kroky výpočtu Bouguerovej anomálie
(tzv. korekcie/redukcie)

$$\Delta g_B = g - g_n + 0.3086h - 0.0419h\rho - B + T$$

g – namerané tiažové zrýchlenie (opravené o slapy a chod, prepočítané na absolútne hodnoty)

g_n – normálne pole (tiažový účinok elipsoidu)

0.3086h – tzv. Fayeova korekcia (redukcia) = = korekcia (redukcia) "vo voľnom vzduchu"

0.0419hρ – účinok rovinnej nekonečnej (Bouguerovej) dosky, tzv. Bouguerova korekcia (redukcia)

B – Bullardov člen: oprava účinku rovinnej dosky na účinok sférickej orezanej dosky (do vzdialenosti 166.735 km od bodu výpočtu)

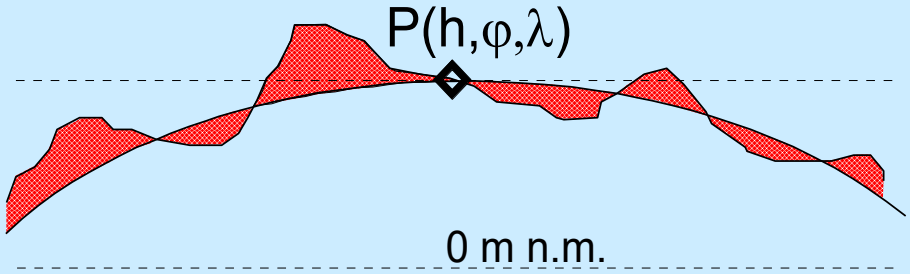
T – terénne korekcie (do vzdialenosti 166.735 km)

ρ – tzv. korekčná (redukčná) hustota, často 2.67 $g.cm^{-3}$

h – nadmorská výška výpočtového bodu

kroky výpočtu Bouguerovej anomálie
(tzv. korekcie/redukcie)

terénne korekcie



terénne korekcie “ošetrujú“ dva dôležité prípady:

1. treba doplniť (pripočítať) gravitačný účinok výplní dolín, ktorý bol odrátaný pri odrátaní sférickej Bouguerovej dosky (rovinnej Boug. dosky a Bullard člena),
2. treba pripočítať gravitačný účinok kopcov, ktoré vo väčšine prípadov svojimi hmotami nad úrovňou bodu znižujú meranú tiaž (čiže ich vypočítaný účinok by mal mať kladné znamienko); pri “zanorených“ kopcoch pod úroveň výšky meraného bodu ich účinok však bude mať opačné znamienko – záporné, takže pre menšie nadmorské výšky výpočtových bodov môžeme získať aj záporné hodnoty terénnych korekcií

základný princíp výpočtu terénnych korekcií

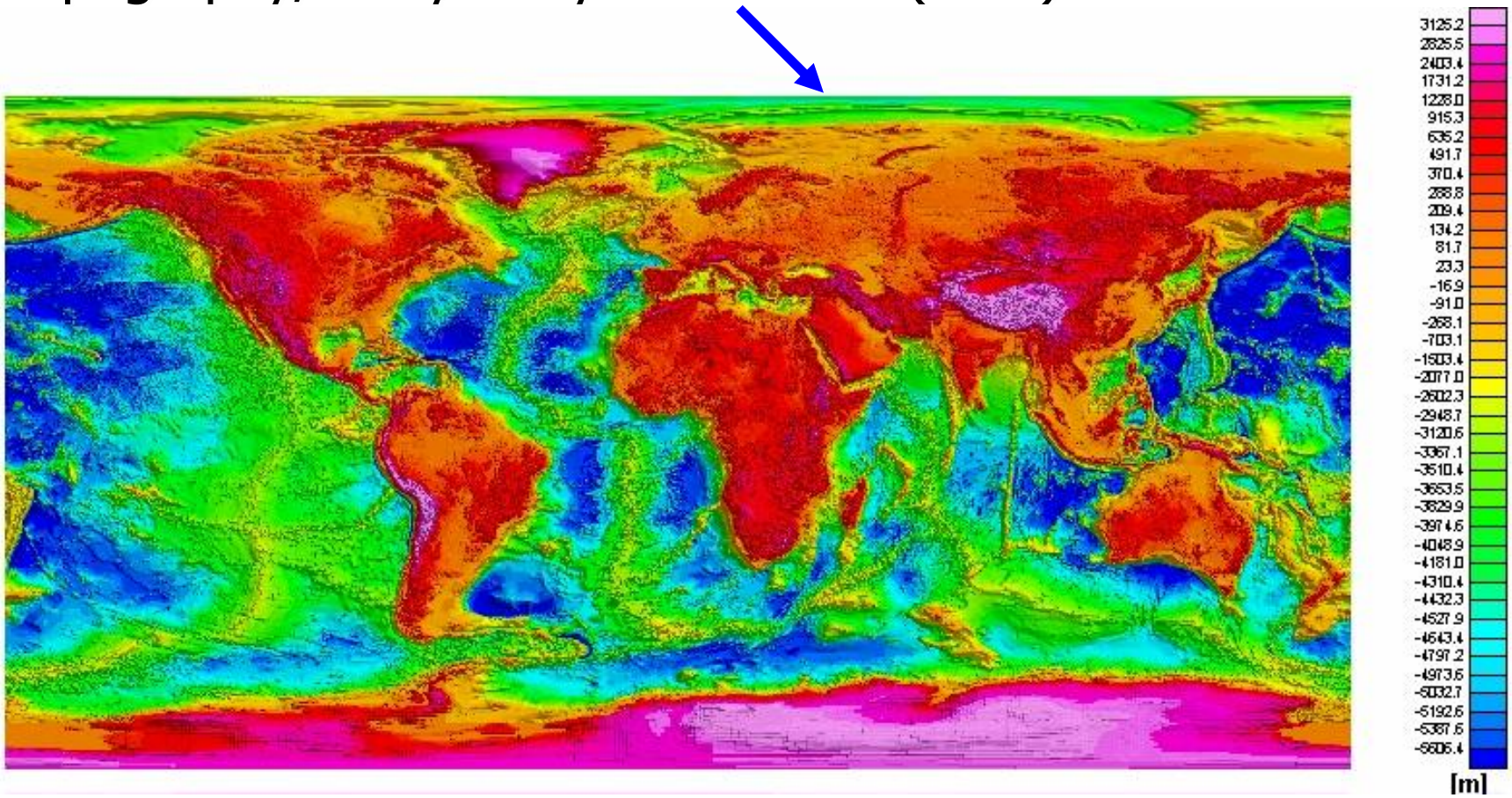
- reliéf (terén) v okolí výpočtového bodu sa nahradí *jednoduchými geometrickými útvarmi*, ktorých gravitačný účinok sa sumuje,
- základné sú 4 veci:
    a) použitý elementárny geometrický útvar,
    b) usporiadanie týchto útvarov v okolí bodu (do zón, oblastí),
    c) získanie výškovej informácie o reliéfe,
    d) ošetrenie zakrivenia povrchu Zeme.

staršie spôsoby pokladali na okolie bodu v mape paletku a z tabuliek sa odčítali hodnoty gravitačných účinkov zodpovedajúcich segmentov a tie sa spočítavali (na kalkulačke), segmenty boli buď rovinné (časti valca) alebo sférické (segmenty sférickej vrstvy)

novšie spôsoby pracujú s digitálnymi modelmi terénu (DEM) a výpočty sa realizujú na počítačoch; opäť môžu byť základné prvky rovinného alebo sférického tvaru

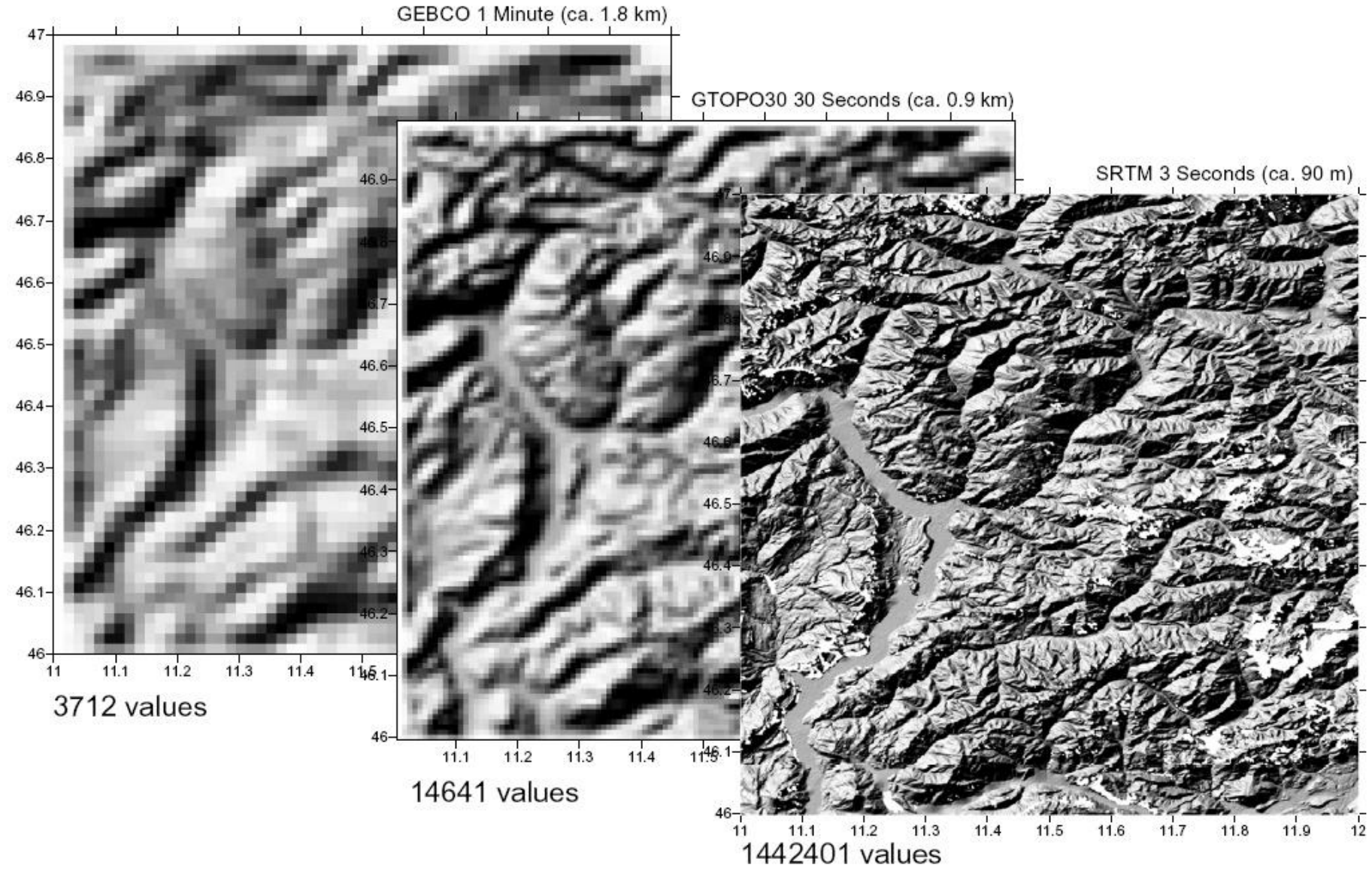
- nezávislý spôsob: využitie Fourierovej transformácie výškovej informácie

verejne dostupné digitálne modely terénu na nete:
(Digital Elevation Models - DEM):
topography – SRTM (2”x2”)
topography – GTOPO30 (30”x30”)
topography/bathymetry – ETOPO5 (5’x5’)



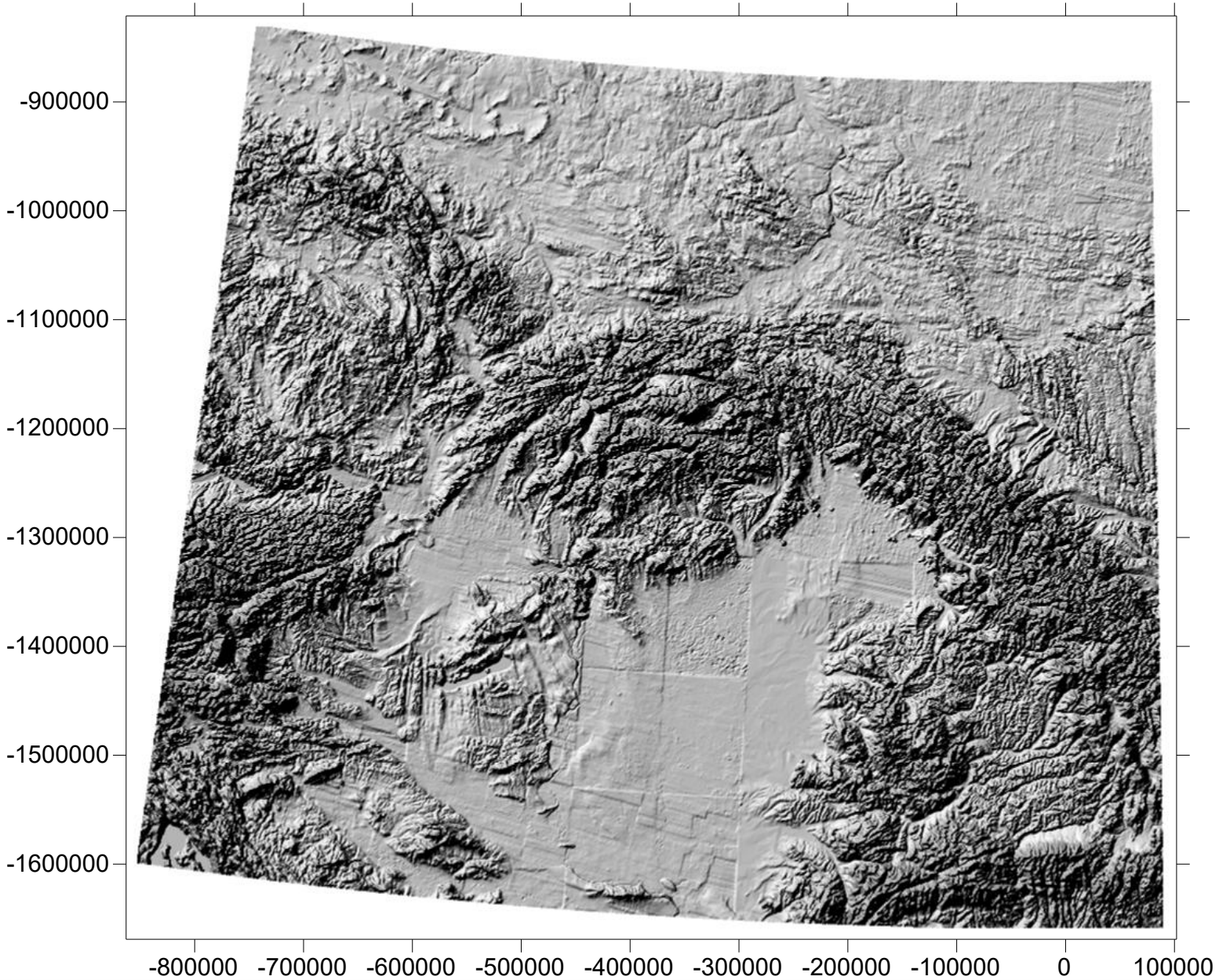
v súčasnosti najpresnejšie DEM: z technológie LiDAR

príklady rôznych DTM (s rôznou detailnosťou)



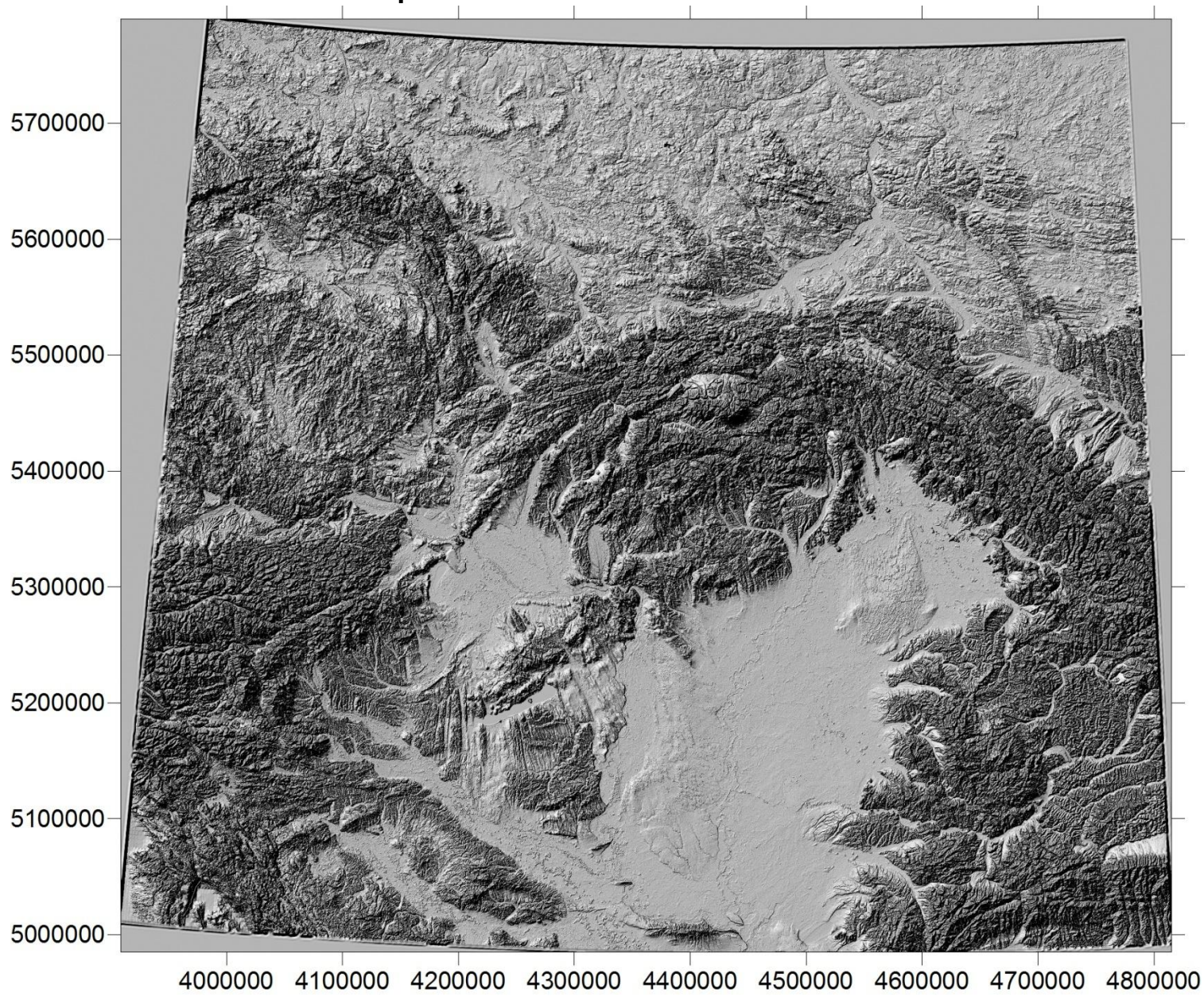
topography – GTOPO30 (30″ x 30″)

príklad - stredná Európa



topography – SRTM (2″ x 2″)

príklad - stredná Európa



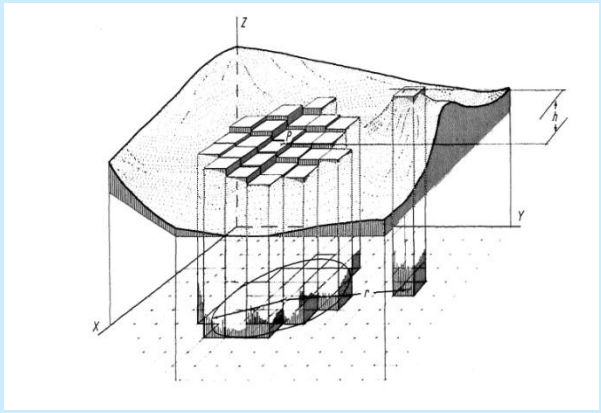
základný princíp výpočtu terénnych korekcií

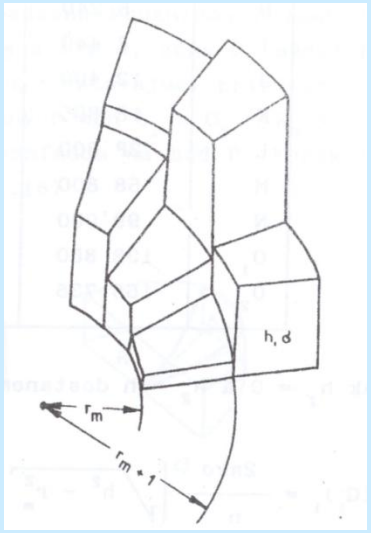
a) použitý elementárny geometrický útvar,

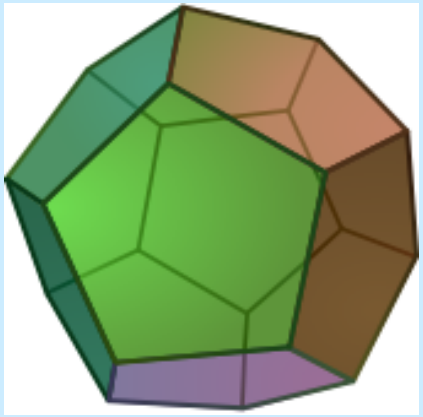
<u>rovinná aproximácia:</u>

pravohlé hranoly, segmenty valca

3D mnohosteny (polyédre)

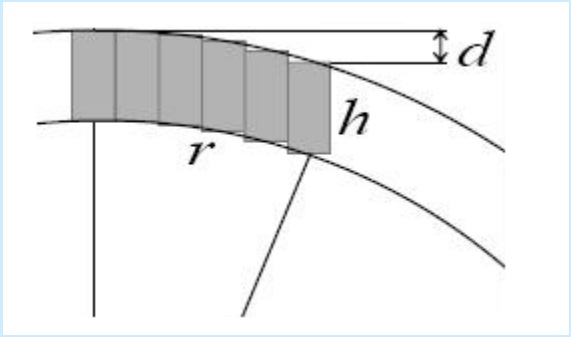


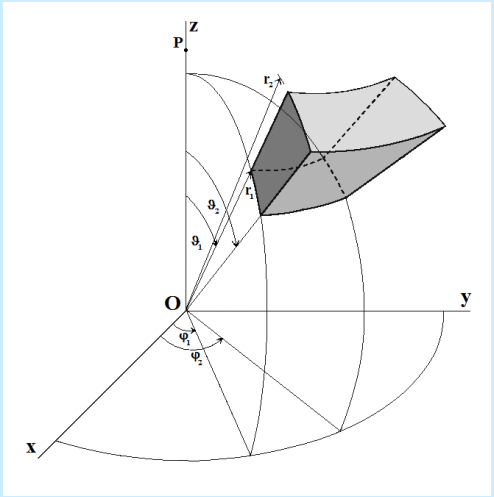




<u>sférická aproximácia:</u>

zanorené hranoly, segmenty sférickej vrstvy

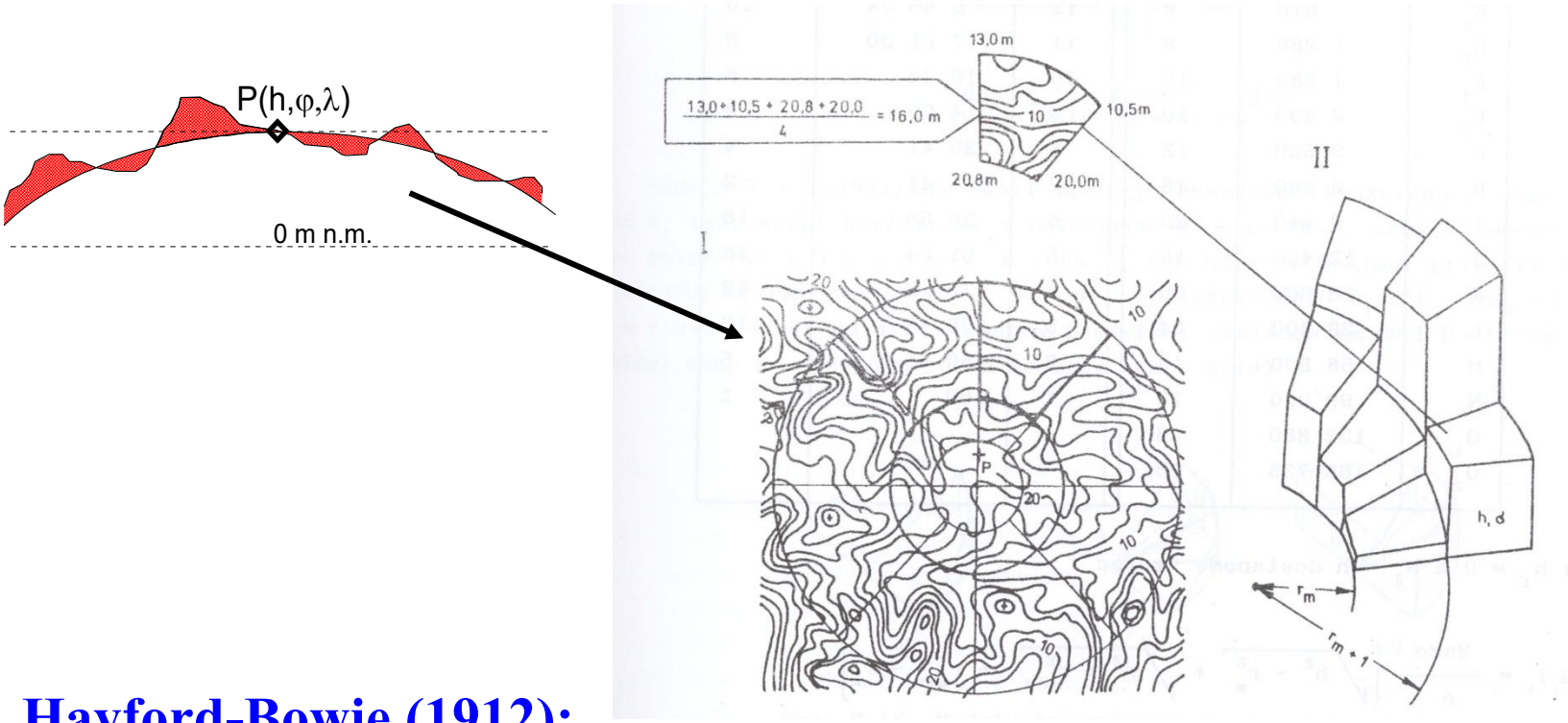




rôzne spôsoby výpočtu terénnych korekcií

- klasický spôsob napĺňania sektorov paletky (Hayford-Bowie, 1912; Hammer, 1939)
- starší spôsob – Československá škola (Pick, Pícha, Vyskočil, 1960, 1973)
- "novší" spôsob, zadefinovaný v projekte „Atlas geofyzikálnych máp a profilov" (Grand, Šefara, Pašteka, Bielik, Daniel, 2001)
- súčasný spôsob (u nás) , zadefinovaný v projekte „Bouguer_NG" – program Toposk (Marušiak a kol., 2012) – kombinácia rôznych prístupov
- komerčne používaný spôsobo – softvérový balík Geosoft Oasis Monaj, modul Gravity &Terrain corrections
- spôsob, používaný v Rakúsku

klasický spôsob delenia okolia bodu – Hayford-Bowie (1912), Hammer (1939) - paletková (sektorová) metóda



Hayford-Bowie (1912):
okolie bodu je rozdelené na prstencové zóny a tie na viaceré sektory (sú to vlastne segmenty sférickej vrstvy)

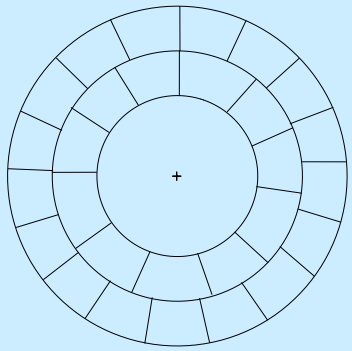
označené písmenami abecedy A až O_2 (po uhol $\theta \approx 1.5^o$)
a ďalej číslami od 18 po 1 (od uhlu $\theta \approx 1.5^o$ po 180^o)

klasický spôsob delenia okolia bodu – Hayford-Bowie (1912)

Table 1.

Radii of Hayford's zones.

Zone	Outer radius	No. of sectors	Zone	Outer radius	No. of sectors
A	2 m	1	18	1°41′13″	1
B	68	4	17	1 54 52	1
C_1	130	4	16	2 11 53	1
C_2	230	4	15	2 33 36	1
D_1	380	6	14	3 03 05	1
D_2	590	6	13	4 19 13	16
E_1	870	8	12	5 46 34	10
E_2	1 280	8	11	7 51 30	8
F_1	1 680	10	10	10 44	6
F_2	2 290	10	9	14 09	4
G	3 520	12	8	20 41	4
H	5 240	16	7	26 41	2
I	8 440	20	6	35 58	18
J	12 400	16	5	51 04	16
K	18 800	20	4	72 13	12
L	28 800	24	3	105 48	10
M	58 800	14	2	150 56	6
N	99 000	16	1	180	1
O_1	132 850	28			
O_2	166 735	28			



tabuľka č.2.3: (str. 30 skript)

- označenie zóny,
  vonkajší polomer (v metroch a ďalej v stupňoch),
  počet sektorov

starší spôsob zavádzania terénnych korekcií v bývalom Československu, Pick, Pícha, Vyskočil (1960)

do roku 1983

blízka a vzdialená zóna: $T_{5.24km}$ a $T_{166.735km}$

manuálne výpočty pomocou máp a paletiek

($T_{5.24km}$: mapy v 1:25 000, neskôr 1:10 000)

($T_{166.735km}$: špeciálne mapy v 1:200 000 + nomogramy)

po roku 1983

blízka, stredná a vzdialená zóna: T_{250m} , $T_{5.24km}$ a $T_{166.735km}$

označované ďalej ako T_1 , T_2 a T_3

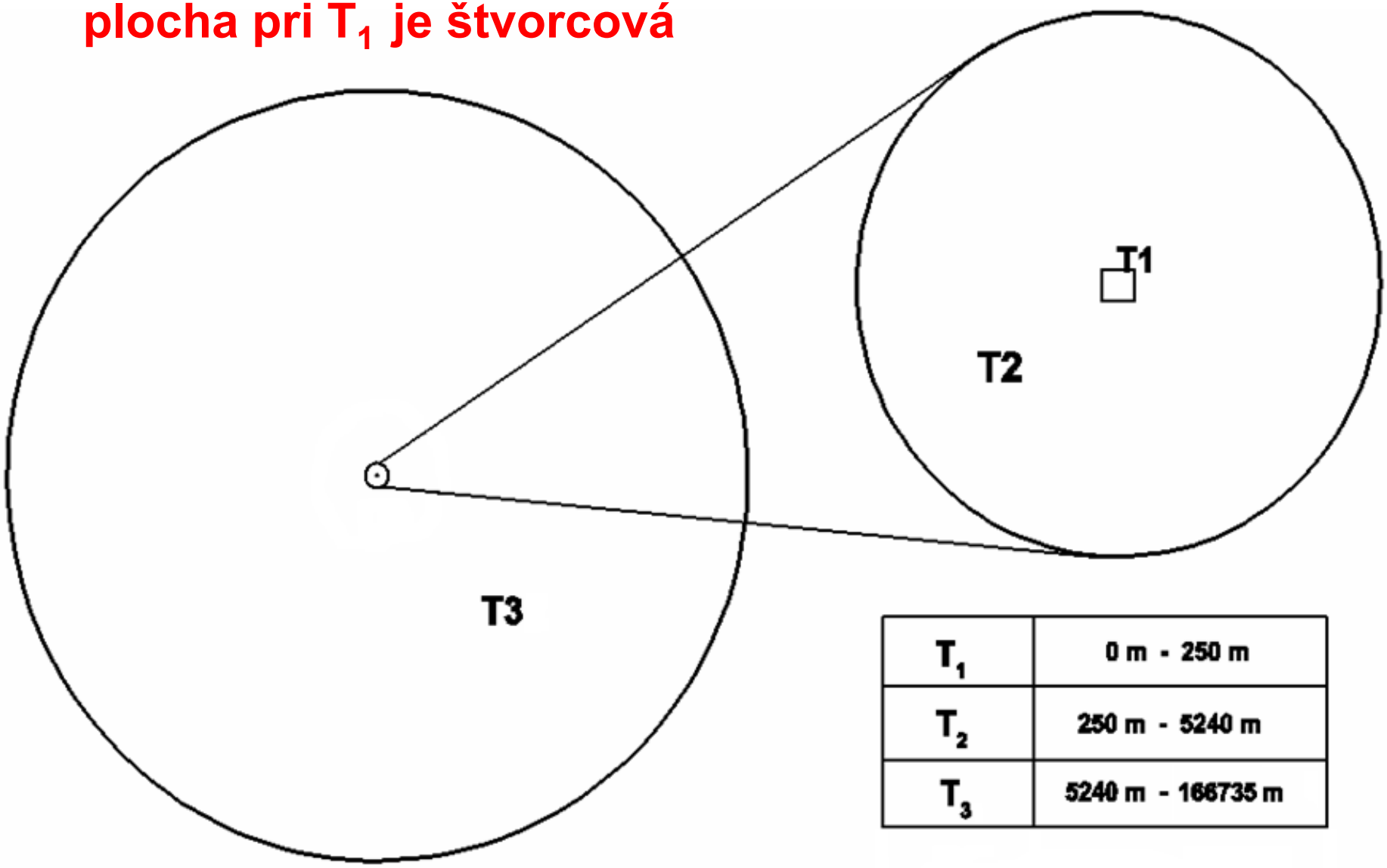
T_1 : ručne – paletkami

T_2 : počítačovo (sieť 100x100m prav. hranoly)

T_3 : ručne - špeciálne mapy v 1:200 000 + nomogramy

rozdelenie okolia výpočtového bodu na jednotlivé zóny

plocha pri T_1 je štvorcová



T_1	0 m - 250 m
T_2	250 m - 5240 m
T_3	5240 m - 166735 m

starší spôsob zavádzania terénnych korekcií v bývalom Československu, Pick, Pícha, Vyskočil (1960)

T_1 – špeciálne paletky, prvé 2 zóny Hayford-Bowieho paletky sú zlúčené spolu (A-B) a v tabuľke (str. 32, skriptá) sa nájde hodnota podľa typu terénu (pravidelné svahy, nepravidelné svahy a vyduté tvary-kopy, sedlá, doliny – obr. 2.16 na str. 31 v skriptách)

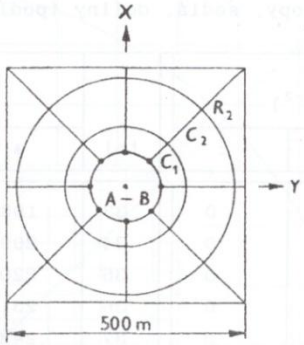
T_2 – počítačovo (zväčšujú sa rozmery pravouhlých hranolov 100x100m, 300x300m, 700x700m – obr. 2.17, str. 33 v skr.)

T_3 – špeciálny spôsob:

$T_3 = F(\varphi,\lambda) + f(h)$,
$F(\varphi,\lambda)$ - plošne závislá zložka (mapy v M 1:200 000)
$f(h)$ - výškovo závislá zložka (grafy, nomogramy)

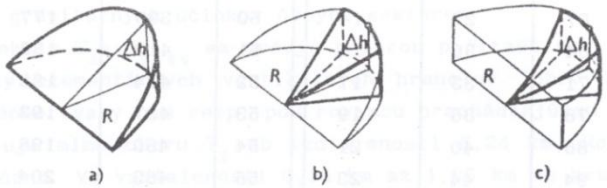
T_1 - starší spôsob zavádzania terénnych korekcií v bývalom Československu, Pick, Pícha, Vyskočil (1973)

T_1 – špeciálne paletky, prvé 2 zóny Hayford-Bowieho paletky sú zlúčené spolu (A-B) a v tabuľke (str. 32, skriptá) sa nájde hodnota podľa typu terénu (pravidelné svahy, nepravidelné svahy a vyduté tvary-kopy, sedlá, doliny – obr. 2.16 na str. 31 v skriptách)



Obr. 2.15 Zóna T1 a jej rozdelenie na sektory.

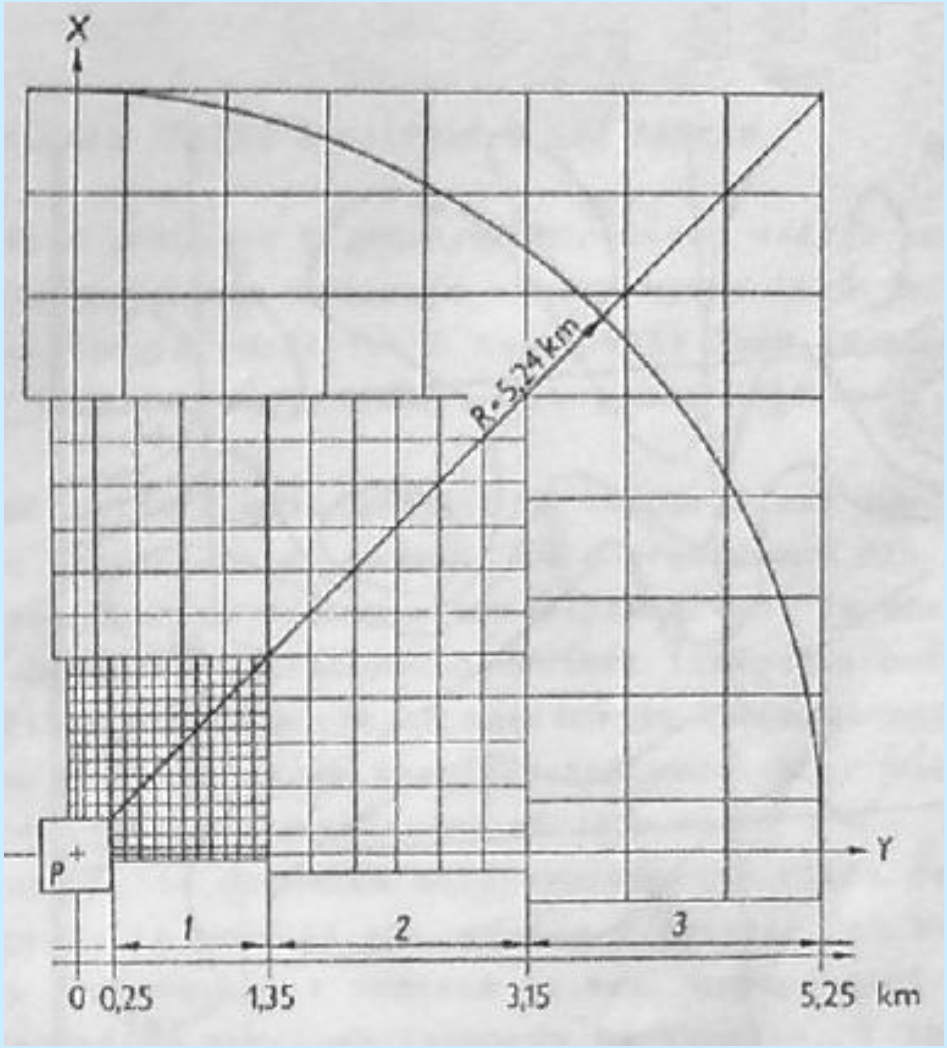
Zóna A-B v najbližšom okolí bodu je obmedzená kružnicou polomeru 68 m, zóna C_1 leží medzi kružnicami s polomerom 68 m a 130 m, zóna C_2 medzi kružnicami polomerov 130 m a 230 m, a zóna R_2 vypĺňuje ostávajúci priestor štvorca. Gravitačné účinky jednotlivých sektorov prílušných zón C_1 a C_2 , R_2 sú tabelované v závislosti na ich strednom prevýšení vzhľadom na bod P. Korekcie centrálnej zóny sa určujú pomocou modelov (obr. 2.16).



Obr. 2.16 Modely pre výpočet terénnej korekcie.

T_1 - starší spôsob zavádzania terénnych korekcií v bývalom Československu, Pick, Pícha, Vyskočil (1973)

T_2 – počítačovo (zväčšujú sa rozmery pravouhlých hranolov 100x100m, 300x300m, 700x700m – obr. 2.17, str. 33 v skr.)

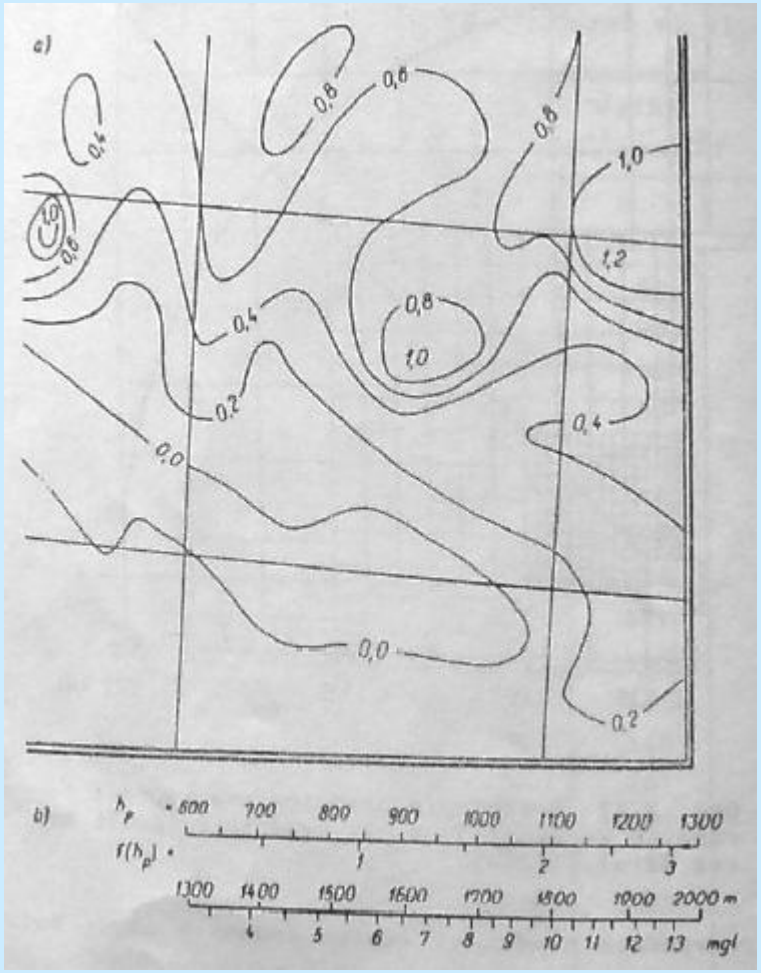


T_1 - starší spôsob zavádzania terénnych korekcií v bývalom Československu, Pick, Pícha, Vyskočil (1973)

T_3 – špeciálny spôsob: $T_3 = F(\varphi,\lambda) + f(h)$,

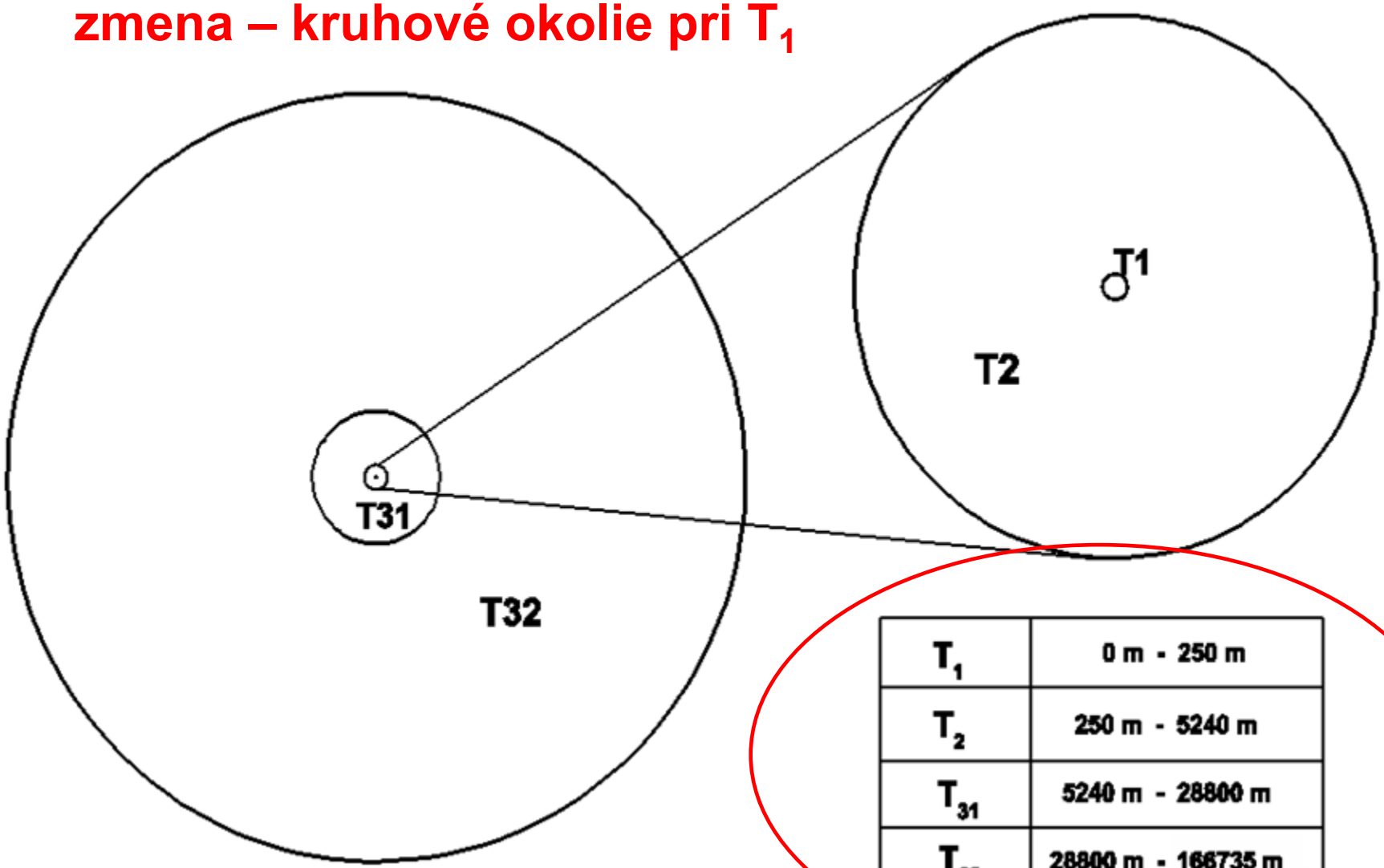
$F(\varphi,\lambda)$ - plošne závislá zložka (mapy v M 1:200 000)

$f(h)$ - výškovo závislá zložka (grafy, nomogramy)



rozdelenie okolia výpočtového bodu na jednotlivé zóny (prístup v rámci projektu „Atlas geof….“), 2001

zmena – kruhové okolie pri T_1

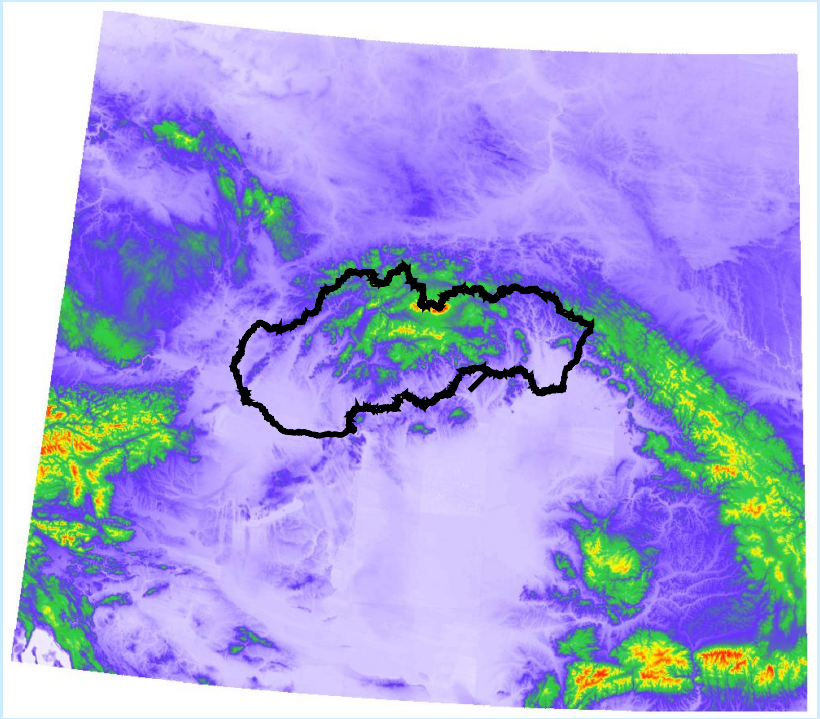


T_1	0 m - 250 m
T_2	250 m - 5240 m
T_{31}	5240 m - 28800 m
T_{32}	28800 m - 166735 m

všetko počítané už pomocou DEM

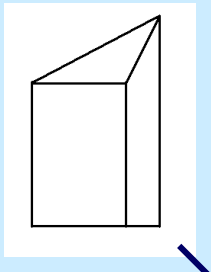
použité elementárne útvary a ich rozmery

zóna	rozmer bunky gridu		element. blok	použitý zdroj DEM
T1	20 m x 20 m		trojuh. hranol	DTM 1:50 000
T2	50 m x 50 m		pravouhl. hranol	DTM 1:50 000
T31	250 m x 250 m	zanor.	pravouhl. hranol	DTM 1:50 000
T32	1000 m x 1000 m	zanor.	pravouhl. hranol	GTOPO 30”x30”

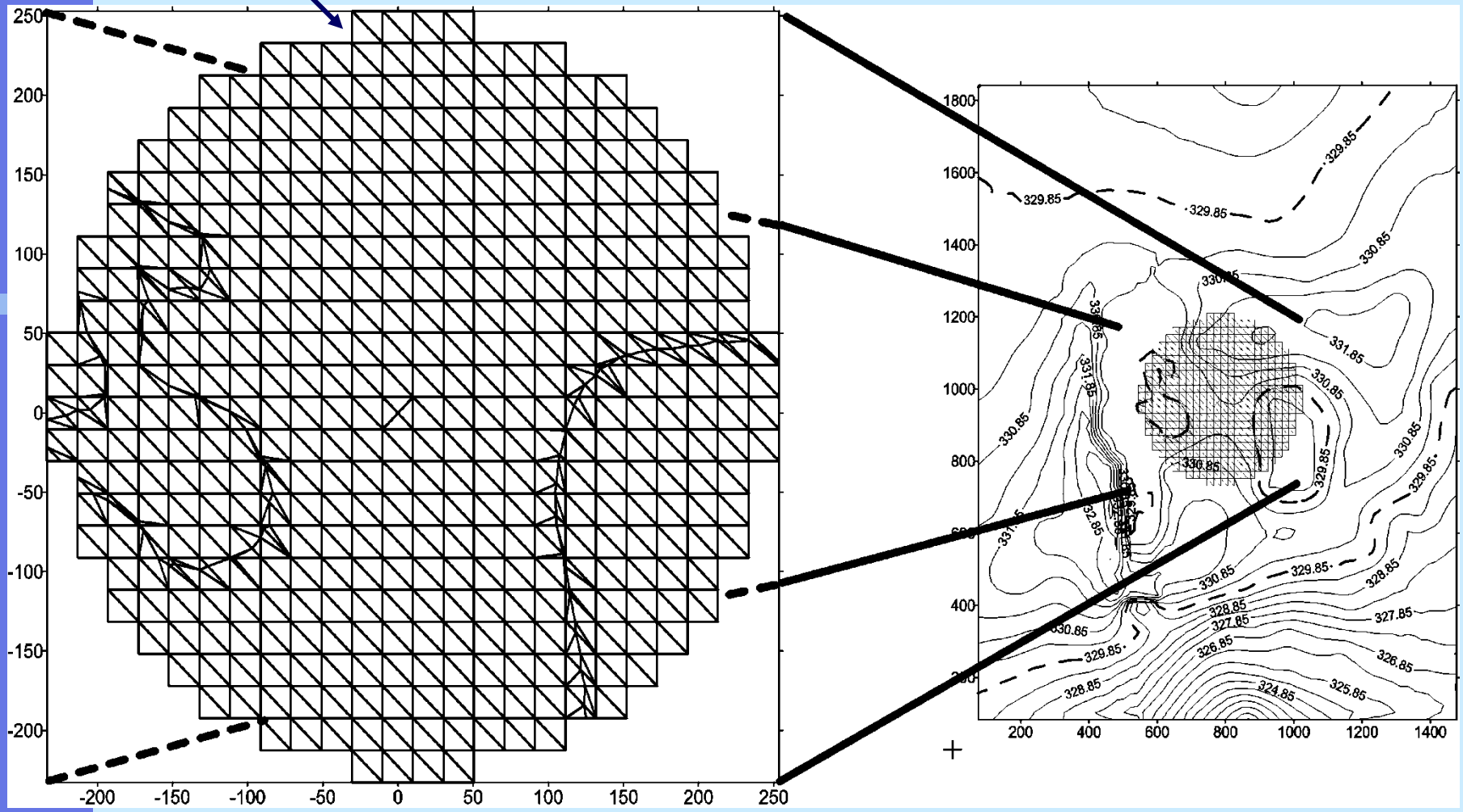


všetko počítané už pomocou DEM

spôsob „Atlas geof….“), 2001

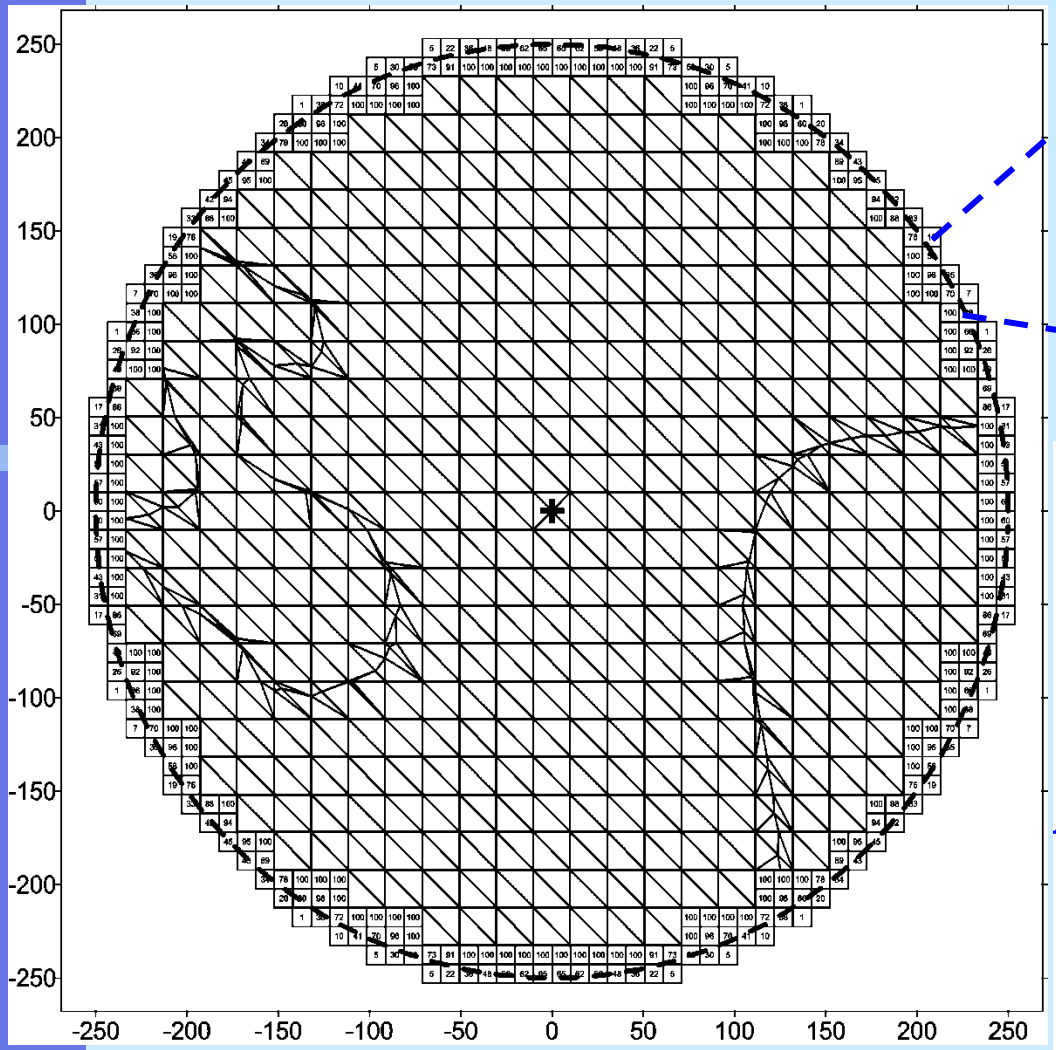


rozdelenie najbližšieho okolia výpočtového bodu (T1) na vertikálne hranoly s trojuholníkovou podstavou

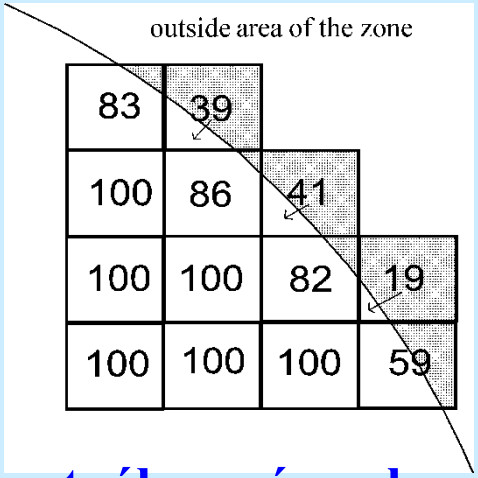


spôsob „Atlas geof….“), 2001

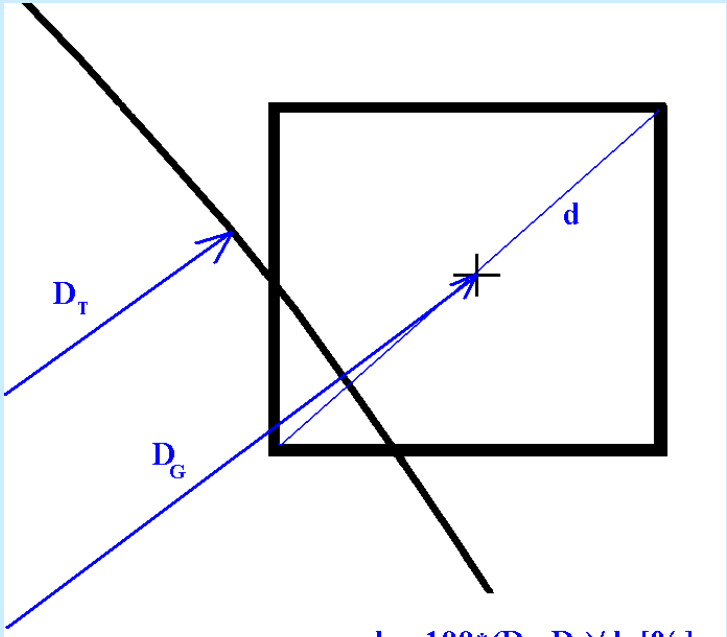
ošetrenie prechodov na kruhových okrajov medzi jednotlivými zónami (T1- T2, T2 - T31 a T31 - T32)



detail:



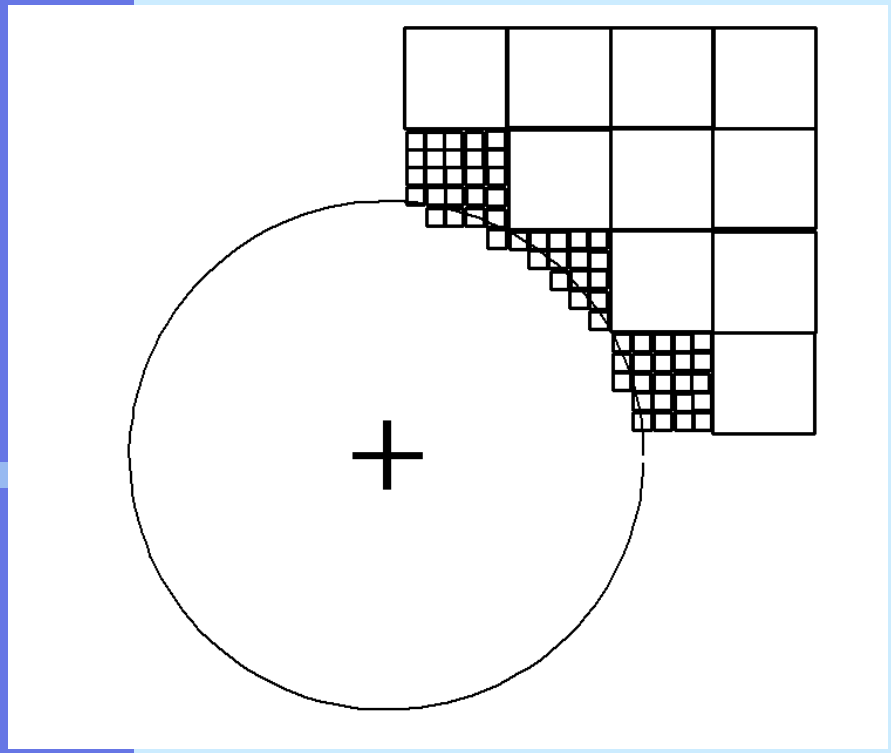
percentuálne príspevky

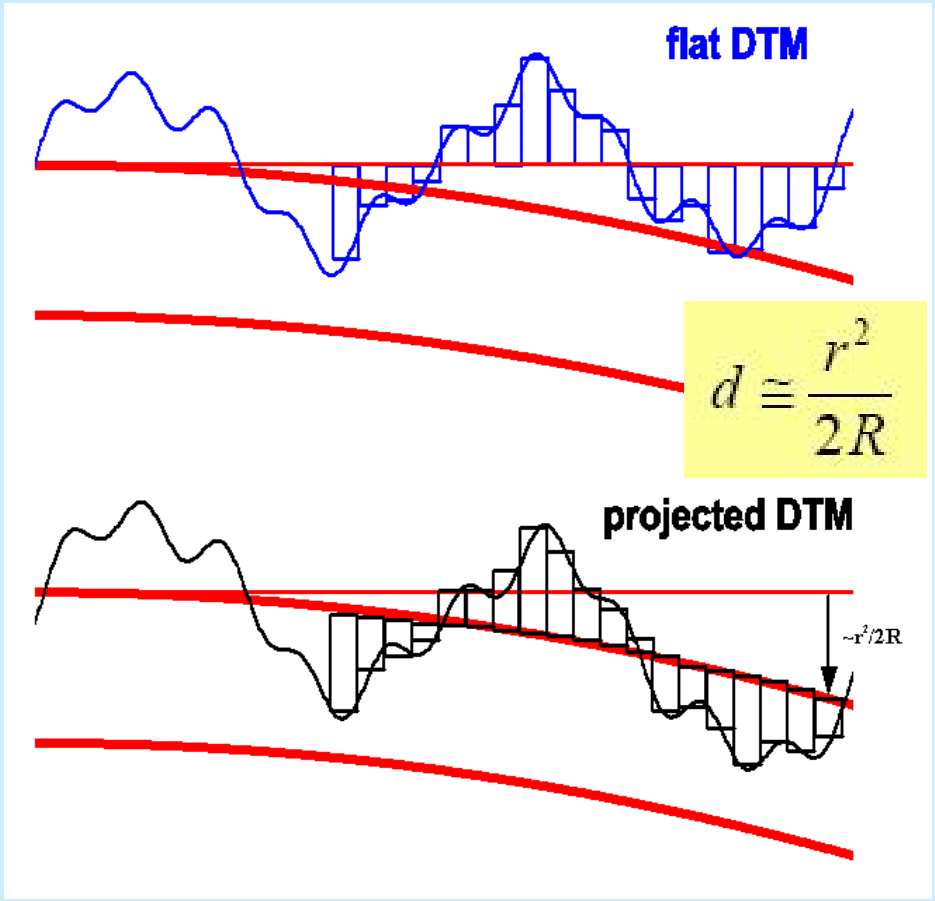


$k \sim 100*(D_T - D_G)/d$ [%]

spôsob „Atlas geof….“), 2001

delenie gridu na pravouhlé hranoly pri vzdialenejších zónach (T_2, T_{31} a T_{32}) a ich vertikálne zanorovanie

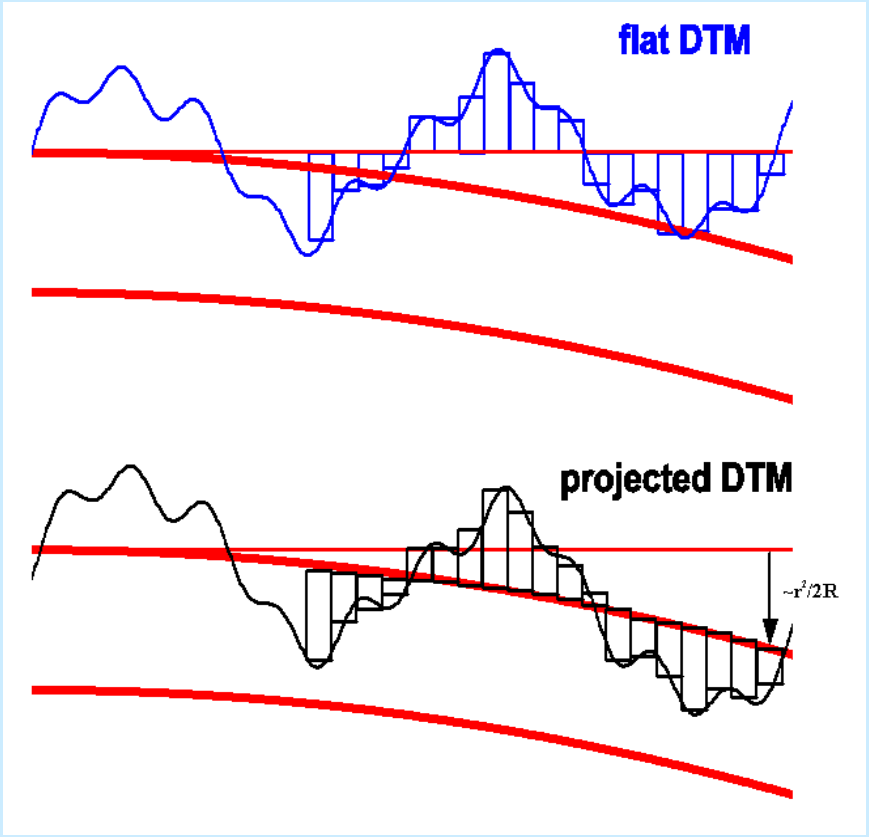


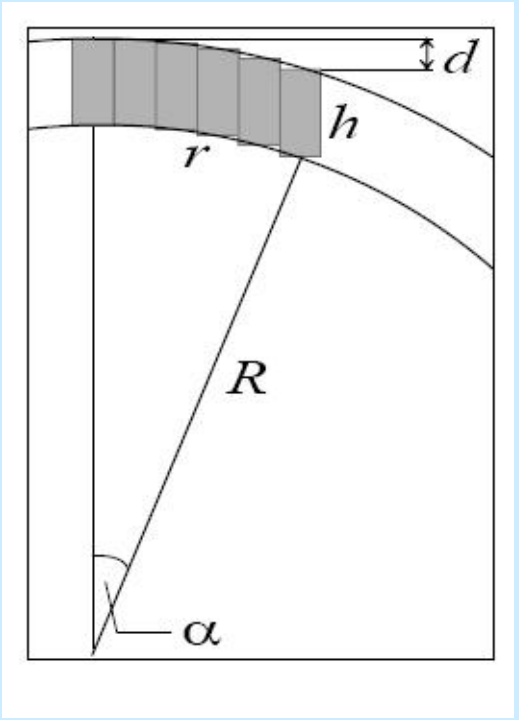


r - vzdialenosť stredu segmentu od bodu výpočtu,
R – polomer gule pri sférickej aproximácii Zeme.

spôsob „Atlas geof….“), 2001

delenie gridu na pravouhlé hranoly pri vzdialenejších zónach (T_2, T_{31} a T_{31}) a ich vertikálne zanorenie





$$d \approx (R+h) - (R+h)\cos\alpha =$$

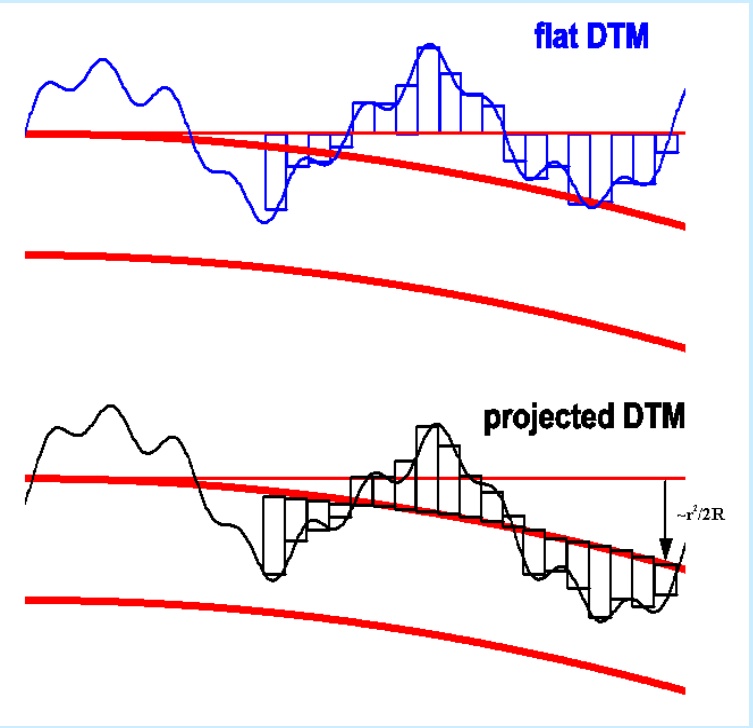
$$= (R+h)(1-\cos\alpha)$$

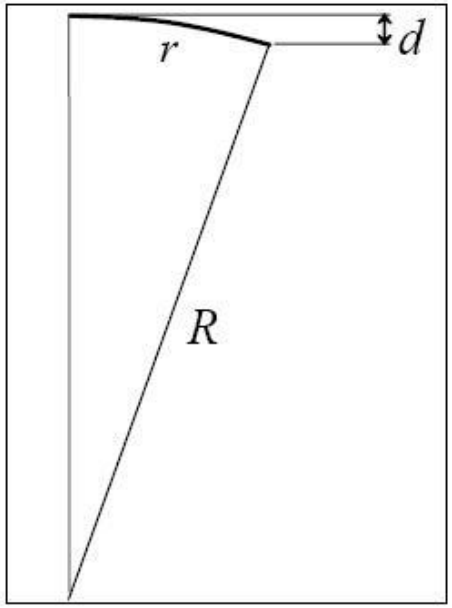
Taylorov rad, $\cos\alpha = 1 - \frac{\alpha^2}{2} + \ldots = 1 - \frac{r^2}{2R^2} + \ldots$

(z definicie priest. uhla vyplyva: $\alpha = \frac{r}{R}$)

spôsob „Atlas geof….“), 2001

delenie gridu na pravouhlé hranoly pri vzdialenejších zónach (T_2, T_{31} a T_{32}) a ich vertikálne zanorenie





r [km]	d [m]
11.1	10
22.2	39
44.5	155
89	622
167	2189

$$d \approx (R+h)\left(\cancel{1}-\cancel{1}+\frac{r^2}{2R^2}\right)=$$

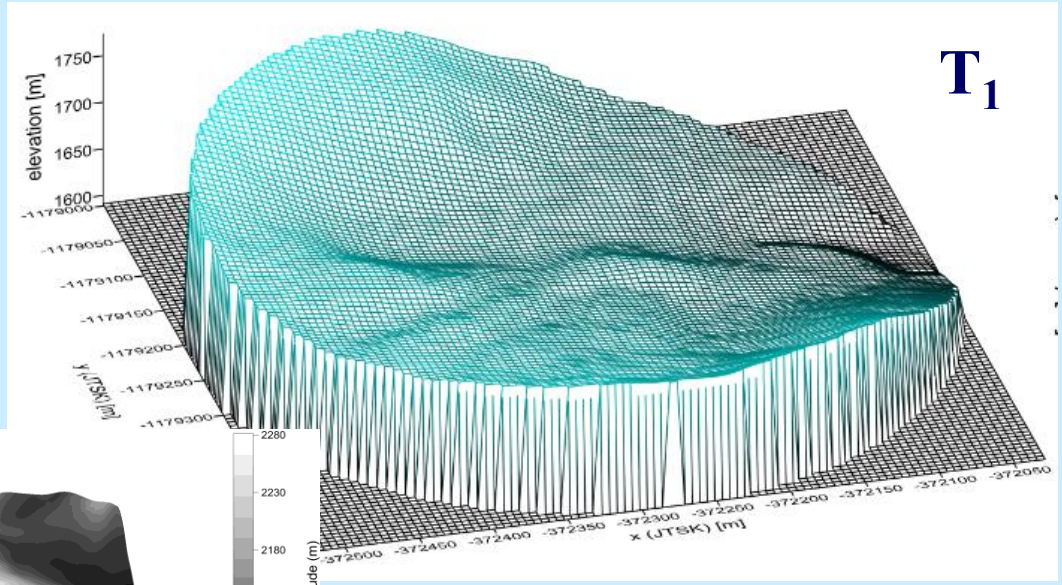
$$=(R+h)\frac{r^2}{2R^2}\approx(R)\frac{r^2}{2R^2}=\frac{r^2}{2R}$$

súčasný spôsob u nás – program Toposk

T_1 – celý povrch v okolí 250 m je nahradený jedným polyédrom (okraj telesa je riešený samostatne), <u>výška bod výpočtu je interpolovaná</u> (len pre túto zónu)

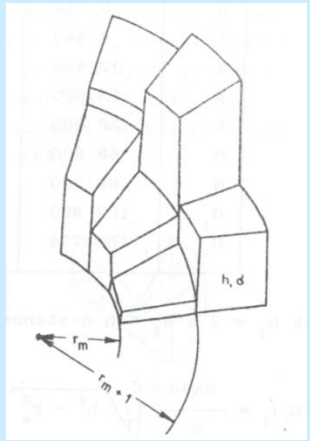
T_2 – dva spôsoby: buď napĺňanie segmentov valca alebo sumácia polyédrov s trojuholníkovou podstavou

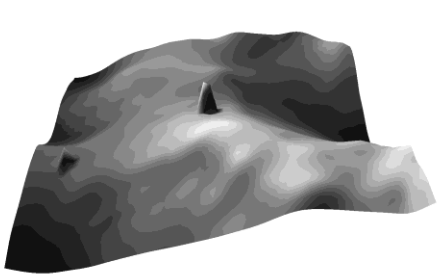
T_{31} a T_{32} dva spôsoby: buď napĺňanie segmentov sférickej vrstvy alebo sumácia polyédrov s trojuholníkovou podstavou (premietnuté na sférickú plochu)

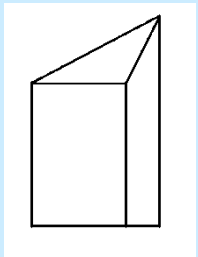


T_1

T_2

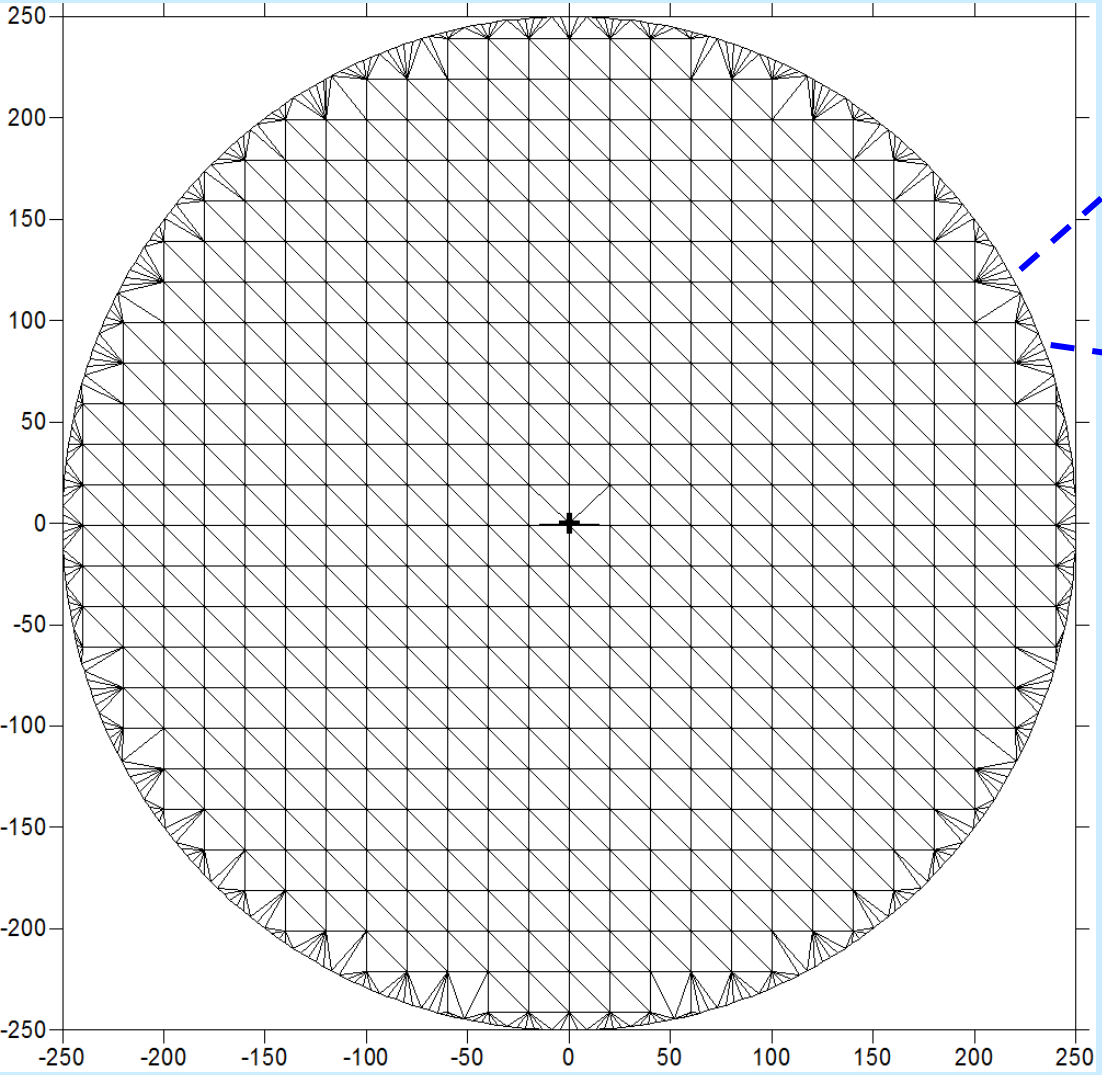




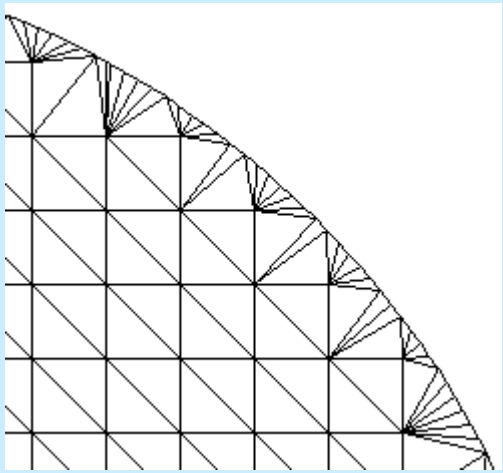


súčasný spôsob u nás – program Toposk

iný spôsob ošetrenia prechodu na kruhovom okraji medzi zónami T_1 a T_2



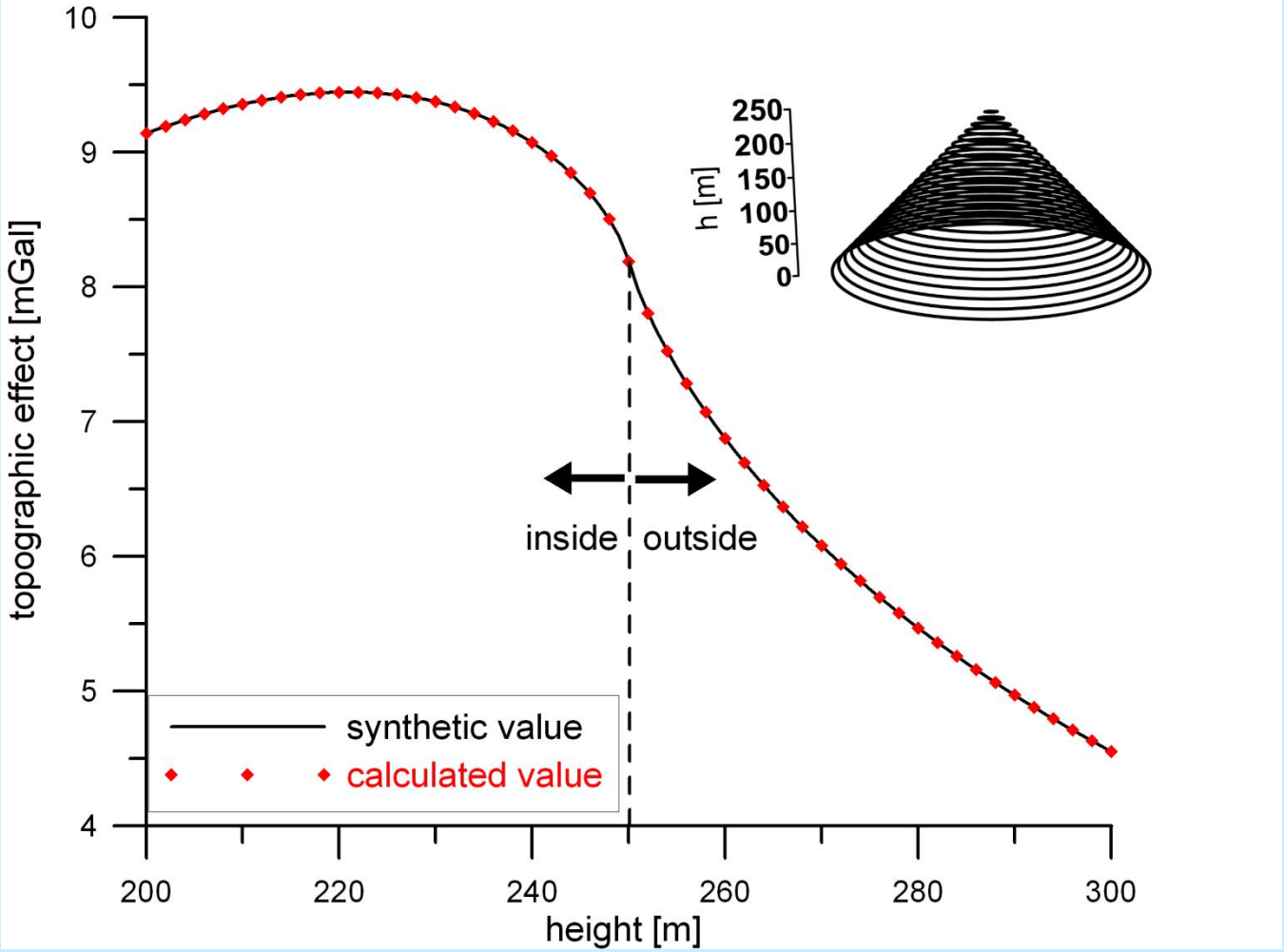
detail:



rozdelenie priestoru okrajových (preťatých) trojuholníkov na ďalšie menšie, ktorých jedna strana leží na kružnici (ovzorkovanej s krokom 1 stupeň)

súčasný spôsob u nás – program Toposk

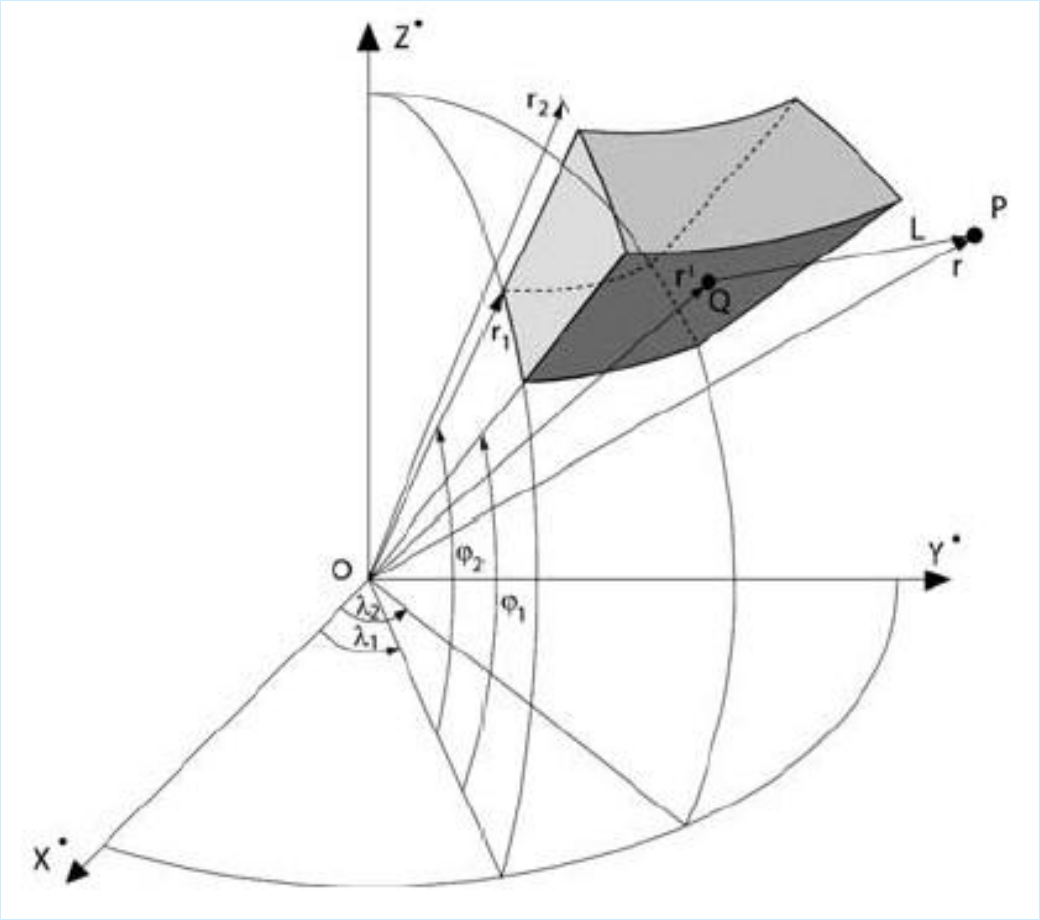
T1 – prístup testovaný na idealizovaých telesách (kužel a paraboloid)



prístup je schopný počítať korekciu aj vo vnútri hmôt (zohľadňovať hmoty nad bodom výpočtu)

súčasný spôsob u nás – program Toposk

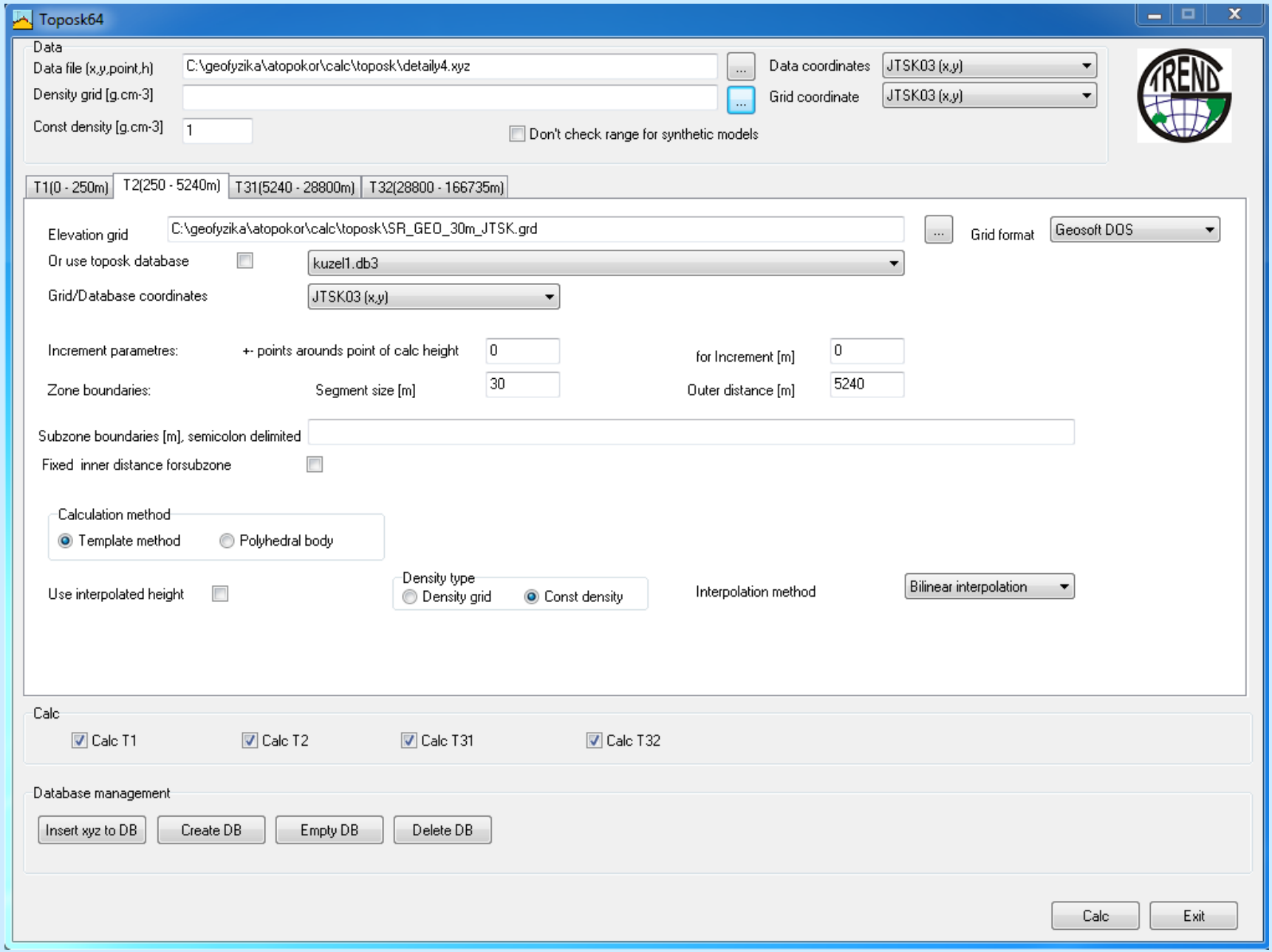
zóny T31 a T32 nie sú počítané pomocou vertikálne zanorených pravouhlých hranolov, ale na základe účinkov segmentov sférickej vrstvy



Program používa vzorec autorov Mikuška et al. (2006)

Alternatívny výpočet je pomocou polyédrov (korektne premietnutých na sférickú plochu)

pracovné rozhranie programu Toposk



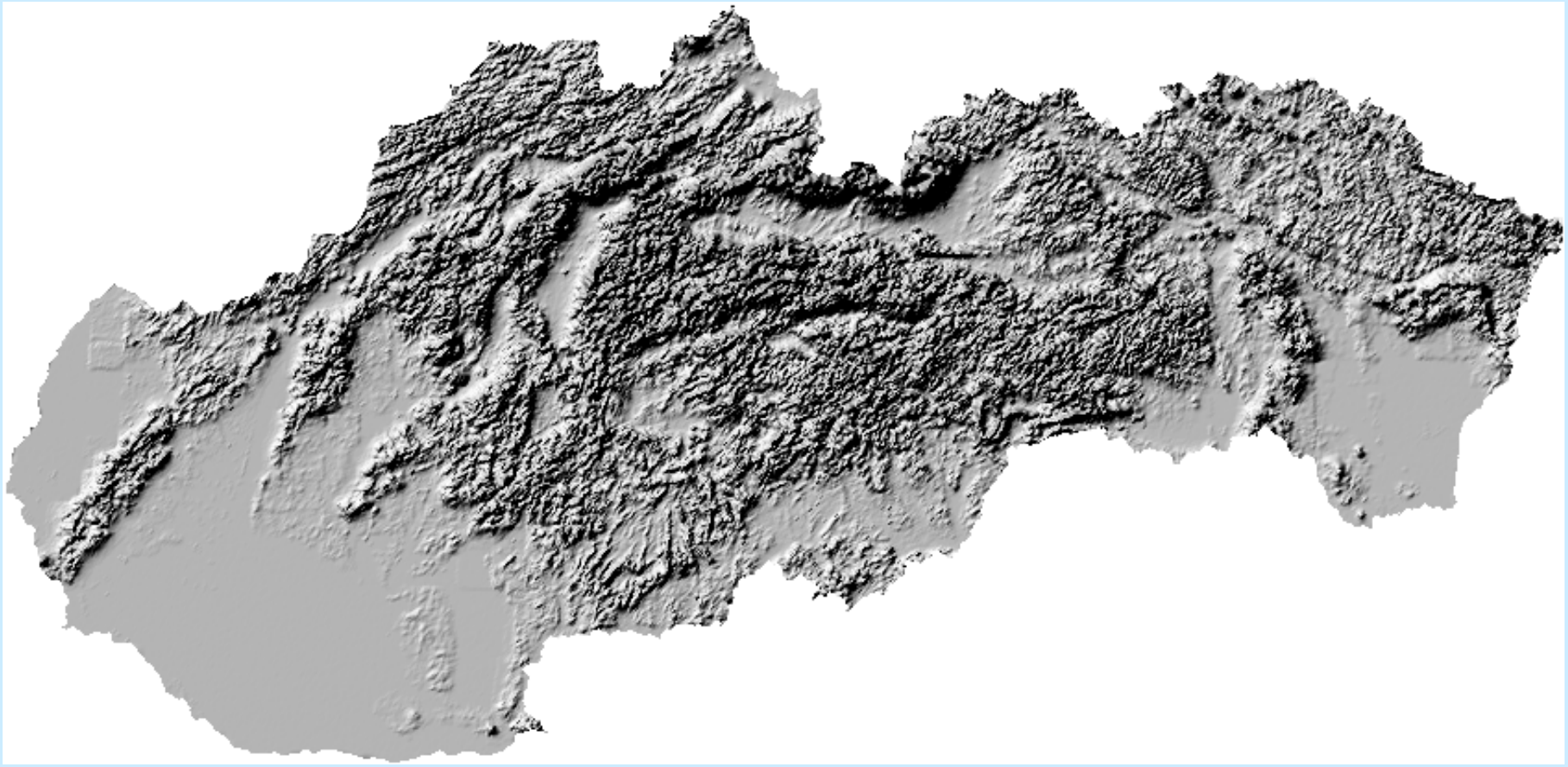
štatistika vypočítaných terénnych korekcií pre územie SR (projekt „Atlas geof. máp a profilov“, rok 2000)

	minim.	maxim.	range	mean
zone T_1	0	4.077	4.077	0.258
zone T_2	0	27.840	27.840	1.152
zone T_{31}	0	11.529	11.529	0.415
zone T_{32}	–0.195	6.002	6.197	0.233
total T	–0.192	40.856	41.049	2.058

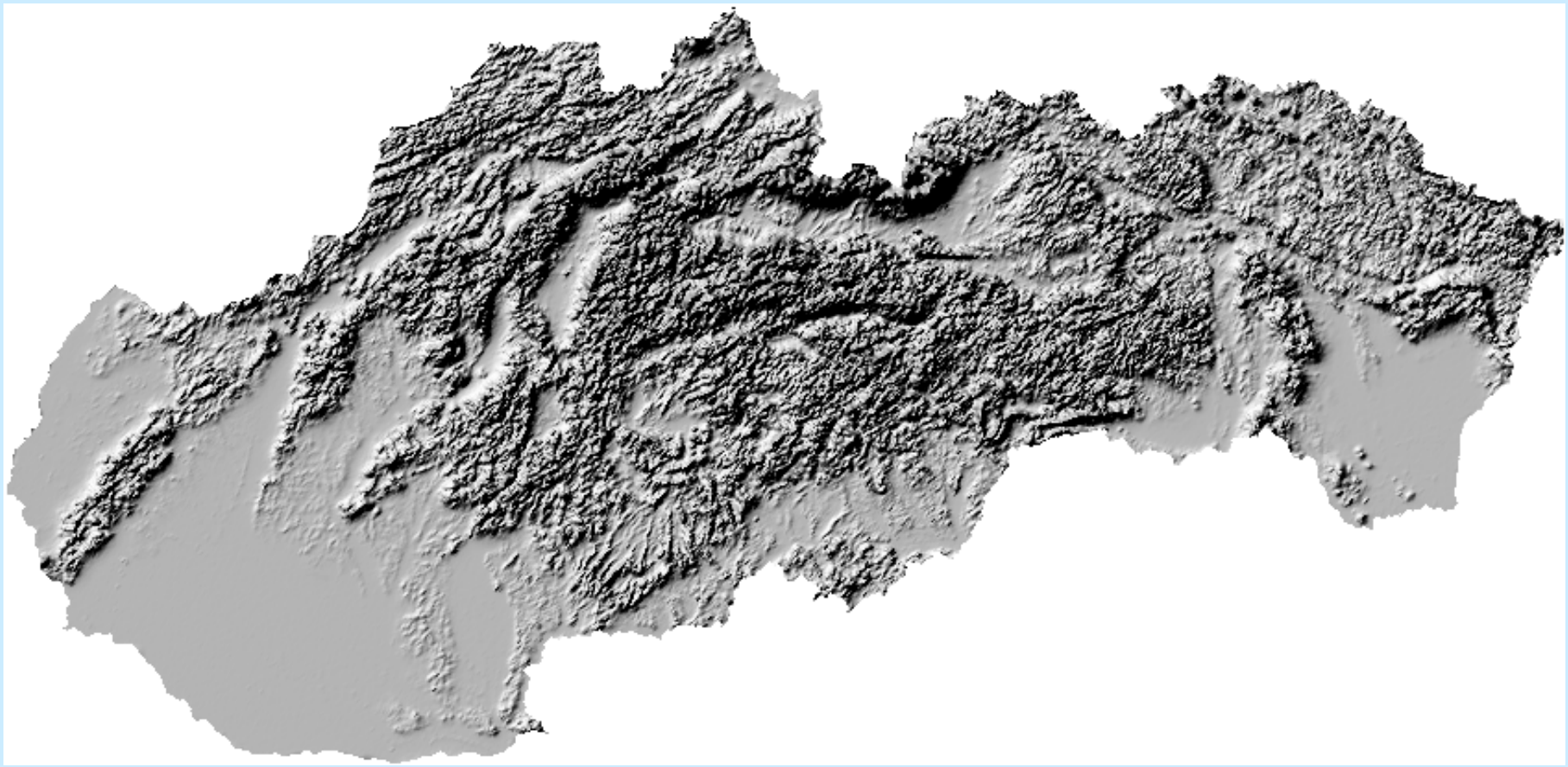
štatistika vypočítaných terénnych korekcií pre územie SR (projekt „Bouguerove anomálie novej generácie...“, rok 2017)

	min.	max.	range	mean
zone T1	0	5.099	5.099	0.262
zone T2	0	27.744	27.744	1.159
zone T31	-0.001	11.397	11.398	0.423
zone T32	-0.197	5.974	6.171	0.097
zone T3	-0.196	17.258	17.454	0.653
total T	-0.195	40.733	40.928	2.072

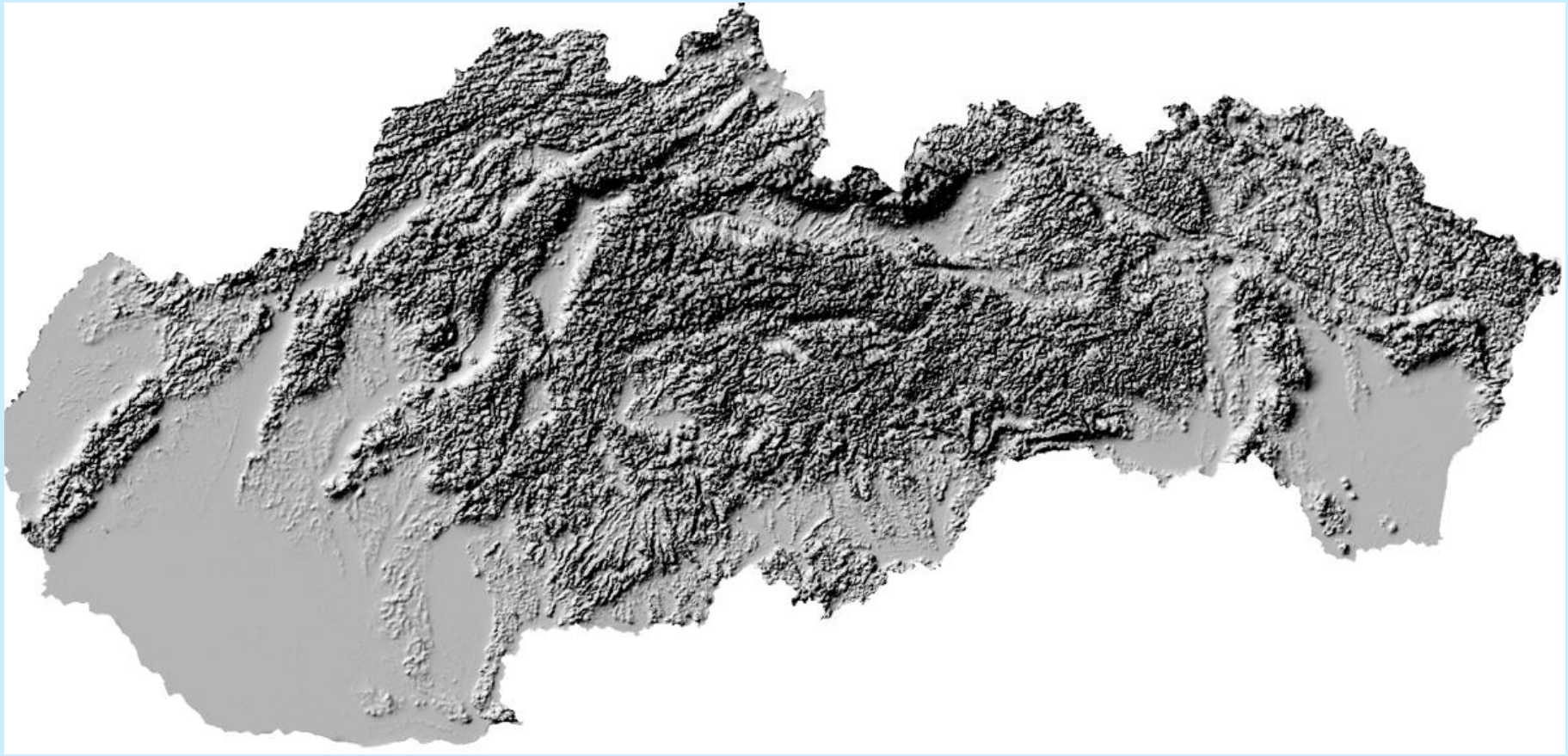
$T_1 + T_2$ (rok 1992)



$T_1 + T_2$ (rok 2000)

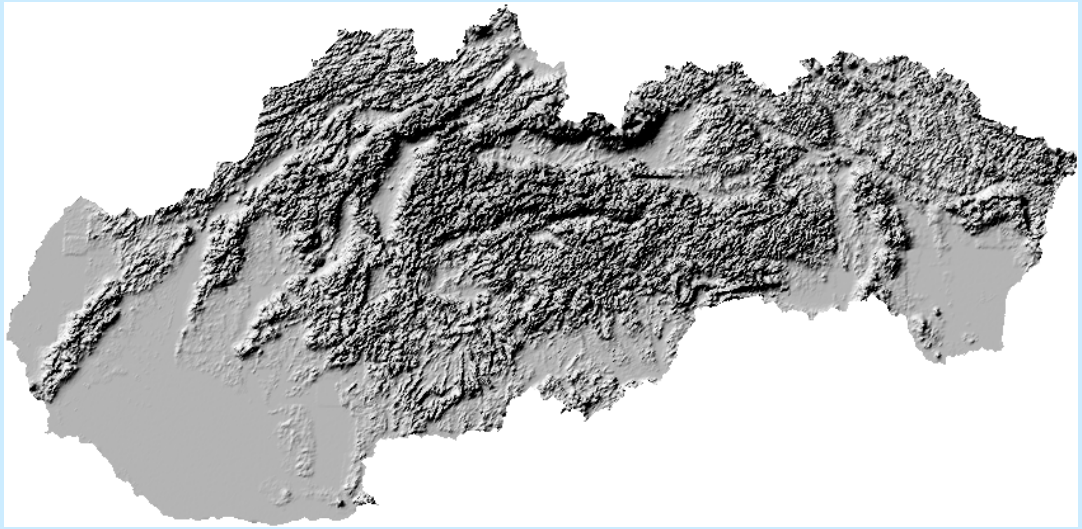


$T_1 + T_2$ (rok 2017)

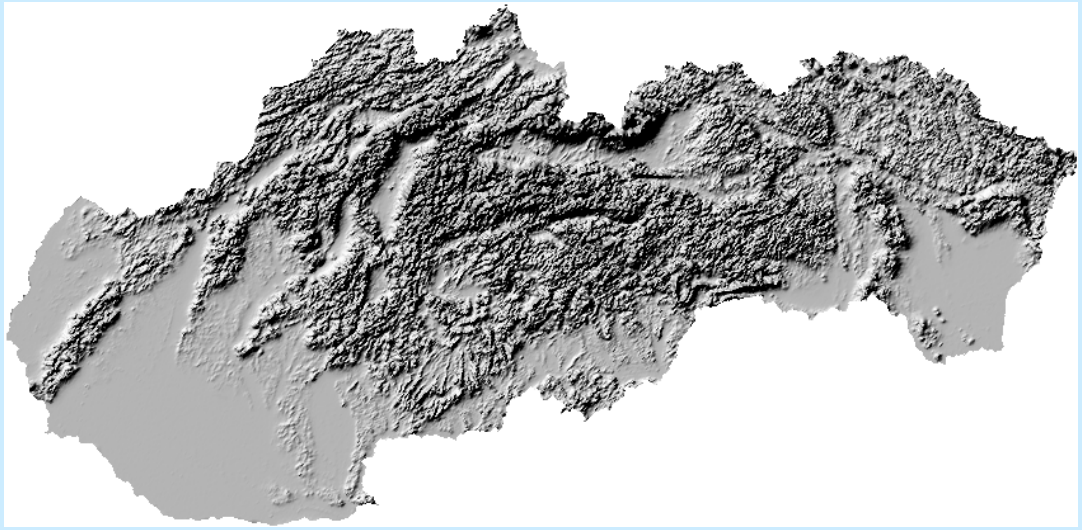


porovnanie „starých“ a „nových“ terénnych korekcií $T_1 + T_2$

1992

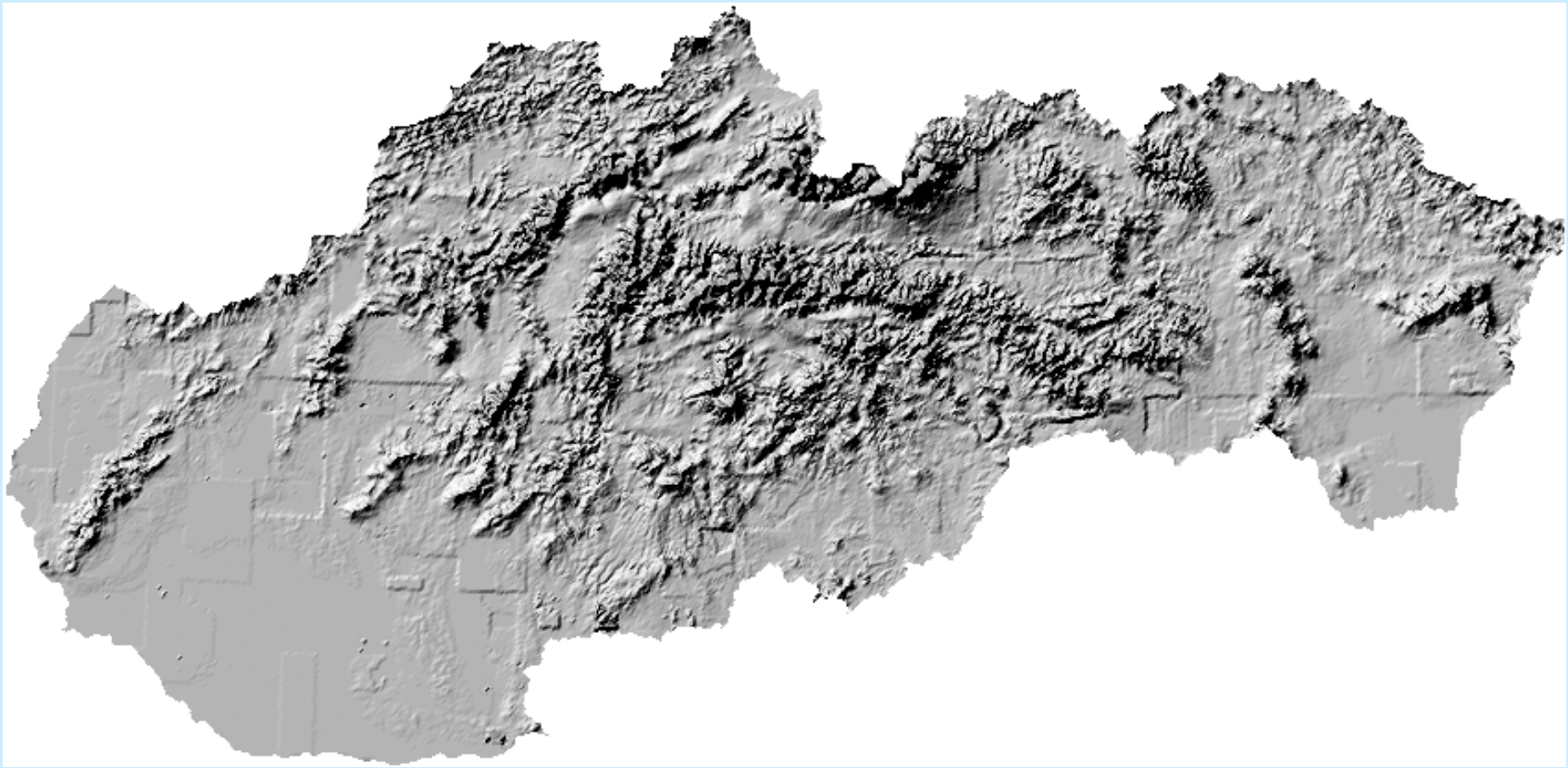


2000

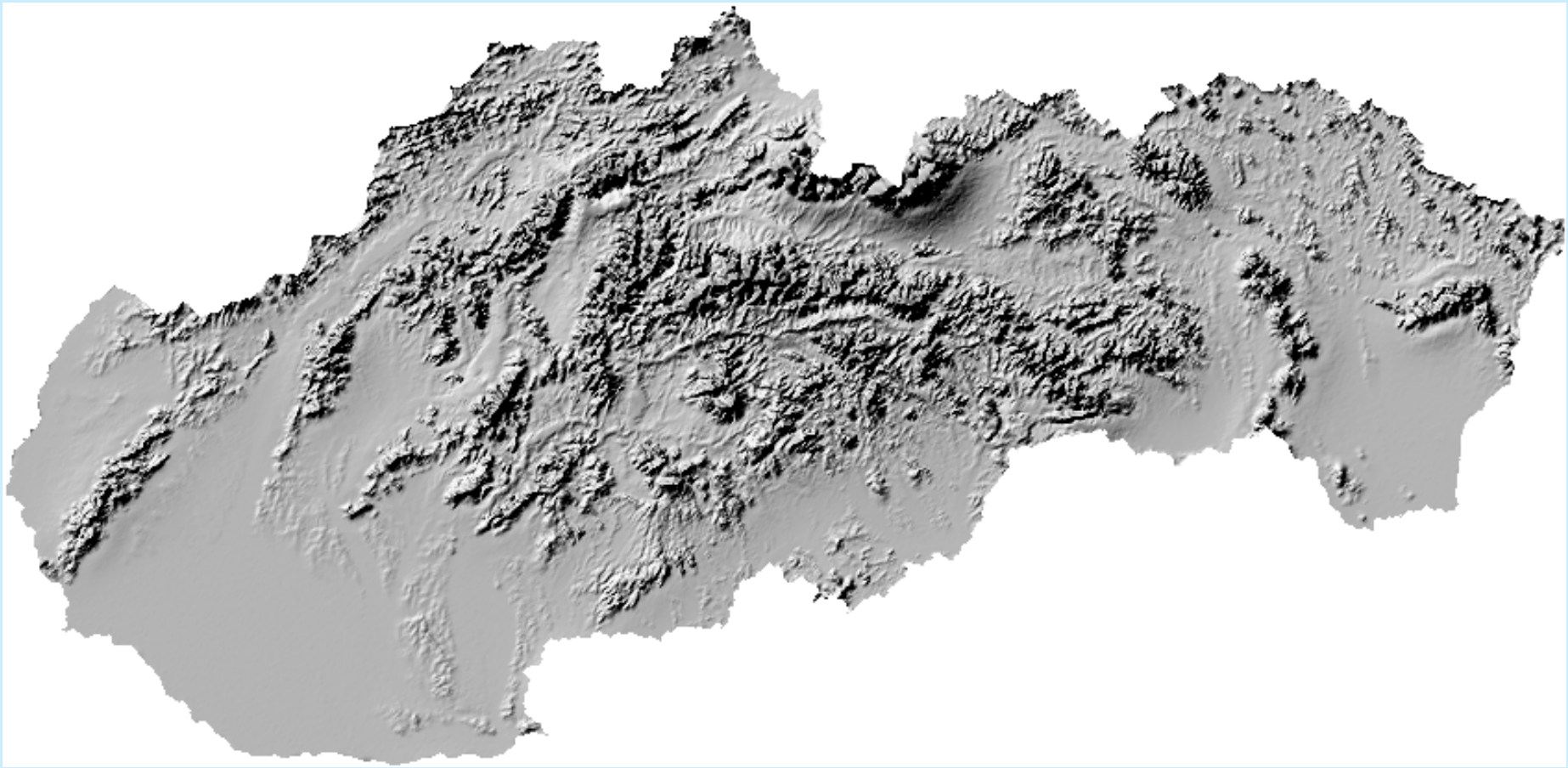


max. rozdiel: 3.6 mGal (pre 1.0 g.cm-3)

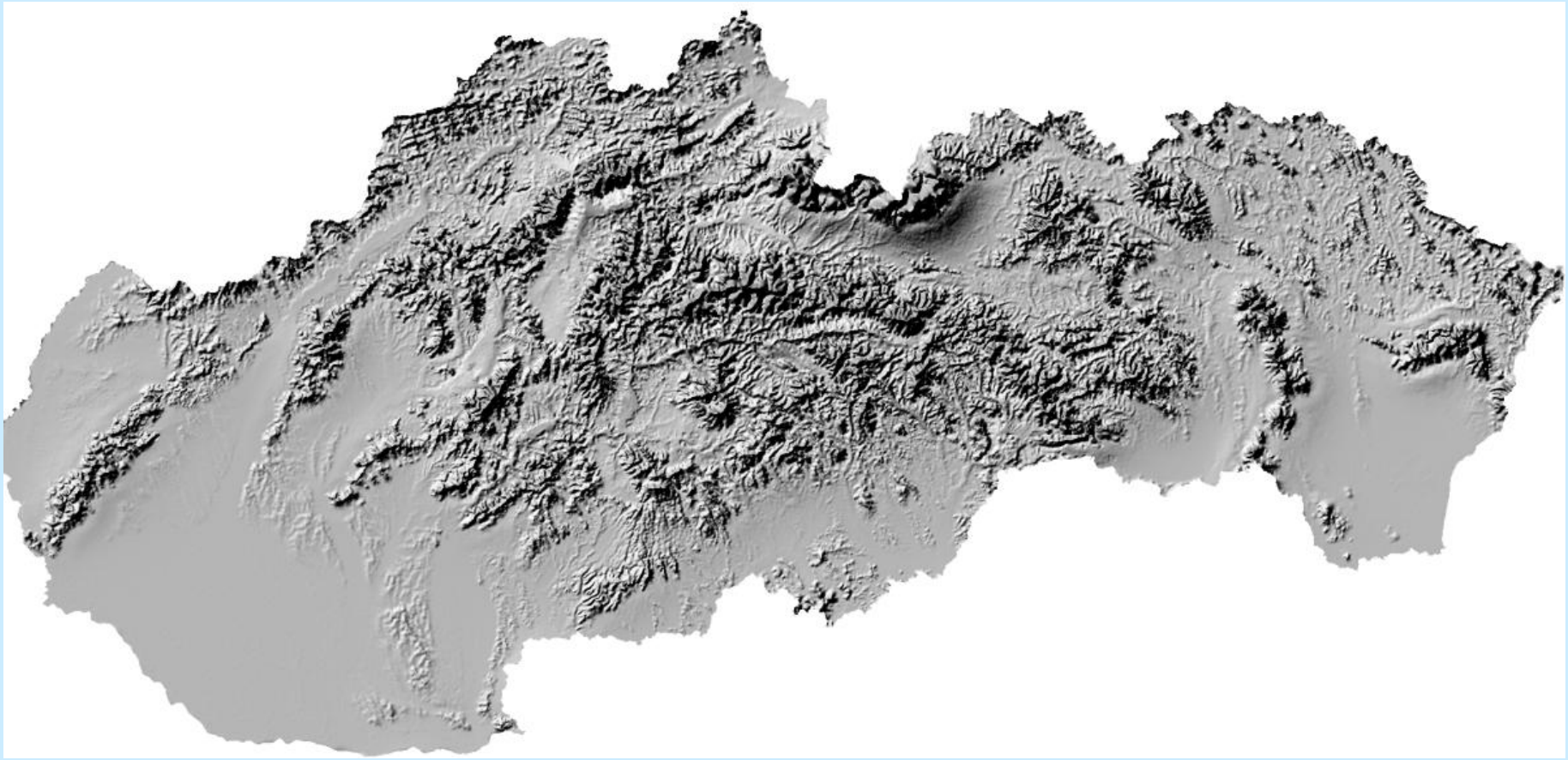
T_3 (rok 1992)



T_3 (rok 2000)

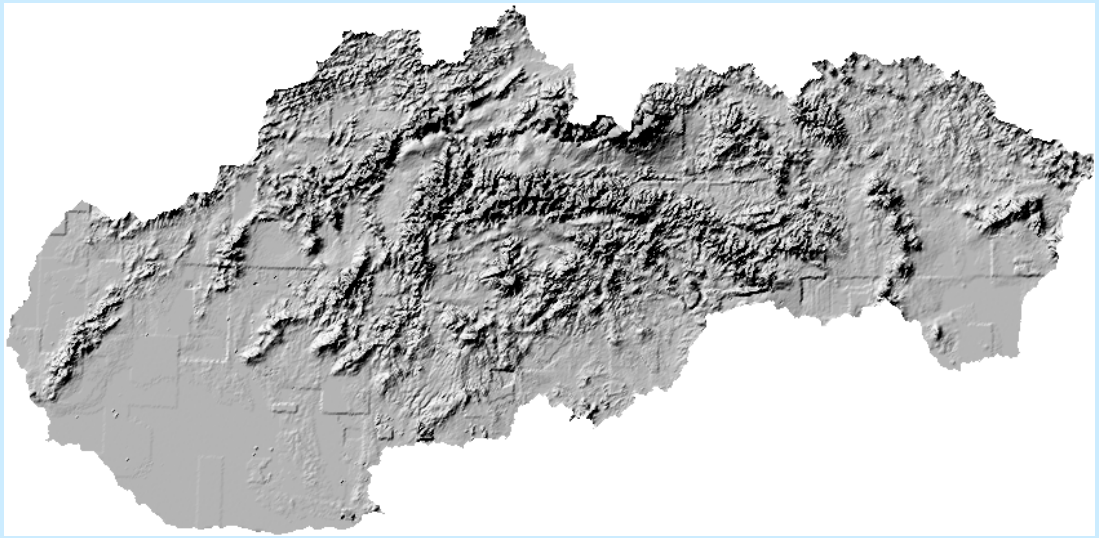


T_3 (rok 2017)

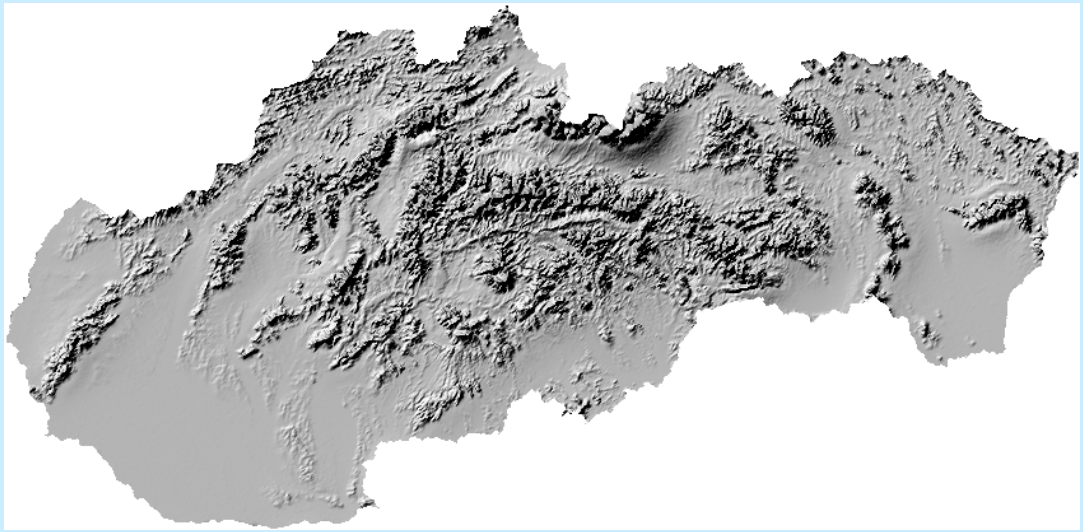


porovnanie „starých“ a „nových“ terénnych korekcií T_3

1992



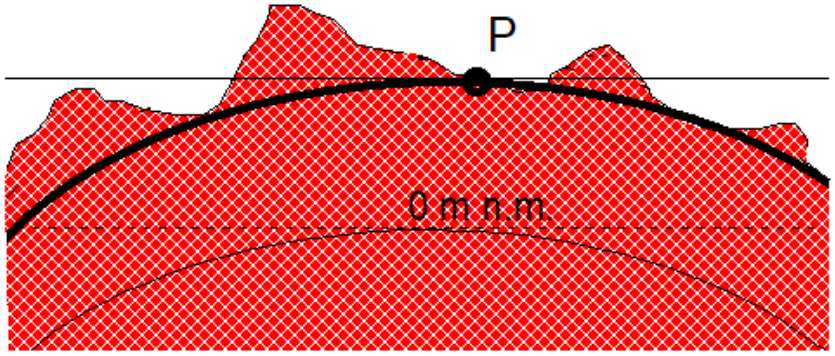
2000



max. rozdiel: 1.21 mGal (pre 1.0 g.cm-3)

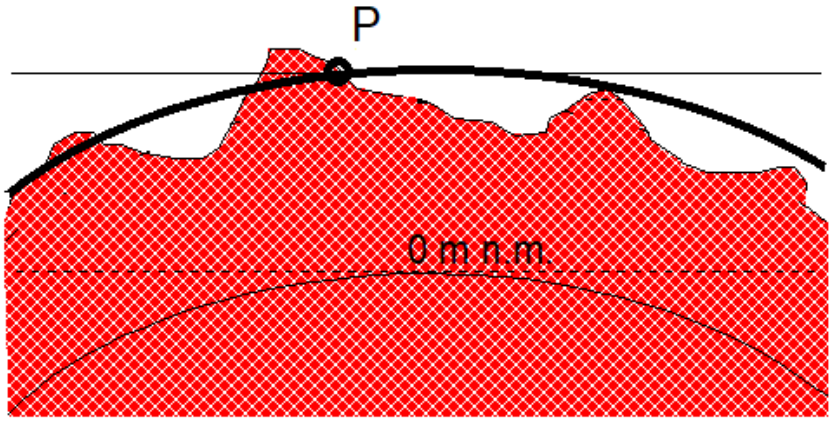
zaujímavosť – výskyt bodov so zápornými hodnotami terénnych korekcií T_3

bod sa nachádza v doline:
takmer všetky okolité topografické črty sa javia ako kopce



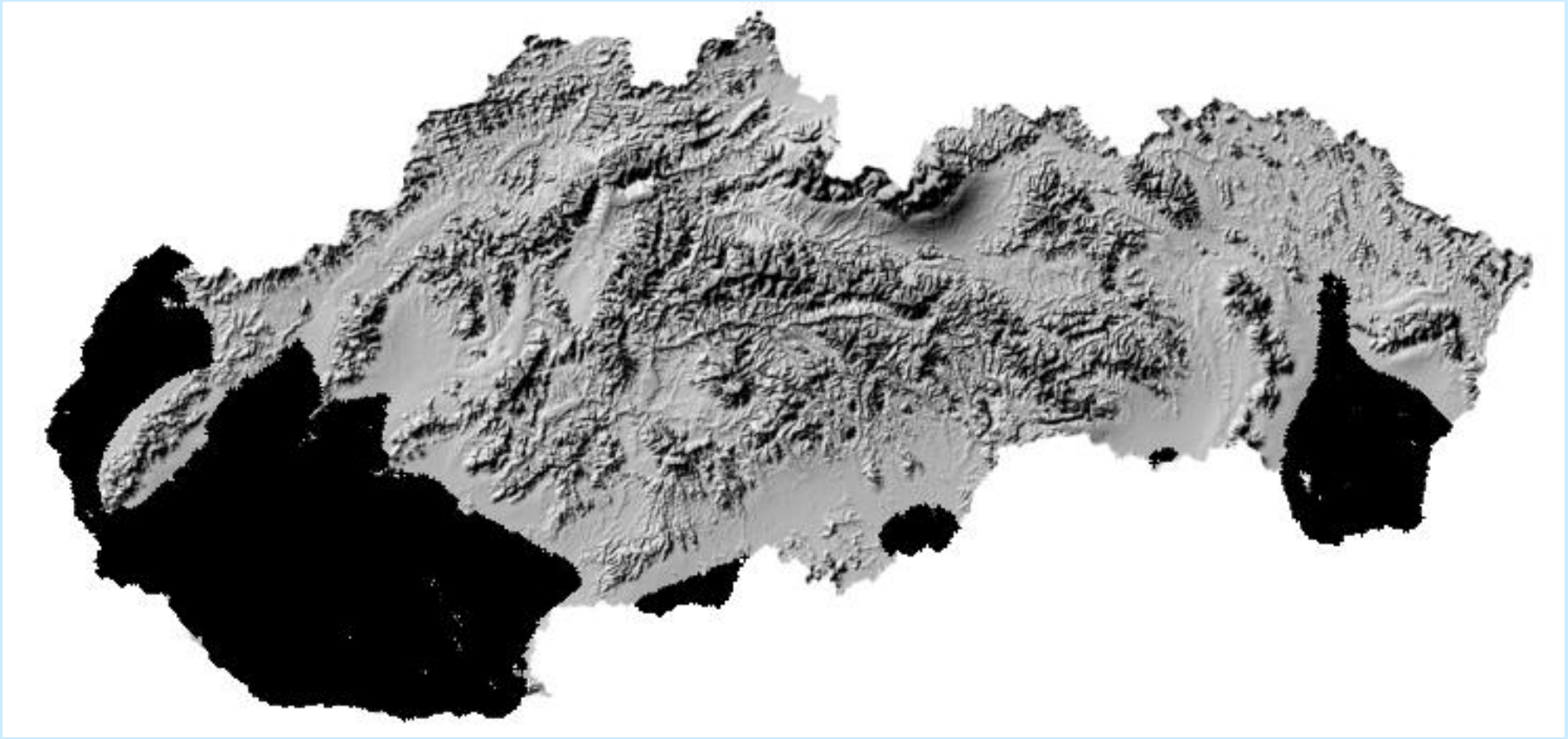
pri veľkom množstve zanorených popcov vzniká prevaha záporných účinkov – **terénna korekcia môže byť záporná**

bod sa nachádza na kopci:
takmer všetky okolité topografické črty sa javia ako kopce



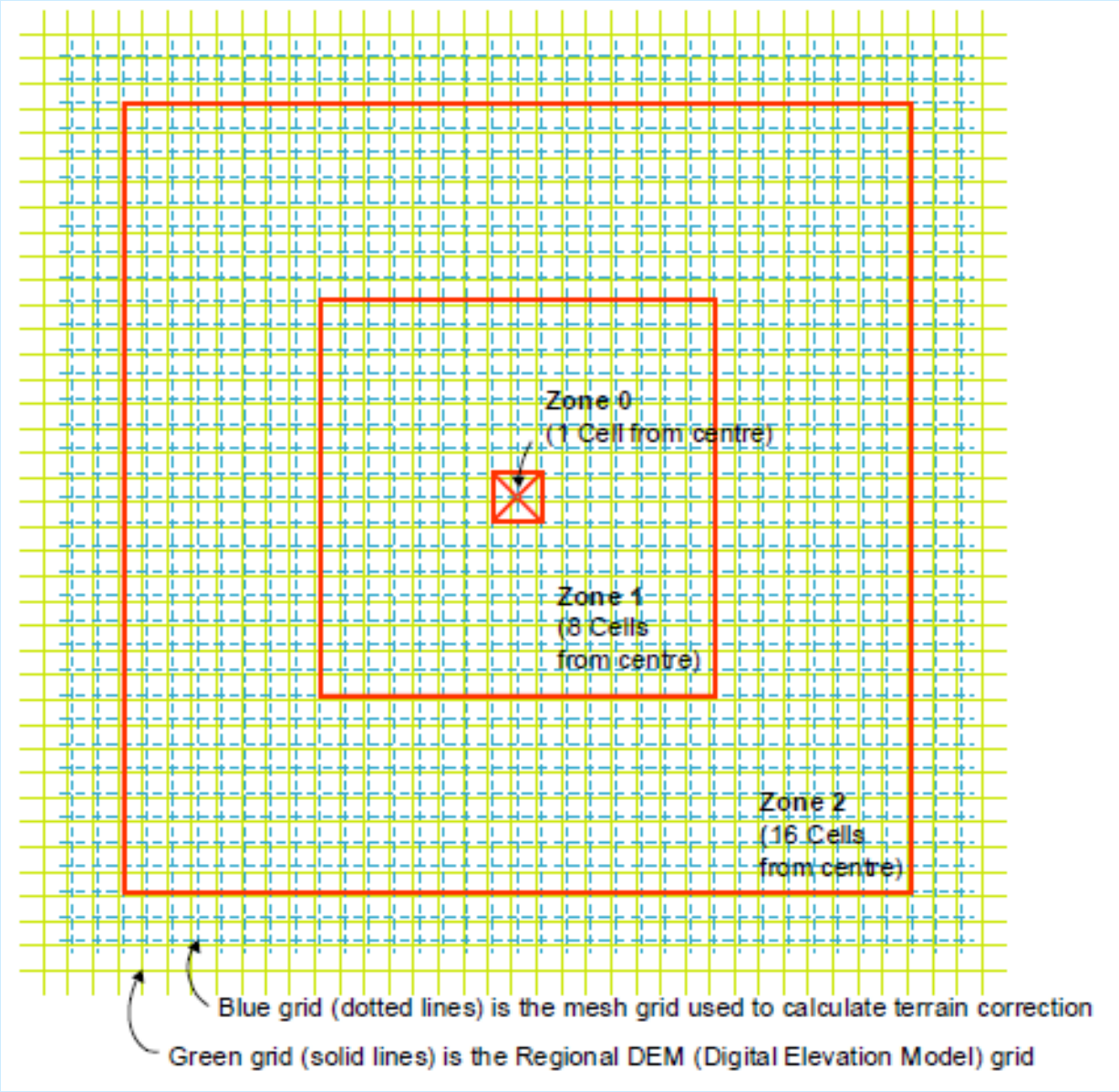
pri veľkom množstve zanorených popcov vzniká prevaha kladných účinkov (účinky dolín sa vždy berú ako kladné)

zaujímavosť – výskyt bodov so zápornými hodnotami terénnych korekcií T_3



zdroj:
projekt „Bouguerove anomálie novej generácie...“, rok 2017

spôsob GEOSOFT – Oasis montaj



2 important areas:

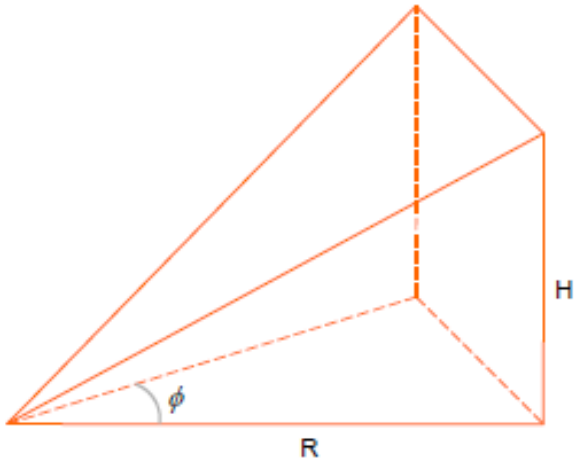
a) local area
(1000 m radius)

b) regional area
(regional grid size)
(maybe 167.735 km)

spôsob GEOSOFT – Oasis montaj

Zone 0: Sloped Triangle

$$g = GD\phi\left(R - \sqrt{R^2 + H^2} + \frac{H^2}{\sqrt{R^2 + H^2}}\right)$$

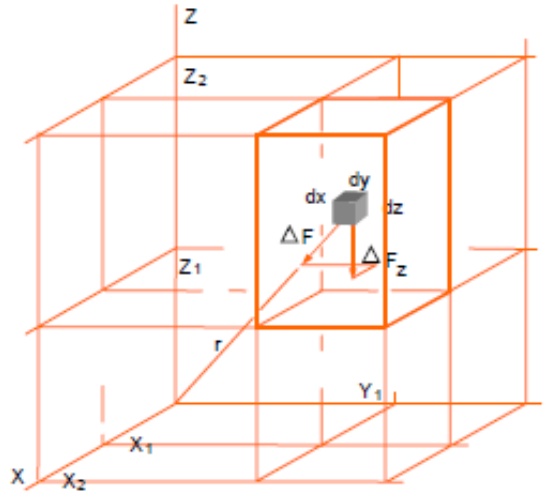


a) local area:

zone 0: sloped triangles,

Zone 1: Prism

$$g = -GD\left|\begin{matrix} z_2 \\ z_1 \end{matrix}\right|\left|\begin{matrix} y_2 \\ y_1 \end{matrix}\right|\left|\begin{matrix} x_2 \\ x_1 \end{matrix}\right| x \bullet \ln(y+R) + y \bullet \ln(x+R) + Z \arctan\frac{Z \bullet R}{x \bullet y}\Bigg|\Bigg|\Bigg|$$



zone 1: rectang. prisms,

spôsob GEOSOFT – Oasis montaj

ZONE 2 (AND BEYOND): SECTIONAL RING

$$g = 2GDA^2 \frac{(R_2 - R_1\sqrt{R_1^2 + H^2} - \sqrt{R_2^2 + H^2}}{(R_2^2 - R_1^2)}$$

where,

g = gravity attraction

G = gravitational constant

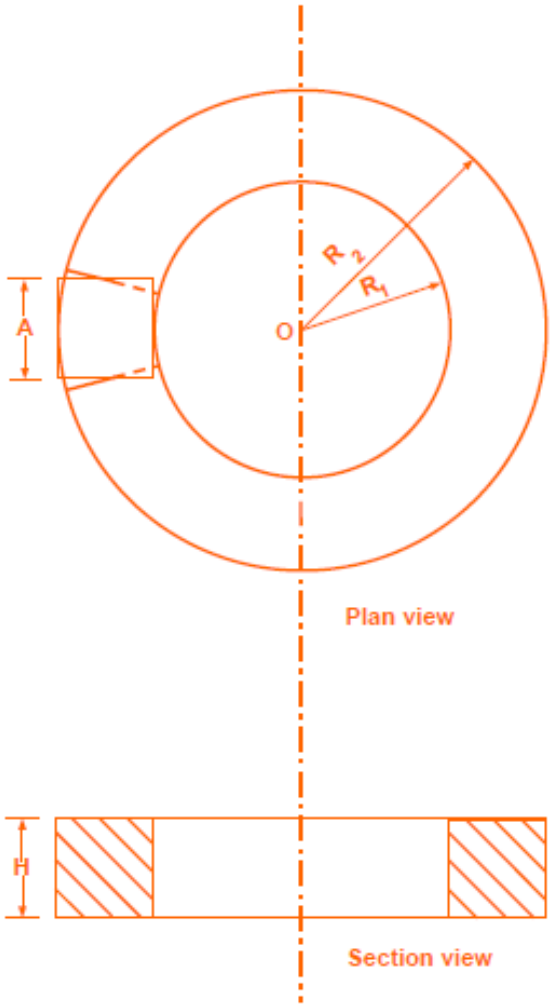
D = density

A = length of horizontal side of prism

R_1 = radius of inner circle of annular ring

R_2 = radius of outer circle of annular ring

H = height of annular ring or prism



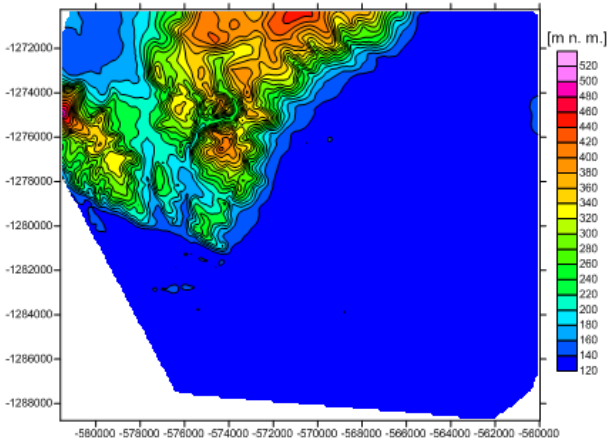
a) local area:
zone 2: sectorial ring

b) regional area:
interpolated from
a prepared regional
corrections grid... (?)

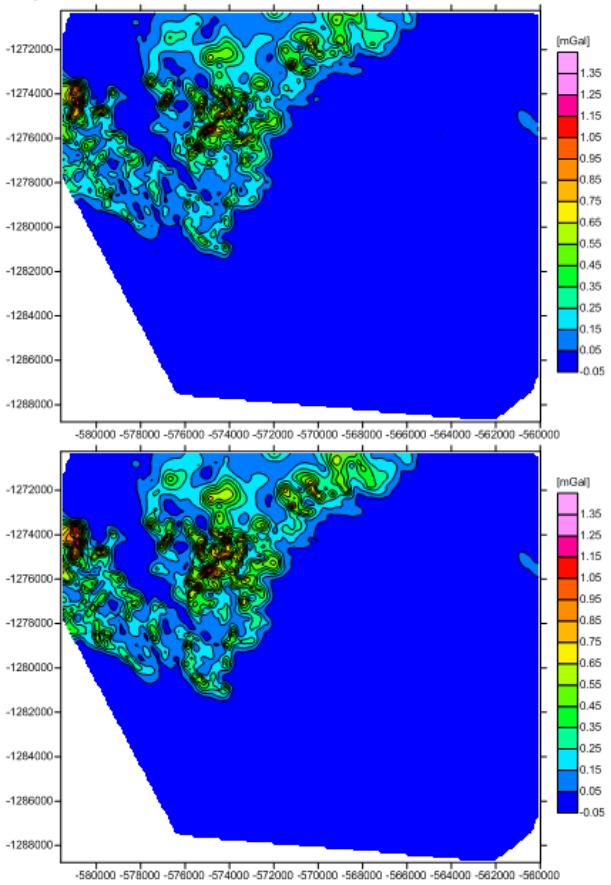
spôsob GEOSOFT – Oasis montaj

TOPOKOREKCIE T1 (do 250 m)

RELIÉF



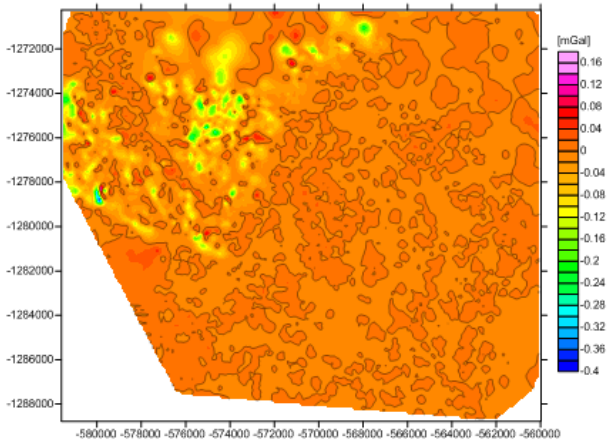
TOPO SK



OASIS MONTAJ

ROZDIEL

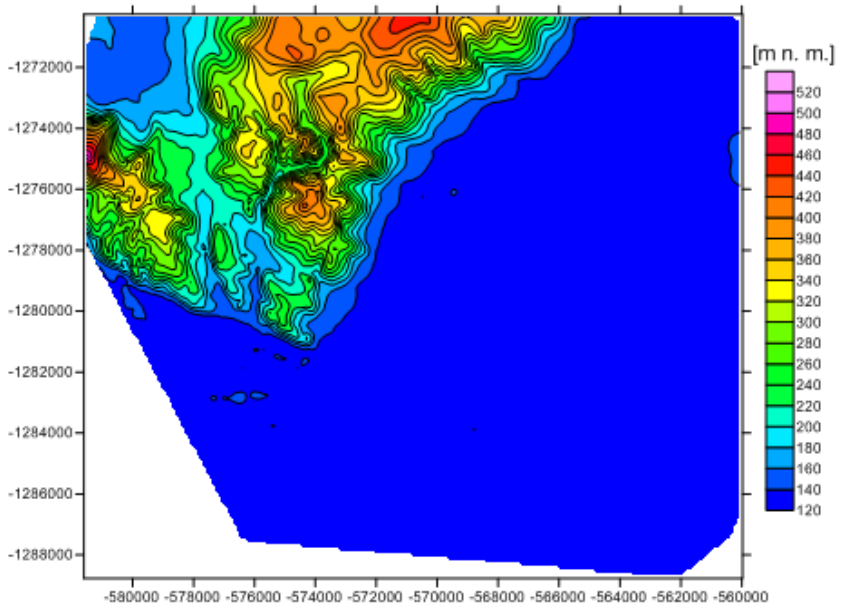
TOPO SK - OASIS MONTAJ (P_T2)



T1 (0 – 250 m)

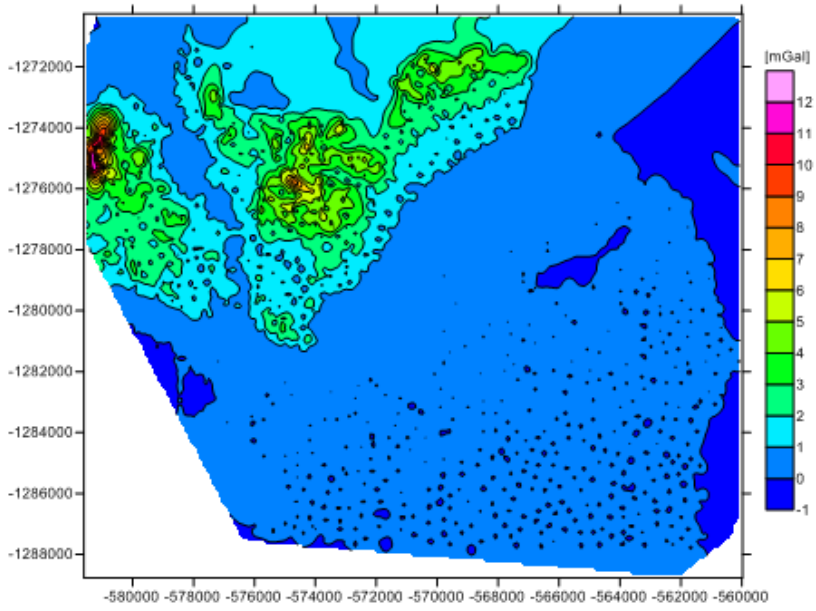
test – územie Bratislavy

RELIÉF

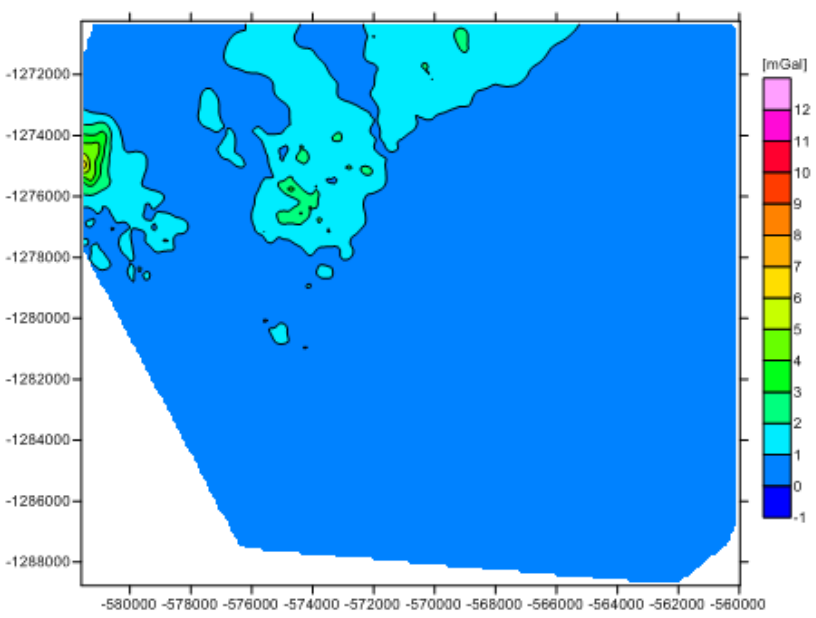


T2-T32 (250 m – 166.7 km)

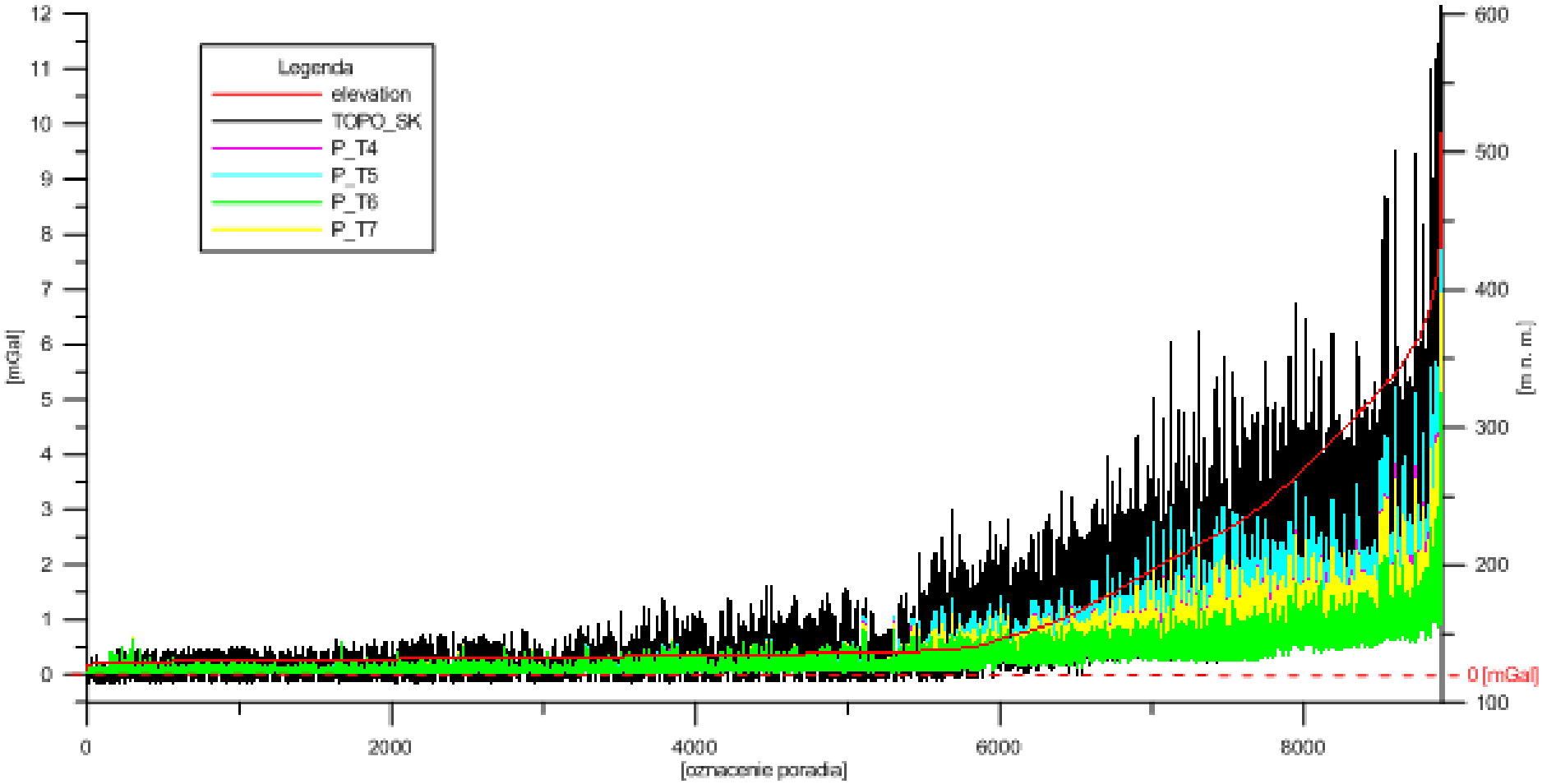
TOPO SK



OASIS MONTAJ



spôsob GEOSOFT – Oasis montaj



test – územie Bratislavy T (0 m – 166.7 km)

zaujímavosť: spôsob, používaný v Rakúsku

