pro otázky mezinárodní politiky,
- Podporu schopnosti vědy přispívat k řešení zásadních problémů,
- Ochranu svobodné a odpovědné praxe vědy.

ISC se podílí na sponzorování mezinárodních výzkumných programů, sítí a výborů. K začátku roku 2026 měla ISC přes 250 členských organizací. To zahrnuje 40 mezinárodních vědeckých unií a asociací, přes 140 národních a regionálních vědeckých organizací a více než 20 přidružených členů.

Vážení čtenáři, právě jste dočetli ukázkou z knihy ***Fyzikální geodézie***.
Pokud se Vám ukázka líbila, na našem webu si můžete zakoupit celou knihu.