

A Global Positioning System (GPS) a geodinamikai kutatások nélkülözhetetlen és rendkívül hatékony eszköze, melyet az 1990-es évek elejétől sikeresen alkalmaznak számos aktív tektonikájú területen.

E cikkben a szerző két eltérő geológiai helyzetű terület GPS programja keretén belül végzett munkája alapján foglalja össze a GPS geodinamika mérési, feldolgozási és interpretációs folyamatát.

Bemutatásra kerül a Pannon-medence vizsgálatát célul kitűző Magyar GPS Mozdásvizsgáló Program (GPS-MP) eddigi 3 epocháját felölelő GPS adatanalízis eredménye, továbbá áttekintés az értelmezési rendszerről és a deformációanalízis néhány előzetes eredményéről.

Szintén bemutatásra kerül — elsősorban az értelmezés kiegészítése céljából és összehasonlításként — egy új-zélandi példa, az Ausztráliai és Pacifikus lemezhatár közelében elhelyezkedő Raukumara régió nagyságrenddel nagyobb deformációs viszonyait vizsgáló GPS kampány.

Gy. GRENERCZY: Recent tectonic investigations based on GPS measurements

The Global Positioning System (GPS) technique is an essential and powerful tool for geodynamic investigations and has been successfully used in several tectonically active regions since the beginning of the nineties.

In this paper the author summarises surveys, processing and interpretation procedures of GPS geodynamics on the basis of his work in the framework of GPS projects from two geologically highly different areas.

Results of the GPS data analysis of 3 epochs of the Hungarian GPS Geodynamic Project aimed at investigating the Pannonian basin are presented. Furthermore an overview is given about the evaluation system, and some preliminary results of the deformation analysis are also presented.

As a complement of the interpretation and for comparison a New Zealander example, a GPS campaign from the vicinity of the Australian-Pacific plate boundary investigating the features of ten times bigger deformation of the Raukumara Region will also be discussed.

1. Bevezetés

A cikkben a fő hangsúlyt a Magyar Mozdásvizsgáló Program (GPS-MP) jelenlegi helyzetének, legújabb eredményeinek bemutatására helyezzük, de mindemellett az e területen egyik legtapasztaltabb és legintenzívebben kutató ország, Új-Zéland egy geodinamikai programját is áttekintjük, összehasonlítást teszünk, teljesebbé téve ezzel a GPS geodinamika eljárásainak megismerését és előrevetítve várható eredményeit. A különbségek elsősorban a nagyságrenddel nagyobb deformációs sebességnek tudhatók be és jelentkeznek a mérés, kisebb mértékben a feldolgozás és az adatanalízis terén. Ezeket minden fejezet végén tárgyaljuk.

A Magyar Mozdásvizsgáló Program az Eurázsiai litoszféra lemezen belül elhelyezkedő Pannon-medence recens tektonikájának, deformációs viszonyainak jobb megértését célozza. A Magyar Geodinamikai Referencia Hálózatot (HGRN) FEJESÉK tervezték [FEJES et al. 1993] és hozták létre a precíz

GPS technikára alapozott deformáció mérésére 1990-ben. A hálózat első mérésére 1991-ben került sor, melyet két további kampány követett 1993-ban és 1995-ben. Követve a kétévenkénti újramérést, ez év júniusában a HGRN97 következett, melynek feldolgozásán a szerző jelenleg még dolgozik. Hazánk viszonylag nyugodt tektonikája miatt különös figyelmet kellett szentelni az eredményeink valós pontosságának. A várható relatív sebességeket előzetesen 1–2mm/év körülirek becsülték, így a lehető legpontosabb mérési és feldolgozási eljárásokat használtuk. Kiterjedt adatanalízisre volt szükség az eredmények interpretálása előtt.

Három kampány adatait (1991, 1993 és 1995) dolgoztuk fel és végeztük el azok adatanalízisét. Minden vektort külön megvizsgáltunk az adatminőség alaposabb meghatározása és realitás pontosság megállapítása érdekében. A troposzféraparaméter becslésének hatását, a formális hibák és valamennyi pont koordinátájának pontosságát szintén meghatároztuk.

Az eredmények értelmezése során a sebesség és a deformációs tér meghatározását két különböző módszerrel végezzük: az egyidejű redukció

¹ Beérkezett: 1997. október 27-én

² ELTE Geofizikai Tanszék, H-1083 Budapest, Ludovika tér 2.

módszerével és az ún. direkt eljárással. A véges elem és az egyidejű redukció módszert használjuk a deformációs paraméterek számítására. Az előzetes vizsgálatok feltárták, hogy a Pannon-medencében az átlagsebességek nagyobbak a vártnál, és már két év után több pont szignifikáns elmozdulást mutat. A deformációs jelleg alátámasztani látszik a Pannon-medence reaktiválódott tektonikáját.

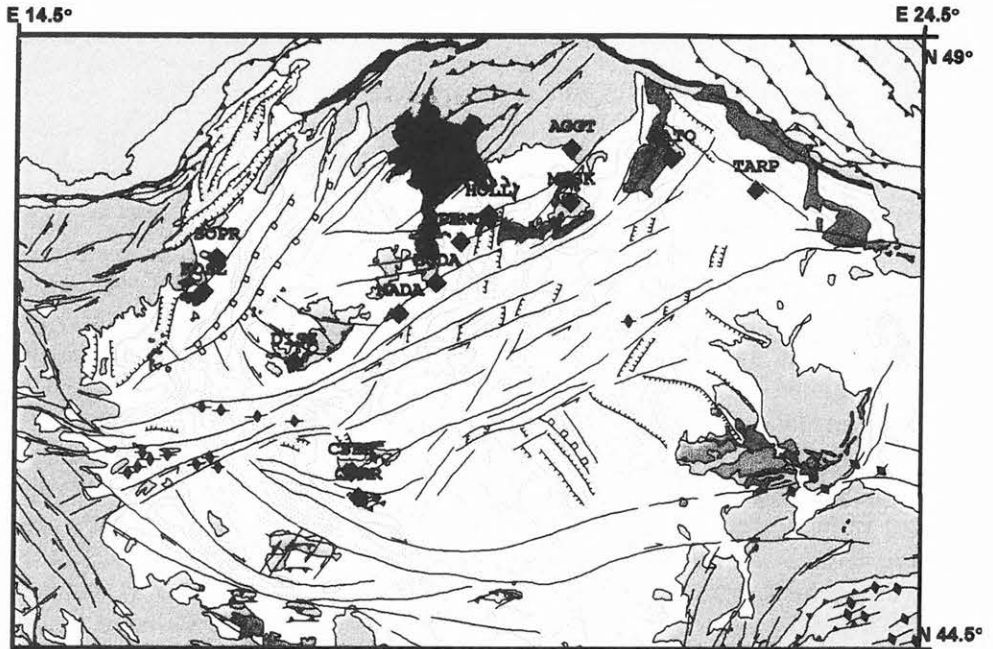
Az új-zélandi projekt keretén belül az Északi-sziget északkeleti részének, a Pacifikus és Ausztráliai szubdukciós lemezhatár közelében lévő Raukumara régió tektonikus deformáció vizsgálatában két GPS kampány mérését végezték el 1995-ben és 1997-ben. Ezek feldolgozásával ez év nyárára készültünk el. Az elmozdulások nagyságrenddel felülmúlják a hibahatárokat, így részletes adatanalízisre nem volt szükség, és az igen aktív tektonika már az értelmezést is lehetővé tette.

2. Tektonikai áttekintés

A Pannon-medence keletkezése 25–20 millió évvel ezelőtt kezdődött a késő oligocénben és a korai miocénben a Keleti-Alpok korábban orogén, kontinentális, ütközéses zónájának extenziós kollapszusával, melyet az ütközéses zónából kiszökő tektonikai egység északkeleti mozgása okozott, mialatt a mai Keleti-, Északkeleti-Kárpátok gyenge litoszférával rendelkező területe egy nyugatra alámerülő szubdukción ment keresztül, felhalmozva a korábban lerakódott Moldáviai flist és előtér molasszt [HORVÁTH 1993]. Későbbi tanulmányok [HORVÁTH, CLOETINGH 1996] azt mutatják, hogy a Pannon-medence tektonikai stílusa néhány millió évvel ezelőtt a késő

pliocén és a kvarter során megváltozott, mert a felgyűrt él ütközött a Teisseyre–Tornquist zónával, a Kelet-európai Prekambriumi Masszívum előterével, és a szubdukció, amely a tengeri medence gyenge kérgét teljesen felélte, véget ért. Fúrólukak breakout analízise és földrengés fókuszmechanizmus megoldások alapján GERNER et al. [1996] úgy vélik, hogy a medence ezen blokkolódása új deformációs és feszültség jelleget eredményezett, melyet Európa és Afrika közeledése, közelebről az Adriai mikrolemez mozgása irányít. A Magyar Mozgásvizsgáló Program értelmezése során számított deformációs és sebességtér végső bizonyítékot szolgáltathat a Pannon-medence recens tektonikáját illetően.

Az 1. ábrán a GPS állomások elhelyezkedése látható a medence neogén tektonikai térképén. A hálózat pontjainak kiválasztása úgy történt, hogy a medence minden területe képviselve legyen, bár néhány kompromisszum szükséges volt a kívánt nagy pontosság miatt, így több geológiai, geofizikai megfontolás mellett a GPS pontokat a pretercier medencealjzat kibúvásaira telepítették, üledékre pedig nem kerültek pontok [GAZSÓ et al. 1992].



1. ábra. A Pannon-medence és környéke tektonikai térképe a HGRN GPS pontjainak feltüntetésével

○ Előter molassz ○ Flis ○ Preneogén kőzetek
● Neogén felszíni vulkáni kőzetek

Fig. 1. Tectonic map of the Pannonian basin and its surroundings with the HGRN GPS sites

○ Molasse foredeep ○ Flysch nappes ○ Pre-Neogene rocks ● Neogene outcropping volcanic rocks

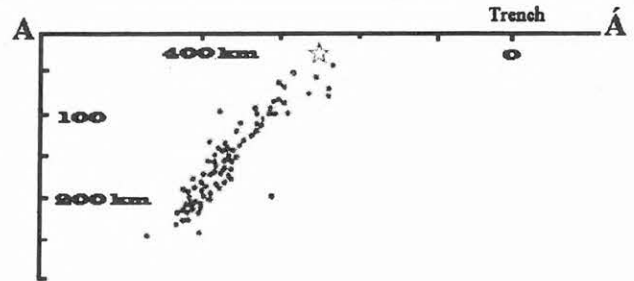
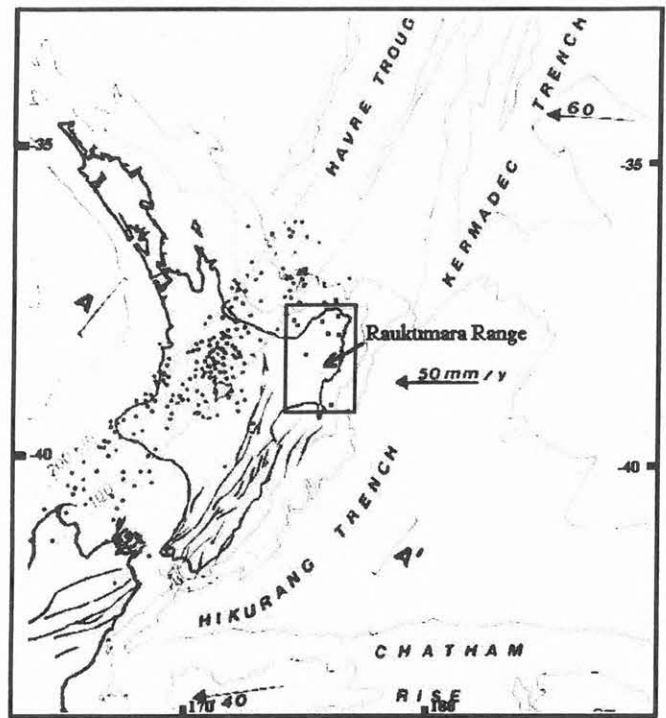
Jelenleg is zajló szubdukció játszódik le azonban az új-zélandi vizsgált terület alatt. A Raukumara régió az Ausztráliai litoszféra lemezen fekszik, és igen aktív recens tektonika helyszíne. A Pacifikus lemez évenként 5 cm-es, közel nyugati irányú relatív sebességgel közeledik, és a kutatott területtől 200–250 km-rel keletre a Hikurang ároknál kis szögben az Ausztráliai lemez alá bukik (2. ábra). A Pacifikus lemez szubdukciója az Északi-sziget keleti területei alatt kb. 50 km-es mélységben meredekséget vált, és kb. 45°-os szögben tart az asztenoszféra felé, amely a 2. ábra alján a Benioff-zóna alakjából jól látható [WALCOTT 1978].

A terület szeizmikusan is rendkívül aktív. A század elején két igen erős földrengés is meg-rázta: a Richter-skála szerinti 7,9-es magnitúdójú, 15 km fókuszmélységű Hawke's Bay-i rengés, melyet számos nagy (7,3-as) utóregés is követett, illetve a Wairoai földrengés, amely 6,8-as magnitúdójú, szintén sekély rengés volt. Természetesen az ország intenzív kutatás tárgya, és a Raukumara régió területén korábbi geodéziai eszközökkel, elsősorban háromszögeléssel, végzett recens deformációs tanulmányoknak is nagy hagyományuk van [WALCOTT 1978].

3. GPS adatanalízis

3.1 Az adatok

A HGRN hálózat 13 GPS pontból áll. Egyikük, Penc, amely 1996 óta permanens állomás-ként működik, a Kozmikus Geodéziai Observatórium tetejére telepített pontjellel rendelkezik. A többi 12 állomásnak vagy beton építménye van sárgaréz adapterrel, vagy az adaptert közvetlenül a szálkőzetbe fűrték [FEJES 1991]. A HGRN kampányok mérésére vonatkozó legfontosabb adatokat: időpontokat, mérési periódusokat és a használt ve-



2. ábra. Új-Zéland Északi-sziget és a Raukumara régió térképe a földrengés epicentrumok és az aktív vetők, illetve a relatív sebességek feltüntetésével. Alul a terület alatt húzódó Benioff-zóna képe [WALCOTT 1978]

Fig. 2. Map of the North Island, New Zealand showing the Raukumara Region with the earthquake epicenters, active faults and relative velocities. Down, the Benioff zone beneath the area [WALCOTT 1978]

vőtípusokat az alábbi táblázat tartalmazza, feltüntetve még a feldolgozáskor használt műholdpályákat is.

Kampányok	HGRN91	HGRN93	HGRN95	HGRN97
Időpontjai	1991. november 5-9.	1993. május 4-6.	1995. augusztus 8-11.	1997. június 18-21.
Vevőtípusok	Trimble 4000SST	Trimble 4000SSE Trimble 4000SST Geotracer 100	Trimble 4000SSE Trimble 4000SST Rogue SNR-8000	Trimble 4000SST Trimble 4000SSE Trimble 4000SSI Rogue SNR-8000
Mérési periódusok	2x12 óra K-i országrész 2x12 óra Ny-i országrész	3x12 óra egyidejű észlelés	3x24 óra egyidejű észlelés	3x24 óra egyidejű észlelés
Műholdpályák	CIGNET pálya, ld.3.2.	IGS CODE pálya, ld.3.2.	IGS CODE	IGS CODE

Az 1997-es Raukumara GPS kampány felmérése 1997. február 3–11. között történt, és a HGRN kampánnyal ellentétben nem egy időben mérték az összes pontot, nem használtak négyzetelős (SST) vevőket, az egyes pontok mérési ideje nem egyező, és a pontok többségének nem volt több napi észlelése. A különbségek érthetőek, amennyiben figyelembe vesszük, hogy a deformációs sebesség nagyságrenddel nagyobb, a kampány során több, mint kétszer annyi pontot mértek, a vektorok hossza kisebb, és a pontok eloszlása egyenletesebb, és megközelíthetlenebbek. A felmérés során 27 ponton végeztek megfigyeléseket Trimble 4000 SSE és Rogue SNR-8000 vevőkkel, különböző hosszúságú időtartamokon. A mérést „lépésről lépésre” hajtották végre, kiválasztva néhány állomást az első napi észlelésre, majd a következő nap néhány vevő továbblépett a következő állomásokra. A félsziget közepén kiválasztottak egy bázisállomást, és a folytonos, egyidejű mérés biztosítására még három permanens állomás 24 órás méréseit is felhasználták.

3.2. A szélső pontosságú feldolgozás

A HGRN kampányok feldolgozását a Bernese GPS program 3.5-ös verziójával [ROTHACHER et al. 1993] végeztük, és ezt használtuk a Raukumara GPS kampány során is.

A műholdpályák számítása 1991-ben a CIGNET (földi követőállomás hálózat) precíz pályáin alapult, de 1992 nyarán létrejött az IGS CODE (International GPS Service for Geodynamics Centre for Orbit Determination in Europe), ezért az IGS CODE pályákat használtuk az 1993-as és 1995-ös kampányok feldolgozásakor, melyek pontossága 10 cm körüli, míg az előző 2–3-szor rosszabb. A pályáiveket mérési periódusonként számítottuk, 1–2 óra átfedéssel.

A minél kisebb távolság volt a fő tényező a vektorok kijelölésénél, és nyilvánvaló okokból PENC állomás koordinátáit tartottuk fixen (permanens állomás, regionális hálózatokhoz való kapcsolat, a hálózat körülbelüli közepe). A szélső pontosságú GPS adatfeldolgozás fázismérésen alapul, melynek alapegyenlete:

$$\Phi = f \frac{\rho}{c} + f \Delta\delta - N \quad (1)$$

vagy szokásosabb alakjában

$$L_{1,2} := \lambda \cdot \Phi = \rho + c \Delta\delta - \lambda \cdot N \quad (2)$$

ahol Φ —fázis törtrész (ciklus egységben), f —frekvencia, $\Delta\delta$ —a műhold és a vevő órahibája, λ —hullámhossz, ρ —távolság, N —fázis többértelműség, c —fénysebesség.

A kódéréseket feldolgozva ismerjük az órahibákat. A többértelműség viszont ismeretlenként jelentkezik, amelyet ki kell számítani. Mivel a mérés során a jel követésében kimaradások vannak (ciklusvesztés), új többértelműségi paramétert kell meghatározni, a mérés ilyen zavarait detektálni kell. A ciklusvesztés detektálása automatikus algoritmusokkal történt, majd az alacsony műhold állás, a pár nélküli és a rövid észlelések okozta kiugró reziduálok javítását manuálisan is elvégeztük. A különféle hibahatások kezelése érdekében differenciákat kell képezni. A feldolgozás a kettes differenciákon alapul:

$$\Delta\Phi_{j,k}^{i,l}(T_1) = \frac{1}{\lambda} \cdot \rho_{j,k}^{i,l}(T_1) - N_{j,k}^{i,l} \quad (3)$$

ahol j, k — a két vevő, i, l — a két hold és T_1 — az időpont.

A hármas differencia megoldást pedig, amely már nem tartalmaz ismeretleneket, az előzetes koordináták javítására használtuk:

$$[\Delta\Phi_{j,k}^{i,l}]_{T_1}^{T_2} = \frac{1}{\lambda} \rho_{j,k}^{i,l}(T_2) - \frac{1}{\lambda} \rho_{j,k}^{i,l}(T_1) \quad (4)$$

A többértelműség megoldása érdekében, illetve az ionoszférikus hatások csökkentése miatt mesterséges frekvenciákat is képezni kell. A paraméterbecslés első részeként a „széles sávú” fázis többértelműségeket (ambiguity) határoztuk meg, L_5 lineáris kombináció alkalmazásával:

$$L_5 = \frac{1}{f_1 - f_2} (f_1 L_1 - f_2 L_2) \quad (5)$$

majd a továbbiakban az L_3 lineáris kombináción:

$$L_3 = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 L_1 - f_2^2 L_2) \quad (6)$$

amely az elsőrendű ionoszférikus fáziskésést eltünteteti, a „szigma-függő” megoldási stratégiával, vektoronként elvégeztük a fázis többértelműség meghatározását. Ezután a kampánymegoldásokat számítottuk mérési periódusonként, a Saastamoinen-féle troposzféra modellt használva [SAASTAMOINEN 1973], kétóránkénti troposzféraparaméterbecsléssel, majd ezek kombinációjaként számítottuk a végső megoldást.

Az 1997-es Raukumara GPS kampány feldolgozását szintén a Bernese GPS programmal végeztük, azonban a UNAVCO által szolgáltatott AUTOPRO, NETPRO és GT szoftverekkel. A feldolgozási eljárások többsége automatizált volt.

A műholdpálya számítása szintén az IGS CODE precíz pályákon alapult. A pályák referenciarendszere az ITRF94, pontosságuk 10 cm körül volt.

Mivel a vizsgált területen egy állomás sem rendelkezett minden napon 24 órányi mérési adattal és a permanens állomások már igen pontos ITRF94 koordinátákkal rendelkeztek, a legközelebbi Aucklandot (AUCK) vezettük be mint bázisállomást. Minden vektort innen származtattunk, és Auckland koordinátáit vettük rögzítettnek.

Az automatikus ciklusvesztés detektálása után a GT-t használtuk a kiugró reziduálok manuális kijelölésére. Többértelműség meghatározás nélküli L_3 megoldást számítottunk az előzetes koordináták javítására. A paraméterbecslés első részeként a széles sávú többértelműséget határoztunk meg L_5 lineáris kombinációval, majd ezt bevezettük a következő fázis többértelműség megoldásba, L_3 lineáris kombináción „szigma-függő” megoldási stratégiával, 20° feletti műhold észlelések figyelembe vételével, Saastamoinen-moddellel és kétóránkénti troposzféraparaméter-becsléssel. Az eredményként kapott napi megoldások koordinátáit és kovarianciáit felhasználva számítottuk ki a végső koordinátákat és kovarianciákat.

Az első feldolgozás után az AUCK-A7WE vektorból 7 napi 24 órás együttes észlelés alapján megkaptuk az előzetesen tervezett bázis állomás pontos ITRF94 koordinátáit. Mivel ez a pont a vizsgált terület közepén helyezkedett el, a vektorhosszak csökkentése érdekében az A7WE állomást vezettük be mint bázist azokon a napokon, ahol volt 24 órás észlelés. A korábban meghatározott végső koordinátákat mint kiindulási adatokat felhasználva és az A7WE koordinátáit rögzítve egy második feldolgozást is készítettünk.

A második feldolgozás során ugyanazokat az eljárásokat követtük. A többértelműségek 94%-át sikerült meghatározni a végső koordináták és kovarianciák becslése során.

3.3. Analízis

A HGRN kampányok feldolgozását szorosan összekapcsoltuk egy kiterjedt GPS adatanalízissel, ill. hibabecsléssel. A várható lassú deformáció teszi szükségessé a valós pontosság részletes vizsgálatát. Jól ismert tény, hogy a formális hibabecslés rendszerint messze alábecsüli a GPS koordináták valós hibáit — valószínűleg a fázis adatok túlmintavételezése miatt —, mivel az egymás utáni mérési adatok nem függetlenek egymástól [EL-RABBANY 1994]. Ténylegesen független, és reálisabb hibabecslést kaphatunk, ha a napi megoldások összehasonlításából számítjuk a napi megismételhetőségi hibákat (megismételhetőség) — bár lehet, hogy a napi megoldások nem jelentenek jó statisztiki-

kát, ha csupán két vagy háromnapi észleléssel rendelkezünk.

Végső megoldásaink pontosságának jellemzéséül a megismételhetőségek középhibáját számítottuk ki az összes GPS pont napi megoldásaiból kapott koordináták és a végső eredmények összehasonlításából. Ez a mennyiség a kampány egészének pontosságára jellemző egyetlen szám mindhárom koordináta komponensben.

A 3. ábrán lévő hisztogramok mutatják a napi koordinátáknak a végső koordináták körüli szórását, a legjobban illeszkedő normál eloszlás görbét, és a számított középhibát. A HGRN91 kampány során a napi megismételhetőségek középhibája 3,1 mm volt É—D irányban, 3,4 mm K—Ny irányban és 9,9 mm vertikális irányban. 1993-ban, a második HGRN kampány során, ezek az értékek minden komponensben körülbelül 1 mm-rel jobbak voltak: 2,2 mm É—D, 2,6 mm K—Ny és 8,9 mm vertikálisan. A legjobb eredményeket 1995-ben nyertük: 2,2 mm volt a megismételhetőségek középhibája az É—D, 1,8 mm a K—Ny és 6,6 mm a vertikális komponensben.

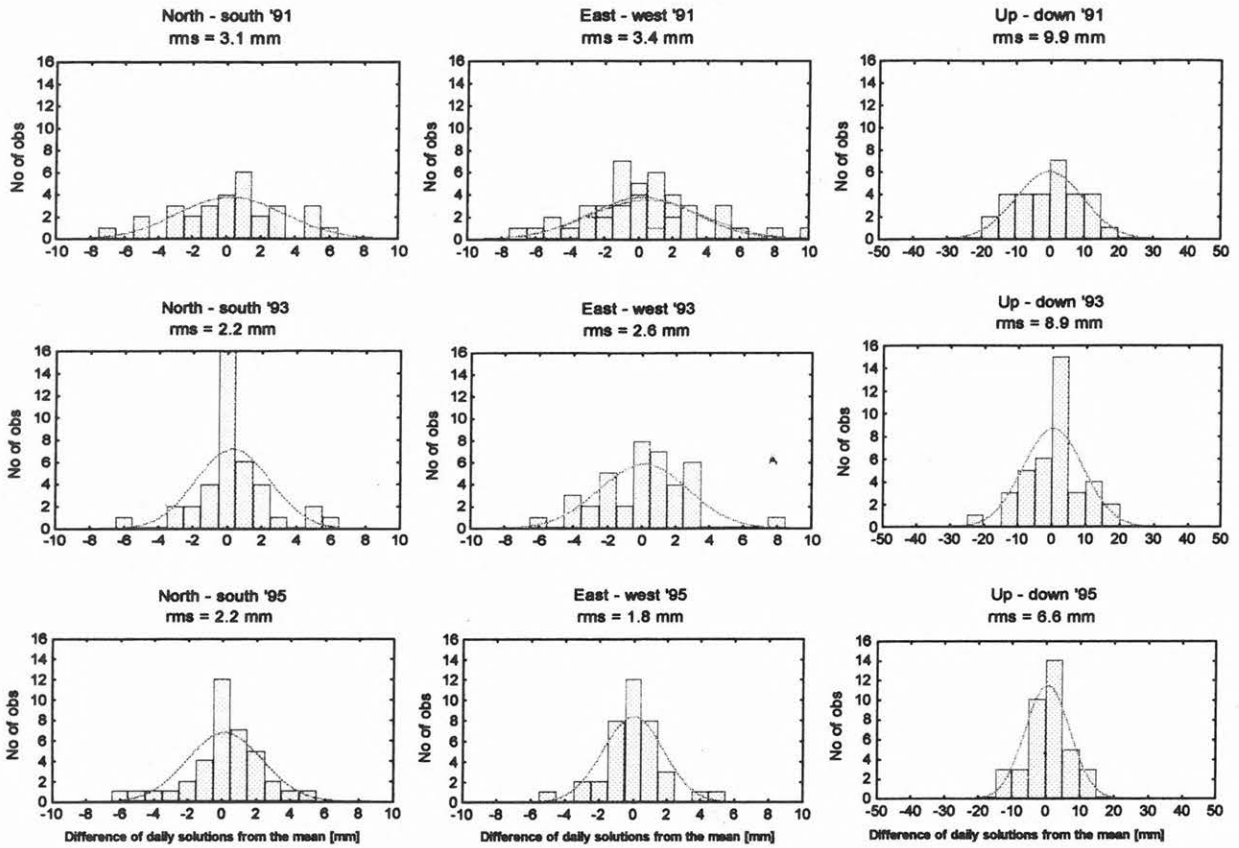
Folytonos javulás figyelhető meg az egyes kampányok során. A legkevesbé pontos eredményeket 1991-ben kaptuk a rövid mérési idő és a CIGNET-től származó kevésbé pontos műholdpályák miatt. Az IGS pályák megléte után, a háromnapos észlelés és az újabb típusú vevők miatt 1993-ban jelentős javulás látható. 1995-ben további javulást értünk el a 24 órás észlelésnek köszönhetően, hiszen az éjszakai észleléseket az ionoszféra kevésbé zavarta, és más szisztematikus hatások is minimalizálódnak, pl. a vertikális komponensben tapasztalható nagy javulás a troposzféra kisebb hatásának tudható be.

A troposzféra hatásának különös figyelmet szenteltünk, hiszen ez igen jelentős és nehezen kezelhető hibaforrás. A feldolgozás során végig a Saastamoinen-fele standard troposzféramoddelt használtuk. Nyilvánvalóan ez a troposzféramodell csupán egy közelítés, így a paraméterbecslés során minden GPS pontra további kétóránkénti troposzféra-paramétereket vezettünk be. Az átlagos zenitkorrekció az 1995-ös kampány napi megoldásaiban 90 mm, 50 mm, 30 mm, közelítőleg 1 mm rms-szel és az időjárás javulásával csökkent. A troposzféra-paraméterek pontosságra gyakorolt hatását is vizsgáltuk a troposzféra szerepének meghatározása érdekében, így tisztán a Saastamoinen-moddellel napi megoldásokat számítottunk, további paraméterek bevezetése nélkül. A 4. ábra mutatja példaként a HGRN95 kampány során elért eredményeket. Összehasonlítva a korábbi megoldásokkal: a megismételhetőségek kö-

zéphibája a vertikális komponensben négyszer jobb troposzféraparaméter-bebecsléssel, és a horizontális komponensekben is kisebb hatást tapasztalhatunk.

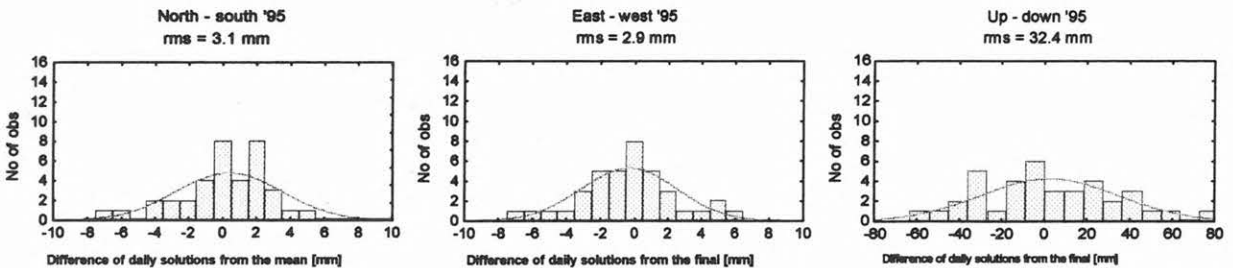
A HGRN kampányok adatanalízise során vektor megoldásokat szintén számítottunk, ezek az adatminőségbe és a pontosság megállapításába részletesebb betekintést adtak. A vizsgált vektorok átlagos

hossza 61 km volt. A három koordináta-komponensben ugyanazokra a vektorokra számítottuk a napi megismételhetőséget mindhárom HGRN kampány során. A kiugró értékek, a kevésbé pontos vektorok és a hozzájuk tartozó pontok könnyen felismerhetők. A DICE (DISZel-CSERTő) vektor 1991-ben, SOKO 1993-ban és a PEBU 1995-ben szolgáltatta a legrosszabb megismételhetőségeket,



3. ábra. A napi megismételhetőségeket mutató hisztogramok a 3 koordináta komponensben minden állomásra a HGRN91, -93 és -95 kampányok során, sorrendben. (A kampány pontosságának becslése)

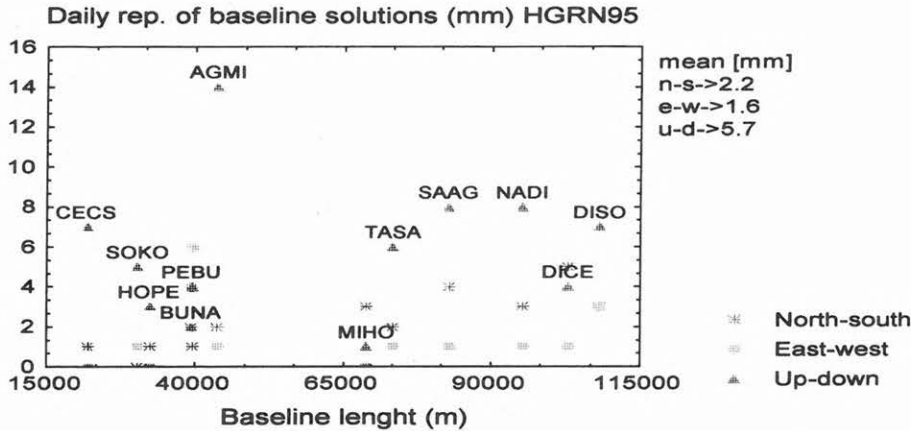
Fig. 3. Histograms showing daily repeatabilities in the 3 co-ordinate components for all stations during the HGRN91, 93 and 95 campaigns respectively. (Campaign accuracy estimation)



4. ábra. A napi megoldásból származtatott hisztogramok (mint a 3. ábra) a HGRN95 kampány során troposzféra paraméter becslés nélkül, a Saastamoinen-féle standard modell használatával

Fig. 4. Histograms derived from daily solutions (as in Fig. 3) without troposphere parameter estimation using the Saastamoinen standard model during the HGRN95

míg a többi vektoré 5 mm alatt maradt. A HGRN91 kampány során a vektor megoldások átlagos napi megismételhetősége 2,3 mm az É–D, 2,6 mm a K–Ny és 7,9 mm a vertikális komponensben. 1993-ban ezek az értékek rendre 2,3 mm, 2,2 mm és 14,2 mm voltak. Ezt kisebb javulás követte 1995-ben: az átlagos napi megismételhetőség 2,2 mm az É–D, 1,6 mm a K–Ny és 5,7 mm a vertikális komponensben. Példaként a HGRN95 vektor megoldásainak hibabecslését mutatja az 5. ábra.



5. ábra. A vektor megoldások napi megismételhetősége a HGRN95 kampány során

Fig. 5. Daily repeatabilities of baseline solutions during the HGRN95 campaign

Nem volt megfigyelhető kapcsolat a 20–120 km távolságtartományban a pontosság és a vektor hossza között. A HGRN91 vektorainak nagyobb pontossága nem volt egyezésben a kampánymegoldások megismételhetőségeivel, ami további javítás lehetőségét tárta fel. Ezt részleges újrafeldolgozás követte, amely 1 mm javulást eredményezett az É–D és 3,4 mm-t a K–Ny komponensek megismételhetőségeinek középpontjában.

A 6. ábra mutatja valamennyi GPS pont napi megismételhetőségeit a három koordináta komponensben. A kétféle hibabecslés (a napi megoldásokon alapuló ún. megismételhetőség, ill. a formális) az analízis fontos része és elengedhetetlen, amennyiben a Bernese-szoftver által szolgáltatott kovariancia-fájlokat használjuk a további analízis és interpretáció számára. Jobb, realisabb hibabecsléshez jutunk, ha kiszámítjuk a formális hibák egy szorzófaktorát [PEARSON et al. 1995, STRAUB 1996]. A napi megismételhetőségek és a formális hibák hányadosát számítottuk minden HGRN kampányra. Az 1991-es kampány során a belső, formális hibák 17-szer kisebbek voltak, míg a HGRN93 és -95 során a napi megismételhetőségek 13-szor nagyobbak bizonyultak, (ezek tipikusak a 30 másodperces mintavételezésnél).

Az 1997-es Raukumara GPS kampány feldolgozásának pontossági becslése érdekében a megismételhetőségek középpontját számítottuk, összehasonlítva minden, 1 napnál hosszabb megfigyelési idővel rendelkező állomás koordinátáit.

A 7. ábrán lévő hisztogramok mutatják a napi koordináták szórását a végső körül a legjobban illeszkedő normál eloszlás görbéjével, valamint a számított rms-t. Az 1997-es felmérés napi megismételhetőségeinek középpontja 1 mm volt az É–D, 1,9 mm a K–Ny és 4,7 mm a vertikális komponensben. Mivel az állomások csak egyharmada rendelkezett 1 napnál hosszabb észlelési idővel, ez a hibabecslés, habár realisnak tartják, ebben az esetben a kampány egészének pontossága szempontjából nem ad megbízható képet. Az első feldolgozást felhasználva (ahol minden vektor Aucklandből volt leszármaztatva) és összehasonlítva a másodikkal, záróhibákat tudunk számítani minden olyan állomásra, amely a két eltérő feldolgozásból két koordináta-készlettel rendelkezik. Ez a megközelítés valamivel realisabb hibabecsléshez vezet.

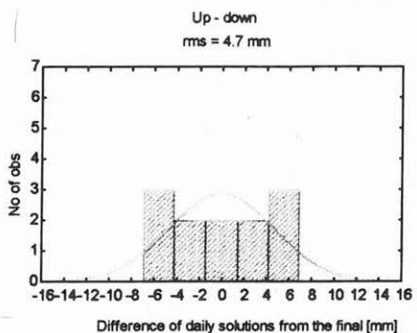
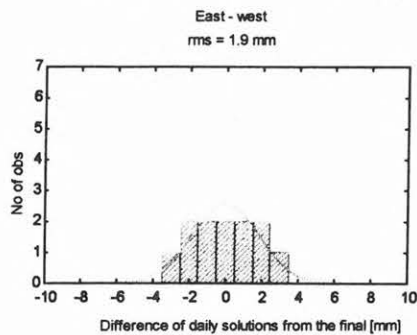
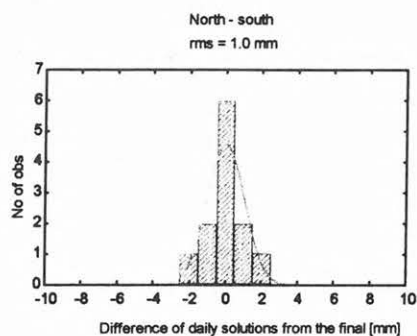
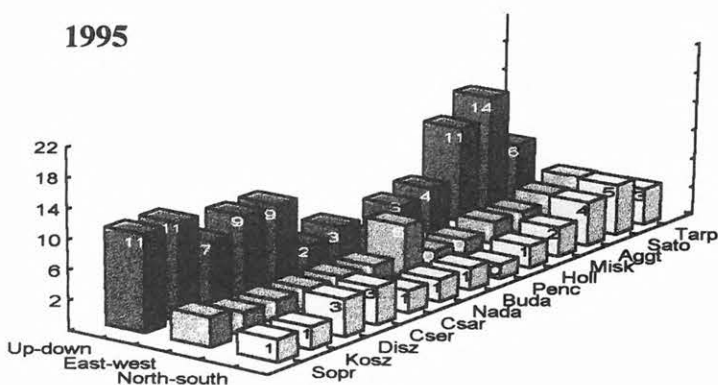
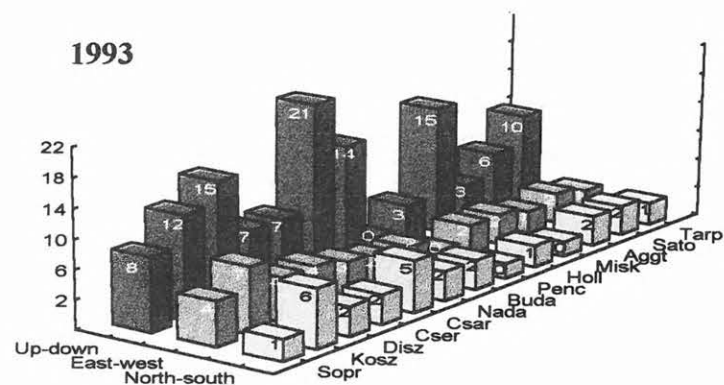
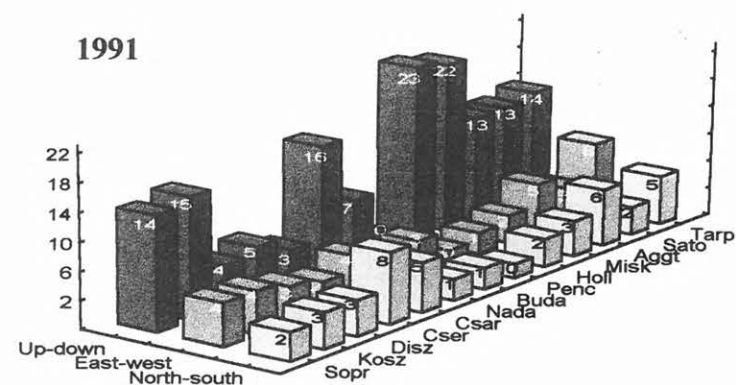
A 8. ábrán lévő hisztogramok a záróhibákat mutatják az összes kétféleképpen feldolgozott pontra. A záróhibák középpontja 2 mm az É–D és 4,1 mm a K–Ny komponensekben, ill. 11,7 mm a vertikálisban.

A 8. ábrán lévő hisztogramok a záróhibákat mutatják az összes kétféleképpen feldolgozott pontra. A záróhibák középpontja 2 mm az É–D és 4,1 mm a K–Ny komponensekben, ill. 11,7 mm a vertikálisban.

4. Értelmezés, deformációanalízis

A hazai kampányok kapcsán a fentiekben leírt adatanalízis és feldolgozási stratégia alkalmazása hatékony kombinációnak bizonyult ahhoz, hogy precíz, megbízható eredményeket kapjunk a Magyar GPS Mozgásvizsgáló Program kampányai-ból.

Így az előző év végén az interpretációs rendszer megteremtését kezdtük el. A Pannonmedencében várható lassú deformációs sebesség nem csupán feldolgozásunk pontosságának ismeretét kívánja meg, de a jobb kontroll miatt kiértékelő rendszerünknek is több módszeren alapuló



7. ábra. Az 1997-es Raukumara GPS Kampány napi megismételhetőségeit mutató hisztogramok a 3 koordináta komponensben, minden állomásra

Fig. 7. Histograms showing daily repeatabilities in the 3 co-ordinate components for all stations during the 1997 Raukumara GPS Campaign

6. ábra. A napi megismételhetőségek a 3 koordináta komponensben a Magyar Geodinamikai Referencia Hálózat minden pontjára az 1991-es, 1993-as és 1995-ös kampányok során

Fig. 6. Daily repeatabilities in the 3 coordinate components of each site of the Hungarian GPS Geodynamic Reference Network during the 1991, 1993 and 1995 campaigns respectively

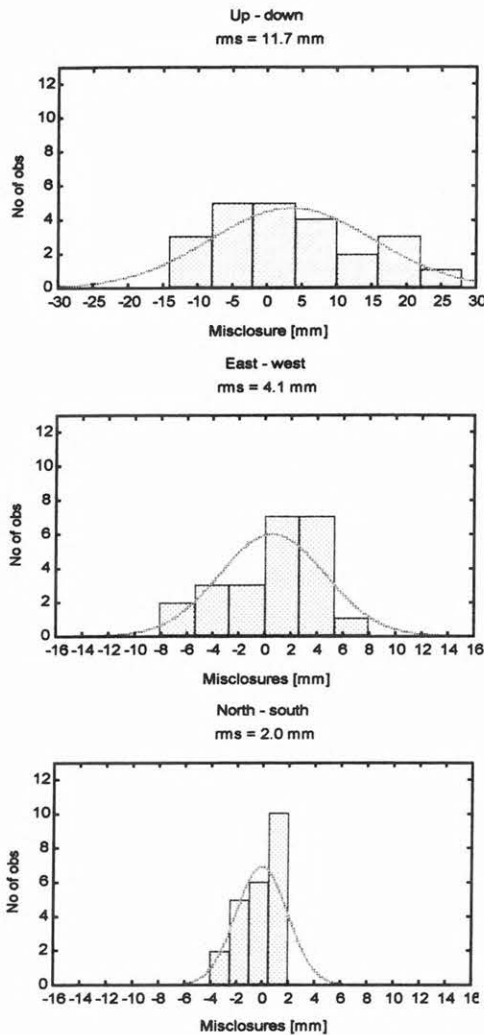
különböző interpretációs stratégiákkal kell rendelkeznie.

A sebességtér meghatározására két módszert használunk: a két vagy több epocha koordinátái közötti különbségek képzésén alapuló *direkt módszert*, ill. az *egyidejű megoldás módszerét*. Az első eljárás hasonlósági transzformációk elvégzését kívánja a koordináta-csoportok között, melyek rendszerint

külön referencia-rendszerben vannak. Ez különösen fontos a HGRN91 kampányt illetően, ahol más műholdpályákat használtunk. AYHAN, DEMIR [1994] megmutatta, hogy ez az eljárás túl érzékeny bizonyul az adatminőségre, és kevésbé megbízható eredménnyel szolgál. Az *egyidejű megoldás módszere* [BIBBY 1982] a kiértékelő rendszer fő eszköze a GPS pontok mozgássebességének megállapításában és a deformációs tér számításában. A véges elem módszer szintén felhasználjuk a deformációs tér részletesebb megismeréséhez.

A GPS adatanalízis bizonyította, hogy túl korai lenne határozott értelmezést adni a vizsgált terület GPS alapú geodinamikáját illetően, bár az előzetes

eredmények megmutatták, hogy több pont már szignifikáns elmozdulással rendelkezik, és a jelenlegi átlagos sebesség a Pannon-medencében nagyobb a korábbi becsléseknél. Eme viszonylag nagy sebességeken túl a számított deformációs mező szintén alátámasztani látszik a medence újabban felvetett tektonikai stílusváltását. Mindezek mellett meg kell jegyeznünk, hogy a projekt ebben a szakaszában nem mehetünk tovább, hiszen a HGRN91 javított eredményei csak mostanában készültek el, így ezek a számítások a legutóbbi két kampányon, a HGRN93-on és -95-ön alapulhattak, amelyek nem engednek további értékelést. Határozottan szükség van a HGRN97 eredményeire, a mérések feldolgozását most végezzük.



8. ábra. A histogramok a két különböző feldolgozásból leszármaztatott záróhibákat mutatják az 1997-es Raukumara GPS kampány során

Fig. 8. Histograms showing the misclosures derived from the two different processing, 1997 Raukumara GPS Campaign

Az 1995-ös és 1997-es Raukumara GPS kampányok során 21 állomás rendelkezett megfigyelésekkel mindkét felmérésből, és a magas deformációs ráta miatt a kiértékelés előzetes eredményei már rendelkezésre állnak. Ezek az alábbi alapvető mennyiségek számítása alapján kerülnek bemutatásra.

Legyen a mozgás síkbeli, kétdimenziós, a koordináta-rendszerünk derékszögű. x és y mutasson keleti, illetve nyugati irányba, és az ezek menti sebesség legyen u és v . Ekkor a deformációs tenzor a következő:

$$\begin{bmatrix} e_{xx} & e_{xy} \\ e_{yx} & e_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (7)$$

amelyből a fentinel a következő, szemléletesebb deformációs paraméterek vezethetők le.

$$\gamma_1 = \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad \text{tiszta nyírás} \quad (8)$$

$$\gamma_2 = \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad \text{technikai nyírás} \quad (9)$$

$$\gamma = (\gamma_1^2 + \gamma_2^2)^{1/2} \quad \text{teljes nyírás} \quad (10)$$

$$\Delta = \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad \text{dilatáció} \quad (11)$$

$$e_1 = \frac{1}{2} (\Delta + \gamma) \quad \text{maximális fődeformáció} \quad (12)$$

$$e_2 = \frac{1}{2} (\Delta - \gamma) \quad \text{minimális fődeformáció} \quad (13)$$

$$\Psi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(-\frac{\gamma_2}{\gamma_1} \right) \quad \text{maximális nyírási irány} \quad (14)$$

$$\Theta = \Psi - 45^\circ \quad \text{maximális fődeformációs irány} \quad (15)$$

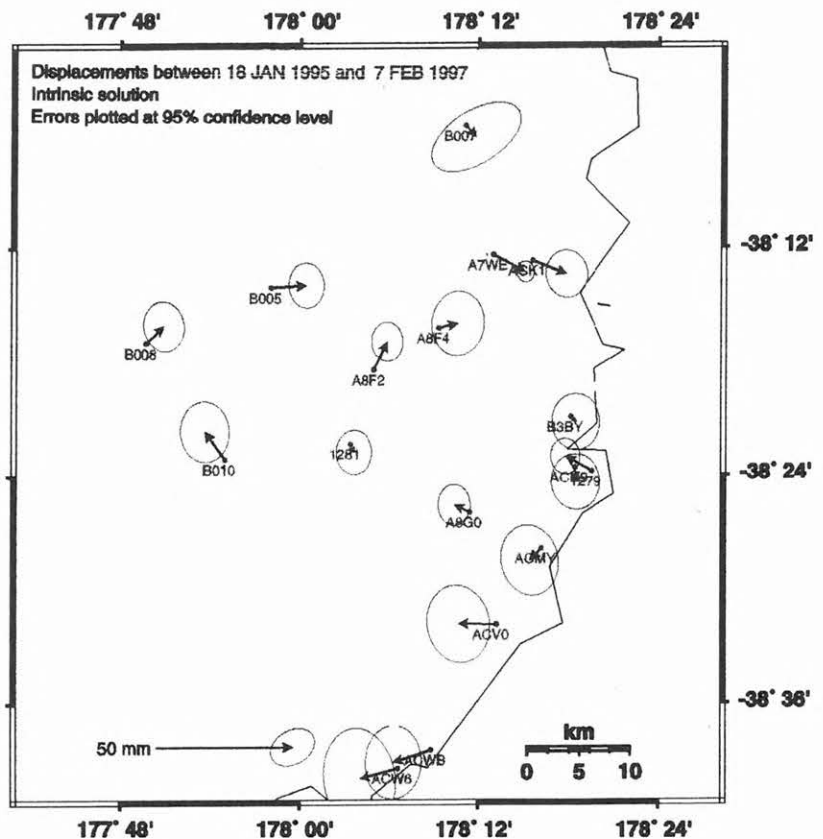
Megjegyzendő azonban, hogy a GPS adatokból származtatott deformációs paraméterek valójában deformációs ráták vagy deformációs sebességek, hiszen a deformáció időbeni viselkedését is mutatják. A sebesség-, illetve a deformációs tér meghatározását az IGNS (Institute of Geological and Nuclear Sciences, Lower Hutt, NZ) által kifejlesztett DISP és ADJCOORD programokkal

végeztük [CROOK 1992]. A vizsgált terület egészére végzett deformációs számítás $0,21 \pm 0,08$ ppm/év (95% konfidencia intervallum) maximális nyíró deformációt mutat, amely a Pannon-medencére végzett hasonló számításaimnál közel húszszor nagyobb. Az új-zélandi kampány két epochája között $\gamma_1 = -0,11$ ppm, $\gamma_2 = 0,42$ ppm nyíró deformációt állapítottunk meg. A relatív extenzió azimutját pedig a (14) összefüggéssel és a rotáció figyelembevételével számíthatjuk. A kompressziós irány ettől 90° -ra adódik. A kettő közötti szögfelezőben a maximális jobb laterális nyírás irányát kapjuk, erre merőlegesen pedig a balos maximális nyíró deformációt. Az eredmények összevethetők az aktív vetők irányával és jellegével, illetve más megfigyelések által indukált deformációs stílussal. Ez természetesen egy, a területre jellemző globális kép, pontcsoportokra bontva a deformációs jelleg részleteibe is betekinthetünk. A belső elmozdulás megoldásból [PRESCOTT 1981] származtatott sebességtér a félsziget egy látszólagos, óramutató járásával egyező forgását mutatja (9. ábra). A Raukumara GPS program értelmezése még tovább folyik, csupán előzetes, első vizsgálatként szolgálnak a fenti eredmények.

5. Összefoglalás

A Magyar Geodinamikai Referencia Hálózat a Pannon-medence recens geodinamikájának tanulmányozására, annak jobb megértése céljából jött létre. A fontosabb lépéseket összefoglalva, négy kampány mérését végeztük el, és háromra a feldolgozás és az adat analízis elkészült. Jelenleg az interpretációs rendszer kiépítése folyik, és az eredményeink kiértékelése megkezdődött.

Az adatanalízis során kiderült, hogy a megismételhetőségek középpontja a horizontális komponensek esetén 2 mm körüli volt 1993-ban és 1995-ben



9. ábra. A Raukumara GPS geodinamikai kampány területének egy részlete. Az úgynevezett belső koordináta megoldás

Fig. 9. A part of the area of the Raukumara GPS geodynamic campaign. Inner coordinate (intrinsic) solution

és megközelítőleg 3 mm 1991-ben, míg a magassági komponens 10 mm alatt maradt. A vektor megoldások jobb betekintést nyújtottak az adatminőségbe és átlagosan 2–2,5 mm napi megismételhetőségeket eredményeztek a horizontális komponensekben, mindegyik kampány során. A troposzféra paraméterek szerepét meghatároztuk, és egy reális hibabecslést adtunk minden GPS pont koordinátájának. A formális hibákkal való kapcsolatot szintén meghatároztuk. Eredményeink kiértékelése nem egyszerű feladat a terület viszonylag nyugodt tektonikája miatt, habár előzetes eredmények már megmutatták, hogy az átlagos sebesség nagyobb a korábban vártnál.

Határozottabb, és részletes interpretációt a HGRN97 kampány feldolgozása után lehet adni.

Az új-zélandi geodinamikai program keretén belül már az interpretáció is elkezdődött, azonban még további vizsgálatok szükségesek, és érdekes eredményekkel szolgálhat az évtizedekkel korábbi geodéziai mérésekkel való összehasonlítás, melyre itthon is érdemes lesz hangsúlyt fektetni, hiszen a kisebb pontosság mellett ott van a közel évszázados időfaktor.

6. Köszönetnyilvánítás

Köszönet illeti az Országos Tudományos Kutatási Alapot, amely a Magyar Mozgásvizsgáló Program számára támogatást nyújtott. Köszönöm továbbá BORZA Tibor és CSAPÓ Géza értékes tanácsait és bíráló megjegyzéseit.

HIVATKOZÁSOK

- AYHAN M. E., DEMIR C. 1994: Velocity field determination using repeated GPS observations. Proceedings of the 1st Turkish Symposium on Deformations, 5-9 September, 1994, Istanbul, Turkey, 258-271
- BIBBY H. M. 1982: Unbiased estimate of strain from triangulation data using the method of simultaneous reduction. *Tectonophysics* **82**, 161-174
- CROOK C. N. 1992: ADJCOORD: A Fortran program for survey adjustment and deformation modelling. NZGS EDS Rep. 138, 22 pp. Geol. and Geophys. Dep. of Sci. and Ind. Res., Lower Hutt, New Zealand
- EL-RABBANY A. E. S. 1994: The effect of physical correlations on the ambiguity resolution and accuracy estimation in GPS differential positioning. Ph.D. dissertation, Tech. Rep. 170, Dep. of Geod. and Geomatics Eng., 161 pp. Univ. of New Brunswick, Fredericton, Canada
- FEJES I. 1991: Proposed two-step observing monument applicable to high precision surveying by GPS. *SGMS Newsletter* **2**, 2
- FEJES I., BORZA T., BUSICS I., KENYERES A. 1993: Realisation of the Hungarian Geodynamic GPS Reference Network. *Journal of Geodynamics* **18**, 1-4, 145-157
- GAZSÓ M., FEJES I., BORZA T., BUSICS I. 1992: A GPS Mozgásvizsgáló Program és földtani alapjai Magyarországon. *Geodézia és Kartográfia* **44**, 73-85
- GERNER P., BADA G., DÖVÉNYI P., MÜLLER B., ONESCU M. C., CLOETINGH S., HORVÁTH F. 1996: Recent tectonic stress and crustal deformation in and around the Pannonian basin. *Geol. Soc. of London, spec. publ.*
- HORVÁTH F. 1993: Towards a mechanical model for the formation of the Pannonian basin. *Tectonophysics* **226**, 333-357
- HORVÁTH F., CLOETINGH S. 1996: Stress-induced late-stage subsidence anomalies in the Pannonian basin. *Tectonophysics* **266**, 287-300
- PEARSON C. F., BEAVAN J., DARBY D. J., BLICK G. H., WALCOTT R. I. 1995: Strain distribution across the Australian-Pacific plate boundary in the central South Island, New Zealand from 1992 GPS and earlier terrestrial observations. *J. Geophys. Res.* **100**, B11, 22071-22081
- PRESCOTT W. H. 1981: The determination of displacement fields from geodetic data along a strike-slip fault. *J. Geophys. Res.* **86**, 6073-6090
- ROTHACHER M., BEUTLER G., GURTNER W., BROCKMAN E., MERVART L. 1993: Bernese GPS software version 3.4 documentation, May 1993. Astron. Inst., Univ. of Bern, Bern, Switzerland
- SAASTAMOINEN J. 1973: Contribution to the Theory of Atmospheric Refraction / Introduction to practical computation of Astronomical Refraction. *Bulletin Geodésique* 105-107, 55 pp.
- STRAUB S. C. 1996: Recent crustal deformation and strain accumulation in the Marmara Sea Region, N.W. Anatolia inferred from GPS measurements. Ph.D. dissertation, Diss. ETH No. 11,614. Inst. Of Geod. and Photogrammetry, ETH, Zurich, Switzerland
- WALCOTT R. I. 1978: Geodetic strains and large earthquakes in the axial tectonic belt of North Island, New Zealand. *J. Geophys. Res.* **83**, B9, 4419-4429