

A WGS84 geodéziai világrendszer és továbbfejlesztései*

Dr. Ádám József

egyetemi tanár, akadémikus

BME Általános- és Felsőgeodézia Tanszék

MTA-BME Fizikai Geodézia és Geodinamikai Kutatócsoport



1. Bevezetés

A GPS-műholdak által sugárzott fedélzeti pályaadatok vonatkoztatási rendszere WGS84 (*World Geodetic System 1984*) néven ismeretes. A WGS84 vonatkoztatási rendszert az USA védelmi minisztériumának (Department of Defense, DoD) katonai térképészeti szolgálata (Defense Mapping Agency, DMA; melynek neve 1996-tól National Imagery and Mapping Agency, NIMA; 2004-től pedig National Geospatial-Intelligence Agency, NGA; <http://www.nga.mil>) határozta meg és tette közzé, elsősorban globális méretű katonai navigációs és térképészeti feladatok megoldása céljából. A WGS84 rendszer a DoD/DMA geodéziai világrendszerének korábbi megoldásai (WGS60, WGS66 és WGS72) fokozatos továbbfejlesztésének eredményeként született (*DMA, 1987; Kumar, 1988*).

A DMA (és utódintézménye: NIMA, NGA) számos geodéziai, gravimetriai és térképészeti terméket állít elő (analóg és digitális formában) a DoD tevékenységének támogatására. Mindezen adatok egységes vonatkoztatására (az igen nagy számú és változatos termékekkel történő könnyű működés mellett még számos ok miatt is) célszerű és hasznos geocentrikus vonatkoztatási rendszer használata. Ilyen vonatkoztatási rendszerre volt szükség a pontossági és a széles körű, tömeges felhasználói (helyi, regionális és globális méretű) igények kielégítésére. Szükség volt erre abból a célból is, hogy a különböző adatforrásokból származó adatokat össze tudják hasonlítani, továbbá egymásba át tudják számítani a világ különböző részein készített földmérési és térképészeti termékeket.

A felsorolt műveletek végrehajtására olyan geocentrikus vonatkoztatási alapot, ún. *geodéziai világrendszert* (World Geodetic System, WGS)

kellett megvalósítani, mely biztosítja a geocentrikus elhelyezésű vonatkoztatási koordináta-rendszert és Földünk normálalakját (geometriai alapfelületet), modellezi Földünk nehézségi erőterét (normál nehézségi erőtere van), szolgáltatja a különböző helyi (és regionális) vonatkoztatási rendszerek (dátumok) átszámítását a geocentrikus koordináta-rendszerbe, továbbá a különböző térképművek készítéséhez vetületi síkkordináta-rendszerrel is rendelkezik.

Egyszóval az ún. geodéziai világrendszer szolgál vonatkoztatási alapul az NGA (és elődintézményei: DMA, NIMA) földmérési és térképészeti termékei számára és a DoD világméretű katonai tevékenységéhez.

2. A WGS geodéziai világrendszer megoldásai létrehozásának története

A DoD az 1950-es évek második felében kezdte el a WGS jelű geodéziai világrendszerének kifejlesztését. Ennek szükségességét a különböző térképek, felmérések és helyi dátumok geodéziai információi közötti kapcsolatok megteremtése, továbbá a mesterséges holdak és interkontinentális ballisztikus rakéták fejlesztése igényelte.

A geodéziai világrendszer első változata az 1960. évi megoldás (*WGS60*) volt. A WGS60 vonatkozási ellipszoid fél nagytengelye hosszának (a) meghatározásához az addig rendelkezésre álló földfelszíni gravimetriai és csillagászati-geodéziai adatokat, valamint a kanadai elektromágneses távmérőrendszerek (HIRAN, SHORAN) eredményeit használták fel. Az ellipszoid geometriai lapultságát (f) az 1958-ban felbocsátott mesterséges holdra (1958 β) vonatkozó mérések alapján vezették le (*1. táblázat*).

A WGS60 megalkotását követően további nagy számú földfelszíni gravimetriai és csillagászati-geodéziai, továbbá doppleres és fotografikus műholdmegfigyelési adat vált elérhetővé. Ezeket és pontosított feldolgozási eljárásokat felhasználva

* A Geomatika Továbbképző Szemináriumon (Sopron, 2004. október 28–29.) elhangzott előadás átdolgozott és új eredményekkel kiegészített szövege.

1. táblázat

A WGS megoldásai alapfelületének geometriai adatai

a WGS jelölése	a (fél nagytengely hossza és megbízhatósága)	f (geometriai lapultság)
WGS60	6 378 165 ± 50 m	1/298.3
WGS66	6 378 145 ± 20 m	1/298.25
WGS72	6 378 135 ± 5 m	1/298.26
WGS84	6 378 137 ± 2 m	1/298.257223563

hozták létre a geodéziai világrendszer 1966. évi változatát (WGS66). A WGS66 vonatkoztatási ellipszoid lapultságát kizárólag műholdas mérésekből, fél nagytengelyének hosszát pedig műholdas Doppler-mérések és csillagászati-geodéziai adatok együttes felhasználása alapján határozták meg úgy, hogy az ellipszoidfelület a geoidhoz jól simuljon. A WGS66 rendszerhez geopotenciál modellt is rendeltek, amelynek gömbfüggvény-együtthatóit $n, m = 24$ -ig határozták meg a teljes földfelszínre $5^\circ \times 5^\circ$ -os gömbi négyzetökre vonatkozó átlag nehézségi rendellenességek alapján. A koordinátatranszformáció céljából meghatározták a WGS66 rendszernek az 1927. évi észak-amerikai geodéziai dátumra (North American Datum 1927, NAD27), az 1950. évi európai geodéziai dátumra (European Datum 1950, ED50) és a tokiói geodéziai dátumra (Tokyo Datum, TD) vonatkozó átszámítási együtthatóit is.

A számítástechnika előretörésével, valamint további nagy mennyiségű doppleres és fotografikus műholdméréseket és hagyományos geodéziai mé-

rések adatait felhasználva kifejlesztették a geodéziai világrendszer 1972. évi változatát (WGS72). Ennek során továbbfejlesztett számítástechnikai eljárásokat és finomított adatkezelési módszereket alkalmaztak. A geodéziai világrendszer WGS72 jelű megoldását a Nemzetközi Geodéziai Szövetség (International Association of Geodesy, IAG) által létesített és közzétett geodéziai vonatkoztatási rendszer 1967. évi változatának (Geodetic Reference System 1967, GRS67) létrehozásával (Biró, 1972) bizonyos fokig összhangban dolgozták ki, melynek keretében szintellipszoidot (Biró, 1985) fogadtak el a meghatározó négy paraméter számértékével (2. táblázat) (Seppelin, 1974). A négy számérték a geodéziai világrendszer WGS72 változatának geodéziai vonatkoztatási rendszerét (a Föld normálmalakját és normál nehézségi erőterét) meghatározó számadatok, amelyek segítségével a többi paraméter számértéke is kiszámítható (pl. a WGS72 ellipszoid fél kistengelyének hossza, geometriai lapultsága, a WGS72 szintellipszoid felszínén a normál nehézségi térerősség (γ) eloszlás képletében szereplő együtthatók stb). A WGS72 rendszerhez geoidképet (WGS72 geoid) is rendeltek, amelyet csillagászati-geodéziai adatok alapján határoztak meg. Így ez alapján csak a szárazföldekre lehetett a geocentrikus elhelyezésű WGS72 ellipszoid és a geoid felületi eltéréseit (az ún. geoidundulációkat) meghatározni (Seppelin, 1974). A WGS72 rendszer vonatkoztatási koordináta-rendszere és 27 geodéziai dátum között (ED50, NAD27, TD stb.) határozták meg az átszámítási (transzformációs) együtthatókat. Megjegyezzük, hogy a WGS72

2. táblázat

A WGS72 és a WGS84 geodéziai vonatkoztatási rendszert meghatározó paraméterek

jelölése	elnevezése	számértéke	pontossága (1σ)
a	a szintellipszoid fél nagytengelyének hossza	6 378 135 m (WGS72) 6 378 137 m (WGS84) 6 378 137 m (GRS80)	± 5 m ± 2 m –
$\bar{C}_{2,0}$	normalizált másodfokú és nullarendű gömbfüggvény együttható	– 484.1605 × 10 ⁻⁶ (WGS72) – 484.16685 × 10 ⁻⁶ (WGS84) J ₂ =108 263 × 10 ⁻⁸ (GRS80)	– ± 1,30 × 10 ⁻⁹
ω	Földünk forgási szögsebessége	7 292 115.147 × 10 ⁻¹¹ rad/s (WGS72) 7 292 115 × 10 ⁻¹¹ rad/s (WGS84) 7 292 115 × 10 ⁻¹¹ rad/s (GRS80)	± 0,1 × 10 ⁻¹³ rad/s ± 0,15 × 10 ⁻¹¹ rad/s –
GM	geocentrikus gravitációs állandó (az M tartalmazza a földi atmoszféra tömegét is, a WGS72 kivételével)	3 986 005 × 10 ⁸ m ³ s ⁻² (WGS72) 3 986 005 × 10 ⁸ m ³ s ⁻² (WGS84) 3 986 005 × 10 ⁸ m ³ s ⁻² (GRS80)	± 4 × 10 ⁸ m ³ s ⁻² ± 0,6 × 10 ⁸ m ³ s ⁻² –

rendszer az amerikai tengerészeti navigációs műholdrendszer (Navy Navigation Satellite System, NNSS) műholdjai fedélzeti pályaelemeinek vonatkoztatási rendszereként használták, amelyet a doppleres műholdmegfigyelések hazai hasznosításában Magyarországon mi is alkalmaztunk a geodéziai gyakorlatban (Ádám, 1987 és 1992).

A geodéziai világrendszer 1984. évi változatának (WGS84) létrehozásában az IAG ajánlásaival összhangban a geodéziai vonatkoztatási rendszer 1980. évi megoldásának (GRS80) meghatározó adatait (Moritz, 2000) vették alapul a J_2 kivételével (2. táblázat). Az 1990-es évek folyamán a WGS84 rendszert több lépésben is továbbfejlesztették, azonban ennek ellenére a nevét nem változtatták meg, maradt továbbra is WGS84. A WGS84 megoldás vonatkoztatási koordináta-rendszerét a Nemzetközi Földi Vonatkoztatási Rendszernek (International Terrestrial Reference System, ITRS) előbb az 1991. évi, majd az 1994. évi és végül a 2000. évi (megvalósított) vonatkoztatási koordináta-rendszerével, kerethálójátával (International Terrestrial Reference Frame 1991, 1994, 2000; ITRF91, ITRF94 és ITRF00) hozták összhangba egyre növekvő pontossági szinten. Az ITRS megvalósításait a GPS-holdak ún. precíz pályaelemeinek vonatkoztatására használták, illetve használják (jelenleg az ITRF2005 vonatkoztatási koordináta-rendszert). Az ITRS földi vonatkoztatási rendszert (illetve egyes megvalósulásait) veszik alapul az 1989-ben megalkotott európai földi vonatkoztatási rendszer (European Terrestrial Reference System 1989, ETRS89) és egyes megvalósulásainak létrehozásához (3. táblázat) (Ádám és társai, 2004; Boucher és Altamimi, 1992, 1993 és 1996; Poder, 1992).

A WGS jelű geodéziai világrendszernek a rendelkezésre álló adatok mennyiségének bővülésével és minőségének növekedésével, valamint az adatkiértékelési eljárások pontosításával eddig tehát négy megoldását (WGS60, WGS66, WGS72 és WGS84) dolgozták ki és tették közzé. A WGS84 rendszert eddig három alkalommal továbbfejlesztették (Kumar és Reilly, 2006; Slater és Malys, 1997). Mindezek közel félévszázada szolgálták, illetve szolgálják az USA/DoD egész világra kiterjedő helymeghatározási (geodéziai és térképészeti) tevékenységét, továbbá mindazon (katonai és polgári) intézmények és személyek földmérési és navigációs tevékenységét a világ bármely részén, akik a megfelelő műholdas vevőberendezések (Doppler- és GPS-vevők) birtokában használták és használják a navigációs műholdrendszereket (NNSS, GPS).

3. A WGS84 geodéziai világrendszer jellemzői

A WGS84 geodéziai világrendszer (a fokozatos továbbfejlesztés eredményeként lényegében) egyezményes földi vonatkoztatási rendszer, amely meghatározásánál fogva magában foglalja a Föld normálmalakját és normál nehézségi erőterét meghatározó adatokat (geodéziai vonatkoztatási rendszert jellemző geometriai és fizikai mennyiségeket), a földi vonatkoztatási koordináta-rendszert, ún. geopotenciál modellt a kapcsolódó globális geoidképpel együtt, a WGS84 rendszer és különböző geodéziai dátumok közötti átszámítási (ún. transzformációs) paramétereket és rendelkezik vetületi síkkoordináta-rendszerrel is. Ennek megfelelően a *geodéziai világrendszer*, mint vonatkoztatási alap sajátos helyet foglal el a vonatkoztatási rendszerek körében (Biró, 2002 és 2005).

A WGS84 rendszer megvalósításának (realizációjának) két típusa van:

1. a WGS84 kezdeti (1984. évi) megvalósítása az USA tengerészeti navigációs műholdrendszerének (Navy Navigation Satellite System, NNSS) doppleres műholdmegfigyelésein alapszik, amelyben a vonatkozó műholdkövető-állomások koordinátáinak megbízhatósága $\pm 1-2$ m középphibával jellemezhető (DMA, 1987; Kumar, 1988);
2. 1994-től kezdődően a WGS84 rendszert GPS-mérések felhasználásával továbbfejlesztették, amelynek eredményeként három újabb megvalósulását (realizációját) hozták létre: a) WGS84 (G730), b) WGS84 (G873) és c) WGS84 (G1150) (Kumar és Reilly, 2006; Slater és Malys, 1997).

3.1. A WGS84 kezdeti (1984. évi) meghatározása

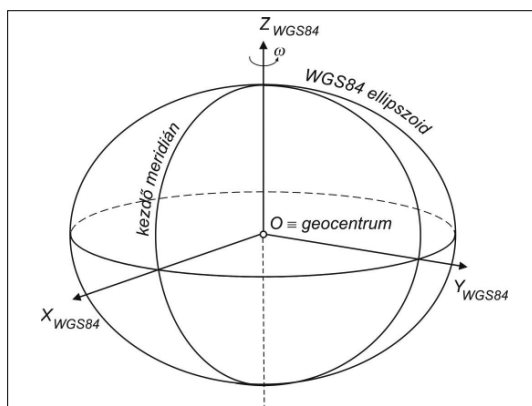
A WGS84 geodéziai vonatkoztatási rendszer kezdőpontja a Föld tömegközéppontjában van, tehát a rendszer geocentrikus (1. ábra). A Z és az X tengelye azonos a BIH (Nemzetközi Időszolgálat) által 1984.0 időpontra meghatározott *egyezményes földi rendszer* (Conventional Terrestrial System = CTS) megfelelő tengelyével. Ennek megfelelően +Z tengelye (Z_{WGS84}) azonos a BIH által 1984.0 időpontra meghatározott *egyezményes földi pólus* (Conventional Terrestrial Pole : CTP) irányával. A +X tengely a Z tengelyre a tömegközépponton merőleges sík és a WGS84 vonatkoztatási meridiánsíkjának metszsvonalában van. A WGS84 vonatkoztatási meridiánsíkja párhuzamos a BIH

által 1984.0 időpontra meghatározott kezdőmeridiánsikkal. A $+Y_{WGS84}$ tengely a $+X_{WGS84}$ és a $+Z_{WGS84}$ tengellyel jobbsodrású rendszert képez.

A WGS84 vonatkoztatási koordináta-rendszereinek alapirányait és kezdőpontjának (a Föld tömegközéppontjával azonos origójának) helyzetét a DoD NNSS-műholdakat követő állomásainak egyezményesen rögzített (elfogadott) koordinátái határozták meg. A koordináta-rendszer gyakorlati megvalósítását az NNSS-műholdak Doppler-méréseinek feldolgozásánál korábban (a doppleres műholdak ún. precíz pályaelemeinek számításánál) alkalmazott NSWC9Z-2 jelű koordináta-rendszer megfelelő módosításával érték el. Így ezt a koordináta-rendszert 1984-ben az ún. CIO-BIH (vagy másképpen a BTS) földi vonatkoztatási rendszerrel hozták összhangba (1–2 m-es pontossági szinten) (Ádám, 1986a és b).

A WGS84 geodéziai világrendszer a Föld geometriájának és nehézségi erőterének meghatározásához viszonyítási alapul geodéziai vonatkoztatási rendszert (GRS) foglal magában. A rendszert meghatározó alapadatok megválasztásához a GRS80 megfelelő alapadatait vették figyelembe (2. táblázat). Kicsiny eltérés csak az egyik paraméter számértékében mutatkozik. A GRS80 J_2 dinamikai alakparamétere (6 számjegyű értéke, $J_2=108263 \times 10^{-8}$) helyett a WGS84-ben a $\bar{C}_{2,0}$ normalizált gömbfüggvény-együtthatót vezették be, melyet a $-J_2/\sqrt{5}$ alakból nyertek 8 számjegyre kerekítve ($-484.16685 \times 10^{-6}$). A $\bar{C}_{2,0}$ számértékének felvételekor a GRS80 rendszerrel történő összhang megteremtése céljából az árapály hatását figyelmen kívül hagyták. A $\bar{C}_{2,0}$ (WGS84) és a J_2 (GRS80) együttható számértékéből származtatott geometriai állandókban parányi eltérés mutatkozik, ezért WGS84 geometriai alapfelülete (melyet így WGS84 ellipszoidnak neveznek) kis mértékben különbözik a GRS80 ellipszoidtól. Mivel a WGS84 és a GRS80 ellipszoid fél nagytengelyének hossza egyenlők egymással, ezért ez az eltérés a fél kistengelyben (b) jelentkezik (a különbség 0.1 mm), ami a lapultságban 1.64×10^{-11} eltérést jelent. Mivel ez az eltérés a Föld bármely felszíni pontjának térbeli derékszögű koordinátaiban maximálisan 0,1 mm különbséget eredményez, ezért a gyakorlati alkalmazásokban a GRS80 és a WGS84 ellipszoid geometriai paramétereit egyenértékűeknek tekinthetők.

A WGS84 rendszer geometriai alapfelülete (a Föld normálalakja) tehát a WGS84 jelű vonatkoztatási ellipszoid, amelyet a WGS84 vonatkozta-



1. ábra

tási koordináta-rendszer kezdőpontjára (a Föld tömegközéppontjára) és koordináta-tengelyeire illesztve (1. ábra) használunk a gyakorlatban. A forgási ellipszoid fél nagytengelyének hossza $a = 6\,378\,137$ m és geometriai lapultsága $f = 1/298.257\,223\,563$ (a GRS80 ellipszoid geometriai lapultsága pedig $1/298.257\,222\,101$).

A Föld valóságos nehézségi erőterének vizsgálata céljából a vonatkoztatási rendszerhez normál nehézségi erőteret rendeltek, amelynek egyetlen ellipszoid alakú szintfelülete éppen a WGS84 forgási ellipszoid (szintellipszoid). A normál nehézségi erőteret meghatározó négy kiinduló adat számértékét a 2. táblázatban tüntettük fel.

A felvett szintellipszoid felszínén a normál nehézségi térerősség eloszlása a

$$\gamma = \gamma_e \frac{(1 + k \cdot \sin^2 \varphi)}{(1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi)^{1/2}} \quad (1)$$

képletből számítható, ahol

- φ az ellipszoidi földrajzi szélesség,
- γ_e a normál nehézségi térerősség egyenlítői értéke az ellipszoid felszínén ($\gamma_e = 978\,032,677\,14$ mGal),
- $k = 0,001\,931\,851\,386\,39$,
- $e^2 = 0,006\,694\,379\,990\,13$.

A WGS84 vonatkoztatási rendszerhez rendelt normál nehézségi erőter potenciálfüggvénye gömbfüggvény-sor alakjában a

$$V(r, \varphi, \lambda) = \frac{GM}{r} \left[1 + \sum_{k=2}^n \sum_{m=0}^k \left(\frac{a}{r} \right)^k (\bar{C}_{km} \cos m\lambda + \bar{S}_{km} \sin m\lambda) \bar{P}_{km}(\sin \varphi) \right] \quad (2)$$

képlettel írható le, ahol

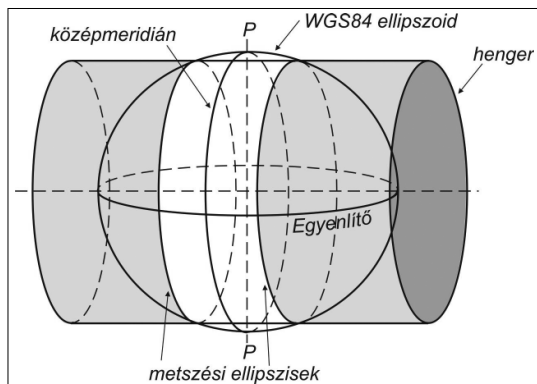
- $V(r, \varphi, \lambda)$ a potenciál értéke az (r, φ, λ) gömbi koordinátákkal jellemzett pontban,

- GM a geocentrikus gravitációs állandó (2. táblázat),
- a a WGS84 ellipszoid fél nagytengelye (2. táblázat),
- $\bar{C}_{mn}, \bar{S}_{nm}$ normalizált gömbfüggvény-együtthatók és
- $\bar{P}_{nm}(\sin \varphi)$ normalizált Legendre-függvények.

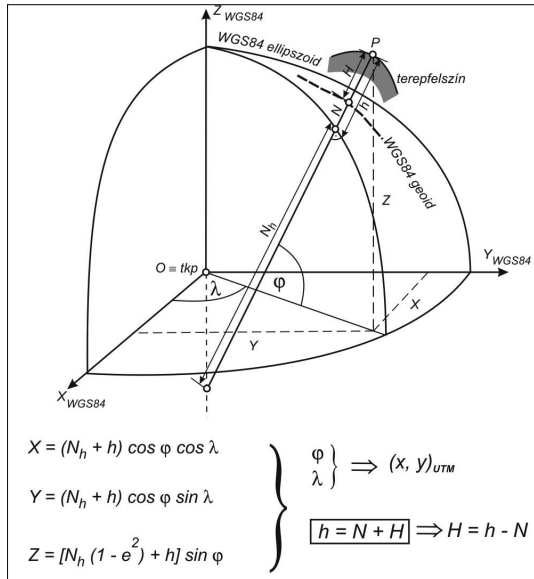
A gömbfüggvénysor együtthatóit $n, m=180$ főkig és rendig határozták meg (összesen 32 755 db számérték), amelyek közül csak az első 355 együttható számértékét tették közzé ($n, m=18$ -ig bezárólag nyilvános, a többi $n, m=19$ és 180 között titkos) (Kumar, 1988). Mivel a gömbfüggvénysor együtthatóinak alkalmazásával származtatható geoidkép 2–6 m-es középhibával jellemezhető, ezért a WGS84 geodéziai világrendszer geopotenciál modelljét később többször továbbfejlesztették.

A WGS84 vonatkoztatási rendszer és a világon alkalmazott legtöbb helyi és regionális geodéziai dátum (koordináta-rendszer) közötti ún. dátumeltolódási paramétereket a DMA meghatározta, és ezek az Interneten is elérhetők a következő címen (NIMA, 1996): [http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/datum/ed-list.html]. 1994-ben a WGS84 és 115 helyi és regionális geodéziai dátum között volt ismert az említett átszámítási együtthatók számértéke. A (DMA, 1987) mű tartalmazza a WGS84 vonatkoztatási koordináta-rendszere és egyes regionális geodéziai dátumok (pl. ED50, NAD27) közötti térbeli polinómos transzformáció összefüggését is a megfelelő együtthatók számértékével együtt.

A WGS84 vonatkoztatási rendszerhez síkvetületi koordináta-rendszert is alkalmaznak. Vetületi rendszere az UTM (Universal Transverse Mer-



2. ábra



3. ábra

cator) (2. ábra). Az UTM vetület magyar nyelvű részletes leírását a Varga(2005) mű is megadja.

A WGS84 rendszerhez kapcsolt geoidfelület (WGS84 geoidkép) és a bevezetett vetületi síkkoordináta-rendszer (UTM) a WGS84 geodéziai világrendszernek széleskörű alkalmazását teszi lehetővé (lényegében ez is volt a cél) (3. ábra).

3.2. A WGS84 rendszer továbbfejlesztései

A WGS84 eredeti változatának fogalmi meghatározását a DMA keretében létrehozott szakértői bizottság dolgozta ki. A WGS84 geodéziai világrendszer meghatározó geometriai és fizikai adatait 1987-ben tették közzé. A WGS84 a WGS72 továbbfejlesztésének eredménye. Mivel a WGS72 továbbfejlesztését egyidejűleg végezték az 1983. évi észak-amerikai geodéziai dátum (NAD83) kidolgozásával, ezért a DMA említett bizottsága intenzív szakmai megbeszéléseket folytatott az USA állami földmérés (National Geodetic Survey, NGS) megfelelő bizottságával. Ez a szoros szakmai kapcsolat biztosította azt, hogy mindkét vonatkoztatási rendszert (NAD83 és WGS84) geodéziai szempontból helyesen határozták meg. 1992 körül a DMA elhatározta, hogy a WGS84 pontosságának növelése céljából szükséges továbbfejlesztésbe is tudományos szakértőket vonjon be. Azonban erre nem került sor, így a WGS84 későbbi három változatának meghatározásába (1994-ben, 1996-ban és 2001-ben) – a

tudományos szakemberek nélkülözése miatt – hiányosságok csúsztak be (Kumar és Reilly, 2006).

A WGS84 rendszert eredetileg a CIO-BIH (ill. a BTS) földi vonatkoztatási rendszerrel összhangban határozták meg az 1984.0 kezdeti időpontra (epochára; Reference Epoch 1984.0, RE84.0). Ehhez az NNSS-műholdakra végzett Dopplermérések adatait vették alapul. A WGS84 rendszer meghatározó adatainak közzétételekor (1987-ben) az elérhető megbízhatóság $\pm 1\text{--}2\text{m}$ középhibával volt jellemezhető, ezért az IAG 1983. évi ajánlásai között szereplő árapály-korrekciókat még nem vették figyelembe. Azonban 1988 és 1994 között számos vizsgálat kimutatta, hogy a doppleres és a GPS műholdmegfigyelések alapján meghatározott állomáskoordináták magassági összetevőjében szabályos eltérés mutatkozik. A szabályos eltérés kiküszöbölése és a nagyobb pontosságú GPS-mérésekkel összhangban lévő pontosított WGS84 vonatkoztatási rendszer elérése céljából a DMA elhatározta, hogy követőállomásainak koordinátáit módosítja.

Így 1994-ben a WGS84 koordináta-rendszert pontosították úgy, hogy egyrészt az akkori Nemzetközi GPS Szolgálat (International GPS Service, IGS) keretében működő GPS-követőállomások globális hálózata méréseit felhasználva az ITRF91 koordináta-rendszerrel hozták összhangba, másrészt a nagyobb pontosságot igénylő alkalmazások céljára elfogadták a geocentrikus gravitációs állandóra (GM) az akkori Nemzetközi Földforgási Szolgálat (International Earth Rotation Service, IERS) szabványértékét ($GM = 3\,986\,004.418 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$). Ennek megfelelően egyrészt megváltoztatták a WGS84 vonatkoztatási koordináta-rendszerének térbeli elhelyezését („az ITRF91 koordináta-rendszerhez igazították”), másrészt a WGS84 geodéziai vonatkoztatási rendszerét is módosították, mivel a meghatározó négy számadat (2. táblázat) közül a GM számértéke kissé változott a kezdeti értékhez viszonyítva ($-0.582 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$).

A WGS84 vonatkoztatási koordináta-rendszerének összhangba hozását az ITRF91-el a következőképpen érték el. A WGS84 koordináta-rendszert gyakorlatban megvalósító 10 DoD-követőállomás és az ITRF91-et megvalósító 24 IGS-állomás GPS-méréseinek együttes feldolgozása alapján meghatározták a 10 DoD-állomás módosított (új WGS84 : ITRF91) koordinátáit úgy, hogy 8 IGS állomás ITRF91-rendszerbeli koordinátáit rögzítettnek vették. Az ún. Nuvel NNR-1 táblamozgási modell adatait használták fel arra, hogy

a 10 DoD-állomás WGS84-rendszerbeli (1984.0 epochára vonatkozó) koordinátáit az ITRF91 koordináta-rendszer kezdeti időpontjára (1988.0 epochára) számítsák át.

1992-ben az IERS a vonatkozó szabványában a GM geocentrikus gravitációs állandó értékére új (pontosabb) számértéket fogadott el ($GM = 3\,986\,004.418 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$). Az új érték és az eredeti WGS84 érték használatán alapuló számítások összehasonlítása azt mutatja, hogy az eredeti érték (2. táblázat) mintegy 1,3 m-es sugárirányú hibát okozott (a DMA és a Légierő intézményeiben számított) GPS-pályák adataiban. Ezért az említett két intézmény a nagyobb pontosságú pályaszámításban az IERS szabványában szereplő GM-értéket fogadta el és használja (Slater és Malys, 1997).

3. táblázat

S	az ITRS		az ETRS89 kerethálózatai
	kerethálózatai	vonatkoztatási időpontjai	
1	ITRF88	1988.0	
2	ITRF89	1988.0	ETRF89 (= ITRF89)
3	ITRF90	1988.0	ETRF90
4	ITRF91	1988.0	ETRF91
5	ITRF92	1988.0	ETRF92
6	ITRF93	1988.0	ETRF93
7	ITRF94	1993.0	ETRF94
8	ITRF96	1993.0	ETRF96
9	ITRF97	1997.0	ETRF97
10	ITRF00 (ITRF2000)	1997.0	ETRF00 (ETRF2000)
11	ITRF05 (ITRF2005)	2000.0	ETRF05 (ETRF2005)

Így az említett GPS-mérések és az alkalmazott megbízhatóbb geocentrikus gravitációs állandó (GM) értéke alapján a WGS84 vonatkoztatási rendszert pontosították. A vonatkoztatási rendszer új megvalósítását *WGS84 (G730)*-al jelölik, amelyben a G betű a GPS-technika alkalmazására, a 730 pedig a GPS-hét számára utal, arra az időpontra, melytől (1994. január 2.) kezdve a DMA az új koordinátákat a GPS-műholdak pályaelemeinek számításaiban alkalmazza.

A WGS84 első továbbfejlesztett változatát az 1988.0 kezdeti időpontra (RE88.0) vonatkozó ITRF91 vonatkoztatási koordináta-rendszerrel hozták összhangba. Azonban a DMA a vonatkoztatási epochát (RE88.0) helytelenül 1994.0-ra

(RE94.0) változtatta. Ennek következtében kis mértékben változott a koordináta-rendszer kezdőpontja és tengelyirányai, így a WGS84(G730) az eredeti WGS84-rendszertől geodéziai szempontból eltérő koordináta-rendszert valósít meg. Gyakorlati célokra (helymeghatározás, navigáció, térképezés) a kettő azonosnak tekinthető. Az ITRS első hat kerethálózatát (ITRF88, ITRF89, ITRF90, ITRF91, ITRF92 és ITRF93, 3. táblázat) az 1988.0 epochára (RE88.0) valósították meg. Mivel az ITRF93 koordináta-rendszer az 1993. év végéig végzett geodéziai mérések felhasználásán alapul és ezért az ITRF93-at csak 1994-ben határozták meg, így a DMA-nak nem lett volna lehetősége a WGS84(G730) változatot definiálnia, melyet 1994. január 2-án kezdődő hétre (730. GPS-hét) vonatkozó GPS-adatok felhasználásával valósították meg (*Kumar és Reilly, 2006*).

Mivel a DMA (NIMA) által működtetett GPS-követőállomások száma közben bővült, ezért a teljes hálózat pontjainak állomáskoordinátáit 1996-ban újból meghatározták az 1994. évi eljáráshoz hasonló módon úgy, hogy a WGS84 koordináta-rendszert az ITRF94 koordináta-rendszerrel hozták összhangba. Ezúttal a DoD-követőállomásokon kívül 18 IGS-állomás GPS-méréseit vették alapul és az együttes feldolgozás alkalmával a 18 IGS-állomás közül 11-nek az ITRF94-rendszerbeli koordinátáit rögzítették. A vonatkoztatási rendszer újabb megvalósítását *WGS84 (G873)*-al jelölik, mivel az új állomáskoordinátákat a NIMA 1996. szeptember 29-től (873. GPS-hét) alkalmazta (az amerikai légierő pedig 1997. január 29-től). A szóban forgó két vonatkoztatási koordináta-rendszerben meghatározott állomáskoordináták mintegy 5 cm-en belül egyeznek egymással (*Slater és Malys, 1997*).

A WGS84 geopotenciál modelljét is pontosították. Ehhez az EGM96 elnevezésű geopotenciál modellt és a kapcsolódó geoidfelületét vették alapul. A WGS84 új geopotenciál modelljét és geoidfelületét az EGM96 gömbfüggvénysor és WGS84 paramétereinek felhasználásával nyerték, amely $15^\circ \times 15'$ méretű rácsháló sarokpontjaira számított geoidundulációk formájában áll rendelkezésre (*Lemoine és társai, 1998*). Az új geoidkép megbízhatóságát $\pm 0,5-1$ m-re becsülik.

A WGS84 geodéziai világrendszer második továbbfejlesztett változatának 1996. évi kidolgozásakor az 1993.0 epochára (RE93.0) vonatkozó ITRF94 jelű koordináta-rendszert vették alapul.

Az ITRF96 (RE93.0) még nem állt rendelkezésre. Azonban a DMA (NIMA) illetékes szakemberei ismételen helytelenül az ITRF94-et meghatározó kezdeti időpontot (RE93.0) 1997.0 epochára (RE97.0) módosították, amelynek eredménye az lett, hogy a WGS84(G873) az előző kettőtől kissé eltérő koordináta-rendszert valósít meg. Ezen túlmenően a NIMA szakemberei önkényesen árapály-mentes Földet alkalmaztak és figyelmen kívül hagyták az IAG 1983. évi ajánlását és az IERS 1996. évi szabványát (amely az ún. zero-tide modell alkalmazását ajánlja).

A NIMA szakemberei 2001-ben is továbbfejlesztették a WGS84-et, amelynek során az 1994-ben és 1996-ban követett eljárást alkalmazták. A WGS84 újabb megvalósítását *WGS84(G1150)*-el jelölik. Az újabb változat létesítésekor az 1997.0 epochára (RE97.0) vonatkozó ITRF2000 koordináta-rendszert vették alapul. A NIMA szakemberei ismételen helytelenül a kezdeti időpontot 1997.0 epocháról 2001.0-ra (RE01.0) változtatták meg, amelynek eredménye az lett, hogy a WGS84(G1150) az előző háromtól kissé eltérő koordináta-rendszert valósít meg (a szabatos geodéziai helymeghatározás szempontjából). Továbbra is az árapály-mentes Földre vonatkozó modellt tartották meg, valamint nem a szélsőpontosság eléréséhez szükséges korszerű kiegyenlítési eljárást alkalmaztak (*Kumar és Reilly, 2006*).

Megjegyezzük, hogy a G730, G873 és a G1150 megjelölés arra a GPS-hétre utal, amely hétre vonatkozó mérési adatokat használtak az adott továbbfejlesztett változat létrehozására. Mivel az említett „azonosítók” nem kapcsolódnak egyetlen meghatározó epochához sem, ezért ezeknek nincs geodéziai jelentőségük.

4. Összefoglalás

A WGS84 rendszer az 1990-es évek elején csak 1–2 m-re volt összhangban az ITRS és az ETRS89 vonatkoztatási rendszerrel (illetve ezek különböző megvalósulásaival). 1994-ben a WGS84 pontosságát olyan szintre emelték, hogy az összhang az ITRS földi vonatkoztatási rendszer 1991. évi megvalósulásával (ITRF91) mintegy 10 cm-re tehető. Az ITRS 1994. évi realizációjával (ITRF94) 1996-tól már 5 cm-es szinten tekinthető egymással azonosnak a WGS84 és az ITRF94 (valamint az ITRF96 és ITRF97), 2001-től ezt az összhangot már 1–2 cm-re becsülik (*4. táblázat*). Így az említett pontossági szinteken a WGS84-ben kife-

4. táblázat

S	A WGS84 rendszer		ITRS realizáció, mellyel a WGS84 rendszert összhangba hozták	Az összhang elért mértéke
	módosított változata	a módosítás időpontja		
1	WGS84 (G730)	1994. január	ITRF91 (RE94.0)	~ 10 cm
2	WGS84 (G873)	1997. január	ITRF94 (RE97.0)	~ 5 cm
3	WGS84 (G1150)	2001. január	ITRF00 (RE01.0)	~ 1-2 cm

jezett állomáskoordináták az ITRS realizációiban (ITRFyy) kifejezetekkel azonosnak tekinthetők, azzal a megjegyzéssel, hogy az ITRS realizációi nagyobb megbízhatóságúak (\pm néhány mm), mint a WGS84 továbbfejlesztett változatai. Figyelembe véve egyrészt az ITRS és a WGS84 közötti kapcsolatot, másrészt az ITRS és az ETRS89 közötti különbséget, megállapítható, hogy az ETRS89 és a WGS84 néhány dm-es szinten egymással azonosnak tekinthető. Így a geodéziai alkalmazások többségében a WGS84 rendszer használata is elegendő, az ITRS (ITRFyy) rendszerhez, illetve még az ETRS89 (ETRFyy) koordinátákhoz viszonyított eltérések is elhanyagolhatók (különösen a térinformatikai alkalmazások, valamint a navigáció és a térképészet területén). Szabatos geodéziai feladatok esetében már nem (Borza és társai, 2007).

A WGS84 legújabb változatának (WGS84 (G1150)) fogalmi meghatározása több pontatlanságot is tartalmaz. Egyrészt nem alkalmazkodik az IAG 1983. évi ajánlásában foglaltakhoz (ami az árapály hatásainak figyelembevételét illeti) és vonatkoztatási időpontja sem egyértelmű, másrészt a GPS-követőállomások hálózatának kiegyenlítéséhez statisztikai szempontból nem a legkorszerűbb eljárást használták. A WGS84 rendszernek geodéziai szempontból helyes fogalmi meghatározása alapvető fontosságú lenne a GPS-technikával történő szabatos geodéziai helymeghatározás céljából (Kumar és Reilly, 2006).

Az utóbbi két-három évtized folyamán a földparaméterek (Földünk alapvető csillagászati, fizikai, geometriai és mechanikai paraméterei) számszerű értékében lényeges változás nem volt és nem is várható (viszont megbízhatóságuk nő) (Grotten, 2004a és b). Ezért az IAG illetékes munkabizottságai az IAG legutóbbi általános közgyűlésén (Perugia, 2007) sem javasoltak semmilyen változtatást a jelenleg érvényben lévő geodéziai vonatkoztatási rendszereket [GRS80 és WGS84(G1150)] meghatározó paraméterek számértékében.

A WGS84 geodéziai világrendszert a katonai (USA/DoD, NATO) (STANAG, 1991) és a polgári élet számos területén (pl. az európai polgári repülésügyi szervezet: EUROCONTROL, a Nemzetközi Hidrográfiai Szervezet: IHO, stb) alkalmazzák. Hazai viszonylatban mind a katonai, mind a polgári (Borza, 1998) földmérési gyakorlatban egyaránt használjuk. Az ország NATO-hoz csatlakozása miatt katonai célokra a WGS84 rendszert használják. Így a VTopo-25 adatbázis kialakításánál a WGS84 geodéziai világrendszert alkalmazzák vonatkoztatási alpnak (Alabér és társai, 2008).

A WGS84 geodéziai világrendszert továbbfejlesztik, mert pontosított geopotenciál modelljének (WGS84 geoidkép) megalkotásával napjainkban is foglalkoznak. Ehhez az NGA által ez évben közzétett EGM2008 geopotenciál modell együttműködését használják fel (NGA, 2008). A geopotenciál modell gömbfüggvény-együtthatóit $n, m=2159$ fokig és rendig határozták meg, valamint további tagok számértékét is fokszám szerint $n=2190$ -ig ($m=2159$ mellett). A geoidunduláció értékei a WGS84 módosított geodéziai vonatkoztatási rendszerre vonatkoznak. A gyakorlati alkalmazás céljára az említett együtthatók mellett két adatbázist is rendelkezésre bocsátanak: a) $1' \times 1'$ -es és b) $2.5' \times 2.5'$ -es méretű rácsháló sarokpontjaira az EGM2008 geopotenciál modell alapján számított geoidunduláció értéket a megfelelő interpolációs programmal együtt, amelyek az Interneten is elérhetők a következő címen: <http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/index.html>. Várható továbbá, hogy a jövőben a WGS84 jelenlegi változatának (WGS84(G1150)) vonatkoztatási koordináta-rendszerét igazítani fogják az ITRS valamely későbbi megvalósításához (kerethálózatához) (Slater, 2007).

Megjegyezzük, hogy a GLONASSZ elnevezésű globális navigációs műholdrendszer holdjai által sugárzott fedélzeti pályaelemek PZ-90 jelű vonatkoztatási rendszerét (a vonatkozási el-

lipszoid geometriai adatai: $a=6\,378\,136$ m és $f=1/298.257\,839\,303$) is a WGS84 rendszerhez hasonló módon alkották meg (Boucher és Altamimi, 2001). Az elmúlt évben a PZ-90 rendszert módosították (PZ-90.02) úgy, hogy vonatkoztatási koordináta-rendszerét az ITRS legutóbbi realizációjával hozták összhangba (Slater, 2007). Várható, hogy a tervezett többi globális és regionális navigációs műholdrendszer (az európai GALILEO, a kínai COMPASS, stb.) vonatkoztatási rendszerét is az ITRS alapulvételével hozzák majd létre.

IRODALOM

- Alabér, L. – Fórián-Szabó, M. – Kovács, E. (2008): A VTopo-25 adatbázis. *Geodézia és Kartográfia*, 60(2008), 5-6(28–34).
- Ádám, J. (1986a): A kozmikus geodézia koordináta-rendszerei. *Geodézia és Kartográfia*, 38, 2(84–92).
- Ádám, J. (1986b): A földi koordináta-rendszer meghatározása kozmikus geodéziai módszerek kombinált alkalmazásával. „Modern mérési eljárások a geodéziában” című továbbképző szeminárium (Sopron, 1986. május 22–23.) *gyűjteményes kötete*, 97–114. old., Sopron, 1986.
- Ádám, J. (1987): A műholdas Doppler-technika szerepe geodéziai alaphálózatunk továbbfejlesztésében. *Geodézia és Kartográfia*, 39(1987), 3(174–183).
- Ádám, J. (1992): Geodéziai alaphálózatunk, továbbá a doppleres és a stelláris háromszögelési hálózataink vonatkoztatási rendszerének összhangja. *Geodézia és Kartográfia*, 44(1992), 2(85–92).
- Ádám, J. – Bányai, L. – Borza, T. – Busics, Gy. – Kenyeres, A. – Krauter, A. – Takács, B. (szerk.) (2004): *Műholdas helymeghatározás*. Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2004.
- Biró, P. (1972): A geodéziai alapfelületek. *Geodézia és Kartográfia*, 24, 6 (401–412).
- Biró, P. (1985): *Felsőgeodézia* (BME egyetemi jegyzet). Tankönyvkiadó, 1985.
- Biró, P. (2002): Kozmikus geodéziai alapfogalmaink újragondolása. *Geomatikai Közlemények*, V. kötet, 7–24 oldal, Sopron, 2002.
- Biró, P. (2005): A vonatkoztatási rendszerek és a geodéziai dátum. *Geomatikai Közlemények*, VIII. kötet, 5–12 oldal, Sopron, 2005.
- Borza, T. (1998): Elkészült az országos GPS-hálózat. *Geodézia és Kartográfia*, 50(1998), 1(8–13).
- Borza, T. – Kenyeres, A. – Virág, G. (2007): Műholdas geodéziai vonatkoztatási rendszerünk (ETRS89) felújítása. *Geodézia és Kartográfia*, 59(2007), 10-11(40–48).
- Boucher, C. – Altamimi, Z. (1992): The EUREF Terrestrial Reference System and its First Realizations. *IAG EUREF Publication No.1*, pp. 205–213, München, 1992.
- Boucher, C. – Altamimi, Z. (1993): The Realization of the EUREF Terrestrial Reference System. Paper presented at the IAG General Meeting, Beijing, China, 6–13 August, 1993.
- Boucher, C. – Altamimi, Z. (1996): International Terrestrial Reference Frame. *GPS World*, pp. 71–74, September 1996.
- Boucher, C. – Altamimi, Z. (2001): ITRS, PZ-90 and WGS84: current realizations and the related transformation parameters. *Journal of Geodesy*, 75(2001), 11(613–619).
- DMA (1987): Department of Defense World Geodetic System 1984 – Its Definition and Relationships with Local Geodetic Systems. *DMA TR 8350.2*, Washington, DC, 30 September 1987.
- Groten, E. (2004a): Fundamental Constants and their Implications, *AVN*, 4/2004, pp. 122–127.
- Groten, E. (2004b): Fundamental Parameters and Current (2004) Best Estimates of the Parameters of Common Relevance to Astronomy, Geodesy, and Geodynamics. *The Geodesist's Handbook 2004 – Journal of Geodesy*, Vol. 77 (2004), No. 10–11, pp. 724–731.
- Kumar, M. (1988): World Geodetic System 1984: A Modern and Accurate Global Reference Frame. *Marine Geodesy*, Vol. 12, pp. 117–126, 1988.
- Kumar, M. – Reilly, J.P. (2006): Is definition of WGS84 correct? A Geodetic Analysis. (<http://www.mycoordinates.org>).
- Lemoine, F.G. és társai (1998): The Development of the Joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM96. NASA/TP-1998-206861, NASA GSFC, Greenbelt, Maryland, July 1998.
- Moritz, H. (2000): Geodetic Reference System 1980. *The Geodesist's Handbook 2000 – Journal of Geodesy*, 74 (2000), 1 (128–133).
- NGA (2008): Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)- WGS84 Version. (<http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/index.html>).
- NIMA (1996): Reference Ellipsoids and Geodetic Datum Transformation Parameters (Local to

WGS84) from NIMA 8350.2 4 July 1977 and MADTRAN 1 October 1996. (<http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/datum/edlist.html>)

Poder, K. (1992): A note on the EUREF System. *IAG EUREF Publication No. 1.*, pp. 112–115, München, 1992.

Seppelin, T.O. (1974): The Department of Defense World Geodetic System 1972. *The Canadian Surveyor*, Vol.28(1974), No. 5 (496–506).

Slater, J.A. (2007): Terrestrial Reference Systems for Global Navigation Satellite Systems. Paper presented at the National Space-Based PNT Advisory Board meeting, NGA, October 4, 2007.

Slater, J.A. – Malis, S. (1997): WGS84-Past, Present and Future. *IAG Symposia Vol.118* („Advances in Positioning and Reference Frames”, IAG Scientific Assembly, Rio de Janeiro, September 3–9, 1997.), Ed. By F.K. Brunner, Springer-Verlag, pp. 1–7, 1997.

STANAG (1991): Geodetic Datums, Ellipsoids, Grids and Grid References. NATO Standardization Agreement, STANAG No. 2211 (Edition 5).

Varga, J. (2005): A vetületnélküli rendszerektől az UTM-ig. Elektronikus jegyzet, BME,

(http://www.agt.bme.hu/staff_h/varga/Osszes/Dok3ujj.htm).

The World Geodetic System 1984 (WGS84) and its Updates

Ádám, J.

Summary

The World Geodetic System 1984 (WGS84) was developed by the Defense Mapping Agency (DMA) of the US Department of Defense (DoD) and was released in September 1987. In the frame of the world geodetic system as a reference base, the following four versions were developed: WGS60, WGS66, WGS72 and WGS84, each successively more accurate. However, for accuracy enhancement it was decided to carry out update of the WGS84 in the early of 1990's. As a result, three subsequent updated versions of 1994, 1996 and 2001 were established to date, creating the following updates of the WGS84: *a)* WGS84 (G730), *b)* WGS84(G873) and *c)* WGS84 (G1150). This paper outlines the geodetic details of the original definition of WGS84 as well as the three updates.

www.gnssnet.hu
GNSS Szolgáltató Központ

Valós idejű helymeghatározás:

- Egybázisos
 - DGPS korrekciók (országosan)
 - RTK korrekciók (36 állomásról)
- Hálózati RTK korrekciók (az ország 95%-án)

Utólagos adatfeldolgozás:

- Tetszőleges rögzítési gyakoriságú RINEX adatok
- Tetszőleges rögzítési gyakoriságú virtuális RINEX adatok

FŐI KOZMIKUS GEODÉZIAI OBSZERVATÓRIUM
Tel.: 27/374-980
Fax: 27/374-982