

A DUNASZEKCSŐI FÖLDCSUSZAMLÁS MOZGÁSI TENDENCIÁJA ÉS MODELLJE KOORDINÁTA IDŐSOROK ALAPJÁN

Bányai László*, Mentés Gyula*, Újvári Gábor*, Gribovszki Katalin*, Papp Gábor*



Motion tendency and model of the landslide in Dunaszekcső deduced from coordinate time series – The monitoring network established on the high bank of river Danube at Dunaszekcső was measured 22 times in the last five years. The integrated 3D adjustment of GPS baselines levelled height differences and total station measurements allow for qualifying the applied observation technique, furthermore the investigation and modelling of movement tendencies using the coordinate time series. This time series of monitoring points properly characterize the movements of primary and secondary rupture zones. The movement tendencies of properly defined phases are characterised by the accelerations and velocities determined by least squares adjustment and Kalman-filter approach as well. Based on geodetic data the dynamic model of movements is proposed.

Keywords: landslide, geodetic monitoring, movement tendency, dynamic model

A dunaszekcsői magasparton létesített geodéziai mozgásvizsgáló hálózatot az elmúlt öt év során huszonkét alkalommal mértük meg. A GPS vektorok, a szintezett magasságkülönbségek és a mérőállomás méréseinek integrált háromdimenziós kiegyenlítése lehetővé teszi az alkalmazott mérési technológia minősítését, továbbá a koordináta idősorok elemzéséből származó mozgási tendenciák vizsgálatát és modellezését. A mozgásvizsgáló pontok koordináta idősorai jól jellemzik az elsődleges és a másodlagosan kialakuló törési zóna mozgásait. A mozgási tendenciákat a jól definiálható mozgási szakaszok sebességének és gyorsulásának legkisebb négyzetes meghatározásával és Kálmán-szűrővel is modelleztük. A geodéziai adatok alapján a mozgások dinamikai modelljére teszünk javaslatot.

Kulcsszavak: földcsuszamlás, geodéziai monitoring, mozgás tendencia, dinamikai modell

1 Előzmények

A dunaszekcsői partcsuszamlásokkal kapcsolatos vizsgálatokról több magyar és angol nyelvű anyagban is rendszeresen beszámoltunk. A geológiai és geomorfológiai hátteret, a tervezett vizsgálatokat, valamint az első eredményeket Újvári et al. (2009a, 2009b, 2009c) tanulmányai foglalták össze. A különböző geodéziai mérések integrált 3D kiegyenlítésére kidolgozott eljárást Bányai (2011a, 2011b) tanulmányai mutatják be.

A geodéziai mérések számának növekedésével (a megfigyelési idő múlásával) egyre több ismeretre tettünk szert a mozgások jellemzőivel kapcsolatban. A mozgási vektorok idő és térbeli változásából valamint a dőlésmérő adatok elemzéséből további beszámolók készültek (Mentés et al. 2011, 2012; Újvári et al. 2011).

Ebben a tanulmányban a koordináta idősorok kinematikai és dinamikai elemzésére kidolgozott eljárásokat és a levonható tapasztalatokat foglaljuk össze. Az adatok alapján felvázolható dinamikai modellt nemzetközi konferencián is bemutattuk (Bányai et al. 2012).

2 A vizsgálatok adatai és módszerei

2012 végére 22 mérési kampányt hajtottunk végre. Az intenzív leszakadás miatti pontpusztulásokkal és az időközben szükségessé váló új pontokkal együtt 5 darab vasbeton mérőpillér és 35 mozgásvizsgáló pont koordináta változásait határoztuk meg az első időponthoz viszonyítva úgy, hogy a mérőpillérek koordináta változásainak négyzetösszegét minimalizáltuk. Az így meghatározott változások alapján a hálózat horizontális megbízhatóságát 2 mm, a magassági megbízhatóságot 3 mm

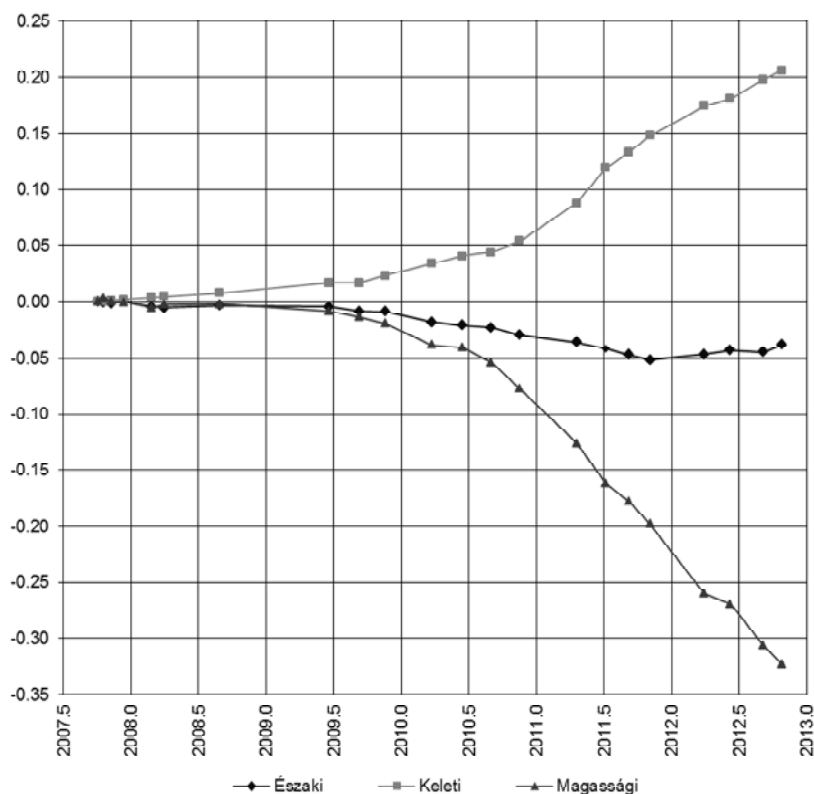
*MTA CSFKI, 9400 Sopron, Csatai u. 6-8.
E-mail: geomatika@ggki.hu

középhibával jellemezhetjük a WGS-84 koordináta rendszerben. Egy mérési időpontra belül azonban a pontok koordinátáiból számítható magasságkülönbségek a szabatos szintezés következtében jóval kedvezőbb értékek.

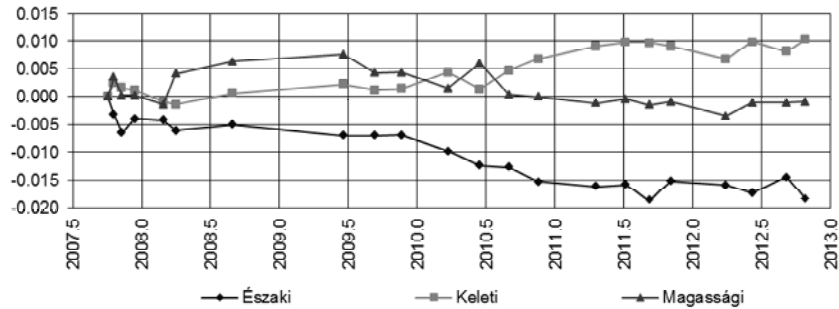
Annak ellenére, hogy az idősorok már önmagukban is sok mindent elárulnak, a mozgástendenciákat kinematikai modell (másodfokú polinom) illesztésével és Kálmán-szűréssel is megvizsgáltuk.

2.1 A jellegzetes pontok koordináta idősorai

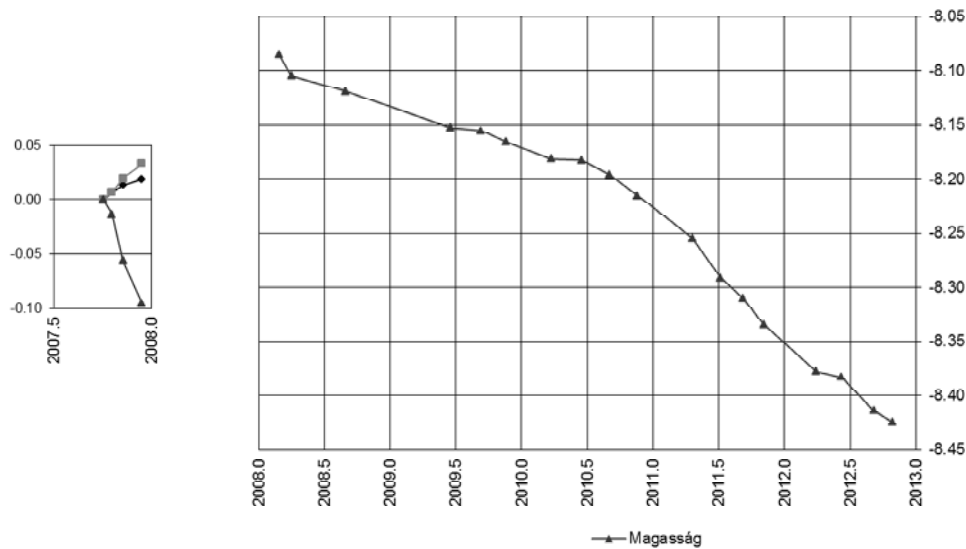
Ebben az anyagban a déli terület három jellegzetes pontjának vizsgálatát mutatjuk be. Az 1000 számú pont kezdetben a déli törési zóna mozdulatlanak tekintett részét jellemezte. Az új törési zóna megjelenését követően azonban ez a pont is mozgásnak indult. Az 1002 számú pont még most is mozdulatlanak tekinthető. Ugyanakkor a 2003 számú pont részt vett az intenzív leszakadási fázisban, és az utómozgásokat is jól reprezentálja. A jellegzetes mozgásgörbéket a 1-3 ábrák mutatják be. A 2. ábrán az 1002 pont változásait a kicsi mozgások miatt eltérő méretarányban mutatjuk. A 3. ábrát két részre bontottuk, az intenzív leszakadás előtti (2008. február 22 = 2008.145) és utáni intervallumokra. Mivel a pont északi irányba 1.50 m-t, keleti irányba 2.52 m-t mozdult el az ábra jobb oldalán csak a részletes vizsgálatunk tárgyát képező magassági változást ábrázoltuk. Mivel az 1003 pont változásai ellentétben az 1000 és 2003 pontokéval csak 1-2 cm értékben mozognak a mérési bizonytalanságok is jobban felismerhetők. A magassági görbén a 2. és 12. időpontok kiugranak a görbe jellegzetes lefutásából, ezért a numerikus vizsgálatokból is kimaradtak, annak ellenére, hogy az értékek a becslés megbízhatóság tartományába esnek. Ugyanez igaz az 1000 pont 2. időpontbeli értékére is, ami a méretarány miatt kevésbé látható.



1. ábra. Az 1000 pont koordináta változásai (m)



2. ábra. Az 1002 pont koordináta változásai (m)



3. ábra. Az 2003 pont magassági változásai (m) – a bal oldali ábra jelölései azonosak az 1. és 2. ábráéval

Az intenzív leszakadás előtt mindhárom pont süllyedő tendenciát mutatott, az 1000 és 1003 pontok esetében néhány mm, a 2003 pontnál a 10 cm tartományban. A leszakadás után az 1000 és 1003 pontok kezdetben megemelkedtek (!), majd ismét süllyedő tendenciát mutattak, amely a 1003 pontnál az eredeti nulla kezdőértékhez konvergál. Az 1000 pontnál a 2008.5-2009.5 intervallumban, ellentétben a 2003 ponttal, csak nagyon kis süllyedést tapasztaltunk. A 2009.5 időpontot követően azonban az 1000 és 2003 pontok szinte azonos módon gyorsuló süllyedést mutattak, ami az 1000 pont mellett egy újabb törési zóna kialakulásához vezetett. Maga a törési zóna, amit előre jeleztünk, csak 2010-ben jelent meg a felszínen.

A 1. és 3. ábra magassági görbéi még egy jellegzetességet mutatnak. 2010 és 2012 nyarán a süllyedések jelentősen csökkentek, 2011-ben ez nem ilyen egyértelmű, de a görbén itt is kisebb törés mutatkozik. Ez a jelenség valószínűleg a nyári szárazabb, kevésbé nedves időszakokkal magyarázható, amikor a Duna vízállása is jóval alacsonyabb.

2.2 Az idősorok numerikus vizsgálatának módszerei

Valamely mennyiség időbeli változását általában algebrai polinomok segítségével lehet leírni. A kinematikában másodfokú polinomokat alkalmaznak, ahol az út idő szerinti első deriváltja a sebes-

ség, a második a gyorsulás és a harmadik a kezdő érték. A polinom három függvény összegéből írható fel

$$\begin{aligned} s_1 &= s, \\ s_2 &= v t, \\ s_3 &= \frac{1}{2} a t^2, \\ s_k &= s + v t + \frac{1}{2} a t^2, \\ \dot{s}_k &= v + a t, \end{aligned} \quad (1)$$

ahol s a konstans kezdőérték, v a konstans sebesség, a a konstans gyorsulás, s_k a kinematikus polinom, \dot{s}_k a pillanatnyi sebesség egyenese (a polinom első deriváltja) és t az idő. Az egyes paraméterek és az idő között nagyon szoros az összefüggés. A $t = 0$ időpontban $s_k = s$, $\dot{s}_k = v$ és az s_3 függvény itt veszi fel a szélsőértékét. Az a előjelétől függetlenül az s_k és s_3 függvénynek is van csökkenő és növekvő szakasza is. Pozitív a esetében a függvény felülről homorú (konvex) és a pillanatnyi sebesség egyenese emelkedő, negatív a esetében a függvény domború (konkáv) és a pillanatnyi sebesség egyenese lejtős. A függvények legérdekesebb tulajdonsága azonban az, hogy az s_3 és s_k függvények lefutása teljesen azonos, de az s_k parabola szélsőértéke a többi ponttal együtt $[-v/a; s - v^2/2a]$ vektorral eltoltt helyzetbe kerül az s_3 függvényhez viszonyítva. Ennek a gyakorlati alkalmazás során nagyon fontos következményei vannak.

Valamely mérésből (vagy meghatározásból) származó mennyiségekhez azonban csak önkényesen megválasztott időpontokat tudunk hozzárendelni (nem ismerjük azt az t_k időpontot, amihez az s és v konstansok tartoznak), ezért az adatsorhoz csak az

$$s_k = s_0 + v_0 \Delta t + \frac{1}{2} a \Delta t^2 \quad (2)$$

függvényt tudjuk illeszteni, ahol $\Delta t = t - t_0$, t_0 a kezdő időpont, s_0 a pillanatnyi függvény érték és v_0 a pillanatnyi sebesség a t_0 időpontban. A becült értékek

$$\begin{aligned} s_0 &= s + v(t - t_k) + \frac{1}{2} a(t - t_k)^2, \\ v_0 &= v + a(t - t_k) \end{aligned} \quad (3)$$

tartalmazzák az s és v konstans értékeket is, de t_k ismeretének hiányában ezek nem becsülhetők. A pillanatnyi értékek azonban akkor is léteznek, ha s és v értékek is nullák. Ha $a = 0$, vagyis a függvény egyenessé fajul, akkor (3) alapján s és v is meghatározható (egyenes vonalú egyenletes mozgás).

A mozgási folyamat becsülhető paramétereit a vizuálisan definiálható intervallumokban a hagyományos legkisebb négyzetes kiegyenlítéssel tudjuk meghatározni. A kidolgozott eljárásnál az intervallumok kezdőpontjában keressük az s_0 , v_0 és a értékeket. Az együttes kiegyenlítésben előírhatjuk, hogy valamely időintervallum utolsó és a következő intervallum kezdőpontjának felezőjében

- a függvény értékek azonosak legyenek (metsződés),
- a függvény értékek és az első deriváltak (a pillanatnyi sebességek) is azonosak legyenek (simuló átmenet), vagy
- a két intervallum között ne legyen kényszerkapcsolat (rámpa, szakadás).

Alternatívaként megvizsgáltuk a kinematikus mozgásegyenlet paramétereinek dinamikus Kálmán-szűréssel történő meghatározását is, ahol mérési időpontonként új s , v , és a pillanatnyi értékeket becsülhetünk. Statikus Kálmán-szűrésnél időben nem változó paramétereket becsülnénk lépésenként egyre pontosabban.

A Kálmán-szűrésnél (Husti et al. 2000, Teunissen 2001) az átviteli függvényt (2) alapján az

$$\mathbf{x}'_i = \begin{bmatrix} s_i \\ v_i \\ a_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & 0.5 \Delta t^2 \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{s}_{i-1} \\ \hat{v}_{i-1} \\ \hat{a}_{i-1} \end{bmatrix} = \mathbf{T} \hat{\mathbf{x}}_{i-1} \quad (4)$$

összefüggéssel írhatjuk le, ahol T az átviteli mátrix, \hat{x}_{i-1} az előző időpontban becsült állapotvektor, $\Delta t = t_i - t_{i-1}$ az időintervallum és x'_i az átvitelből számított érték. A variancia-kovariancia mátrix

$$Q_{x'_i} = T Q_{\hat{x}_{i-1}} T^t + Q_m \quad (5)$$

ahol $Q_{\hat{x}_{i-1}}$ az előző időpontban becsült variancia kovariancia mátrix, t a transzponált mátrixot jelöli, és a Q_m mátrixszal a másodfokú modell bizonytalanságát lehet figyelembe venni. A közvetlen méréseket és azok pontosságát a

$$b_i = A x'_i \quad \text{és} \quad Q_{b_i} \quad (6)$$

lineáris megfigyelési egyenlettel és a Q_{b_i} variancia-kovariancia mátrixszal lehet figyelembe venni, ahol b_i az ismeretlenekhez kapcsolódó méréseket és A az együttható mátrixot jelöli. Az állapotvektor a következő összefüggésekkel frissíthető

$$\begin{aligned} \hat{x}_i &= x'_i + K(b_i - A x'_i) \\ Q_{\hat{x}_i} &= (I - K A) Q_{x'_i} \\ K &= Q_{x'_i} A^t (Q_{b_i} + A Q_{x'_i} A^t)^{-1} \end{aligned} \quad (7)$$

ahol K a Kálmán- vagy nyereségmátrix és I az egységmátrix.

A gyakorlati vizsgálatok során mindig csak a következő időponttal frissítjük a becslést, ezért b_i csak egy mennyiséget tartalmaz és $A = [1 \ 0 \ 0]$, ami lényegesen megkönnyíti a (7) összefüggések kiszámítását. A modell alkalmazhatósága többek között az \hat{x}_0 kezdőértékek, a $Q_{\hat{x}_0}$, Q_m és a Q_{b_i} mennyiségek megfelelő kiválasztásától, a „hangolástól” is jelentősen függ. Esetünkben a kezdőparamétereket a hagyományos kiegyenlítés első intervallumának becsült értékei alapján is figyelembe vehetjük. Az egyik legfontosabb tényező a Q_m és Q_{b_i} mennyiségek felvétele. Ha a Q_m értékeit nullának választanánk, a mérésenkénti összegződés során a $Q_{\hat{x}_i}$ mátrixban a középhibák egyre kisebbek lennének és a x'_i értékek egyre kisebb korrekciókat kapnának. Az időpontonként alkalmazott Q_m mátrixszal ez a hatás csökkenthető.

2.3 A numerikus vizsgálatok eredményei

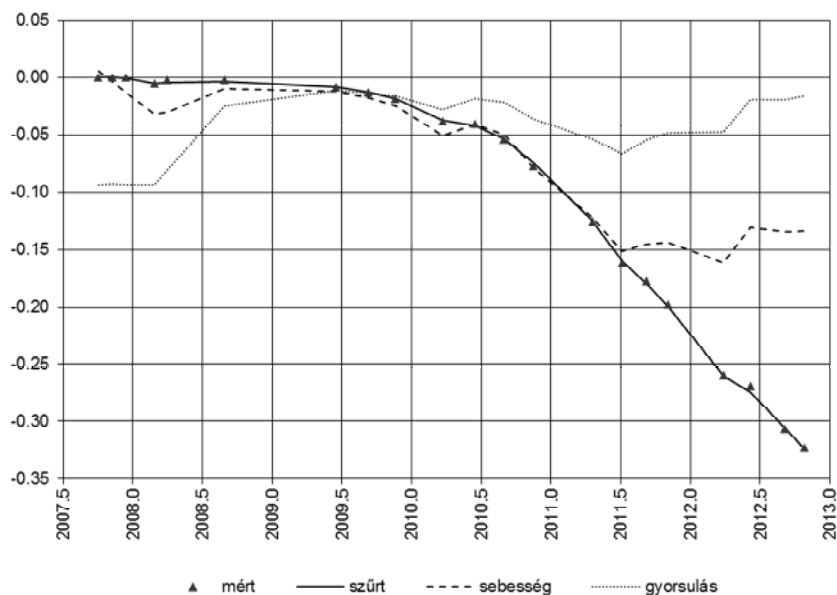
Ebben az anyagban csak a magassági változások vizsgálatát foglaljuk össze, mivel ezek a legjellegzetesebbek, annak ellenére, hogy a vízszintes változások is hasonló szakaszosságot mutatnak (1-3. ábrák).

Első lépésben a vizuálisan kijelölt szakaszokat vizsgáltuk a hagyományos kiegyenlítéssel, majd az első intervallum kezdő értékeivel elvégeztük a Kálmán szűrést. A hangoláshoz a következő varianciákat alkalmaztuk: $Q_m = \langle 0.003^2; 0.005^2; 0.010^2 \rangle$ és $Q_{b_i} = \langle 0.003^2 \rangle$. A 4-6. ábrákon mutatjuk be a Kálmán-szűrés eredményeit.

Az eljárást lényegében az adatsorok szűrésére, simítására és előre jelzésére találták ki. Esetünkben a szűrőhatás csak részben jelentkezett, de a sebesség és gyorsulás görbék számszerűen is kiemelték azokat a helyeket, ahol az adatokban a törések vizuálisan is feltételezhetők. Azokon a szakaszokon, ahol a pillanatnyi sebességek közel egyenesek és a gyorsulások is kicsit változnak, az adatpontok hasonló viselkedését tételezhetjük fel. Két adatpont közötti gyors változások eltérő tulajdonságú szakaszokat, szakadásokat jeleznek.

A 4-6. ábrák alapján lényegében hasonló tulajdonságú szakaszokat definiálhatunk, még akkor is, ha azok nem azonos mértékben jelentkeztek az egyes pontoknál. Ezekben a szakaszokban a hagyományos kiegyenlítéssel meghatároztuk a (2) összefüggésben definiált paramétereket. Azokat az adatpontokat, amelyek vizuálisan is kiugró értéknek tekinthetők kihagytuk az adatfeldolgozásból.

Az 1000 és 1002 pontoknál az intenzív leszakadás után 4 nappal még süllyedést, 9 nappal később már emelkedést tapasztaltunk. Ez az első intervallum, ahol szakadást tételeztünk fel. A 2003 pontnál ez a szakasz egy időponttal rövidebb.

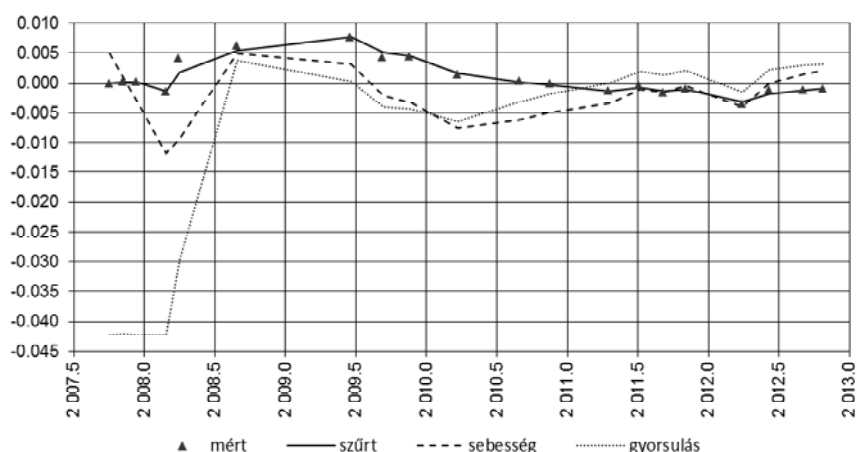


4. ábra. A 1000 pont magassági változásainak vizsgálata Kálmán-szűrővel, mért és szűrt értékek (m), pillanatnyi sebességek (m/y) és gyorsulások (m/y²)

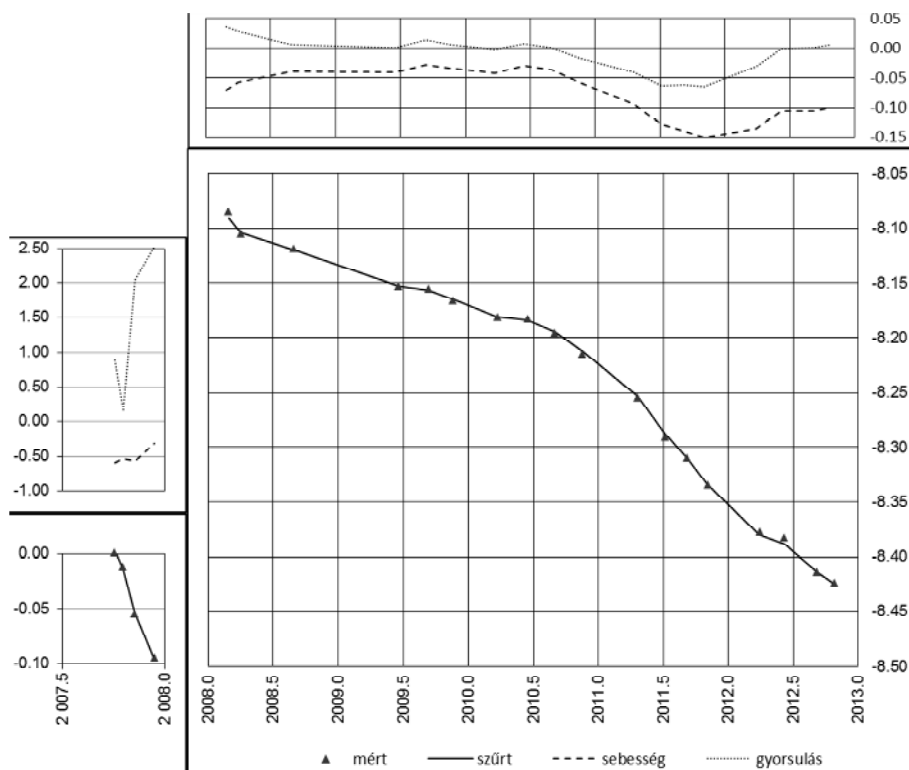
Az 1000 és 2003 pontok következő két intervallumánál a közel egy éves adathiányt simuló átmenettel modelleztük. Az utolsó intervallum csak három adatot tartalmaz, ezért itt nincsenek fölös mérések.

Az illesztések számszerű eredményeit, a szakaszok kezdő időpontjára vonatkozó pillanatnyi sebességeket és a konstans gyorsulásokat középhibáikkal együtt az 1-3. táblázatok tartalmazzák. A süllyedési görbéket és a pillanatnyi gyorsulásokat a 7-9. ábrák mutatják be.

A táblázatok és az ábrák értelmezésénél az előző részben mondottak mellett a következő szempontokat célszerű figyelembe venni. Ha a geodéziában szokásos módon feltételezzük, hogy a mérési javítások normális eloszlásúak, akkor a becült értékek és középhibáik aránya student eloszlást követ. Minél nagyobb ez az érték, annál szignifikánsabb, pontosabban meghatározható a paraméter. Ezeket az arányokat azonos intervallumra vonatkozóan célszerű összehasonlítani.



5. ábra. A 1002 pont magassági változásainak vizsgálata Kálmán-szűrővel, mért és szűrt értékek (m), pillanatnyi sebességek (m/y) és gyorsulások (m/y²)



6. ábra. A 2003 pont magassági változásainak vizsgálata Kálmán-szűréssel, mért és szűrt értékek (m), pillanatnyi sebességek (m/y) és gyorsulások (m/y²)

1. táblázat. Az 1000 pont magasságváltozásainak kinematikai paraméterei σ_v és σ_a a kezdő paraméterek, σ az egység súlyú mérések középhibája

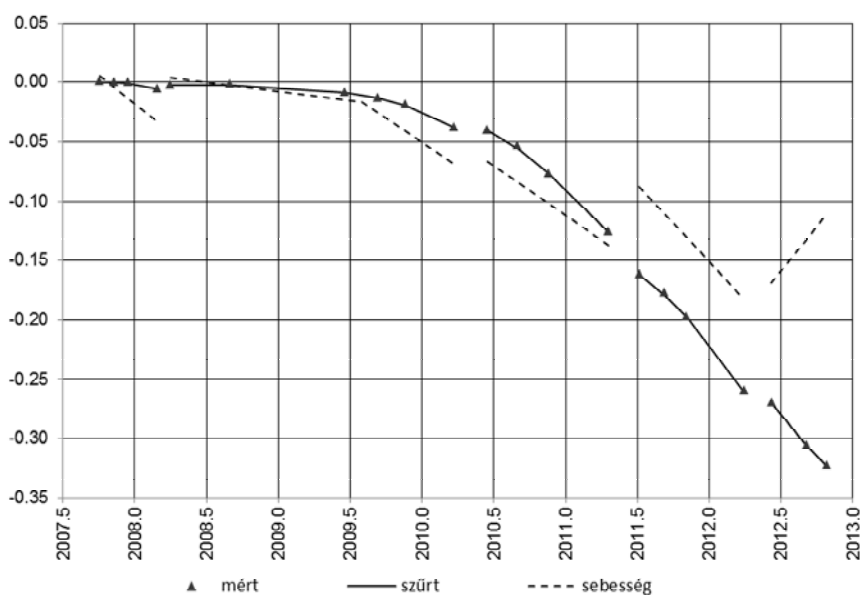
no.	idő intervallum decimális évben (y)	adatok száma	v_0 (m/y)	σ_v	a_0 (m/y ²)	σ_a
1	2007.756 – 2008.156	4	0.0052	0.0100	-0.0935	0.0465
2	2008.249 – 2009.463	3	0.0040	0.0032	-0.0153	0.0042
simuló átmenet						
3	2009.693 - 2010.225	3	-0.0257	0.0016	-0.0810	0.0095
4	2010.455 - 2011.299	4	-0.0663	0.0047	-0.0837	0.0104
5	2011.512 - 2012.241	4	-0.0872	0.0057	-0.1309	0.0143
6	2012.433 - 2012.819	3	-0.1687	0.0113	0.1517	0.0591
$\sigma = 0.0008$ (m)						

2. táblázat. Az 1002 pont magasságváltozásainak kinematikai paraméterei σ_v és σ_a a kezdő paraméterek, σ az egység súlyú mérések középhibája

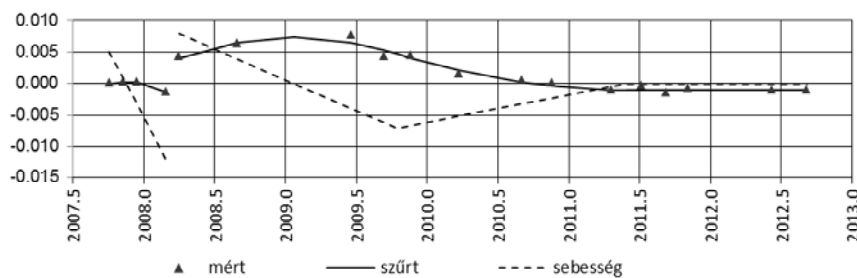
no.	idő intervallum decimális évben (y)	adatok száma	v_0 (m/y)	σ_v	a_0 (m/y ²)	σ_a
1	2007.756 - 2008.156	4	0.0050	0.0065	-0.0422	0.0301
2	2008.249 - 2009.693	4	0.0079	0.0012	-0.0097	0.0011
simuló átmenet						
3	2009.885 - 2011.299	5	-0.0067	0.0006	0.0044	0.0008
simuló átmenet						
4	2011.512- 2012.819	6	-0.0000	0.0005	-0.0000	0.0011
$\sigma = 0.0005$ (m)						

3. táblázat. A 2003 pont magasságváltozásainak kinematikai paraméterei σ_v és σ_a a kezdő paraméterek, σ az egység súlyú mérések középhibája

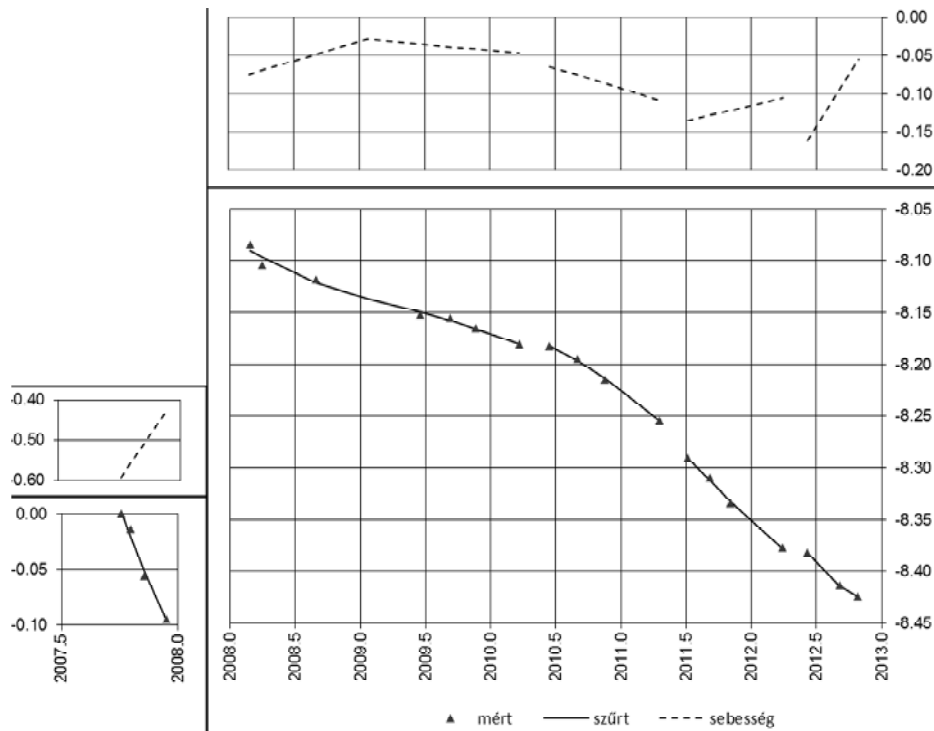
No.	Idő intervallum decimális évben (y)	Adatok száma	v_0 (m/y)	σ_v	a_0 (m/y^2)	σ_a
1	2007.756 - 2007.951	4	-0.5939	0.0988	0.8814	0.9481
2	2008.156 - 2008.660	3	-0.0744	0.0172	0.0508	0.0280
simuló átmenet						
3	2009.463 - 2010.225	4	-0.0349	0.0043	-0.0163	0.0172
4	2010.455 - 2011.299	4	-0.0644	0.0223	-0.0518	0.0491
5	2011.512 - 2012.241	4	-0.1352	0.0267	0.0419	0.0674
6	2012.433 - 2012.819	3	-0.1608	0.0535	0.2759	0.2792
$\sigma = 0.0039$ (m)						



7. ábra. Az 1000 pont magassági változásai hagyományos kiegyenlítéssel, mért és szűrt értékek (m), pillanatnyi sebességek (m/y)



8. ábra. Az 1002 pont magassági változásai hagyományos kiegyenlítéssel, mért és szűrt értékek (m), pillanatnyi sebességek (m/y)



9. ábra. Az 2003 pont magassági változásai hagyományos kiegyenlítéssel, mért és szűrt értékek (m), pillanatnyi sebességek (m/y)

Az arányok mellett azt is célszerű megnézni, hogy egységnyi idő alatt a v_0 vagy az $a_0/2$ érték okoz-e nagyobb változást. Ezek alapján vizsgálhatjuk, hogy melyik a dominánsabb komponens.

A táblázatokból kitűnik, hogy az egység súlyúnak tekintett mérések középhibája (σ) a 2003 pontnál a legnagyobb. Ez az első két intervallum adatainak a hatása, amely közvetlenül az intenzív leszakadás előtti és utáni szakasz.

Az 1000 és 1002 pontok első szakasza nagyon hasonló képet mutat, mindkét esetben a negatív gyorsulás a szignifikáns komponens (domború lefutás), amit kis pozitív sebesség csökkenés követ.

A következő szakasz kezdeténél mind a két pont pozitív ugrást (emelkedést) mutat. A viselkedésük innét már eltérő. A 1002 pont az emelkedést követően süllyed, majd az eredeti értékhez konvergál (8. ábra).

A 2003 pont első szakaszánál a nagy negatív sebesség a domináns, a számszerűen nagy, de a kiegyenlítés szempontjából nem szignifikáns pozitív gyorsulás (homorú lefutás) csökkenő tendenciára utal. Ez a megállapítás az utolsó szakaszra is igaz, de a negatív sebesség jóval kisebb, és az adatpontok száma is csak három.

Az 1000 pont 2. szakaszánál egy kismértékű negatív gyorsulás (domború lefutás) a domináns, ami 5mm/év süllyedést mutat. A 2003 pont 2. szakaszánál még a negatív süllyedés a domináns, amit jelentősebb pozitív gyorsulás (homorú lefutás) részben kompenzál. Az 1000 és 2003 pont 3. és 4. szakaszai hasonlóak, a nyári csökkenést negatív sebességek és gyorsulások jellemzik (domború lefutás), ami süllyedés fokozódására utal. Az 1000 pontnál az 5. szakasz még a süllyedés fokozódását jelzi, mivel mind a két negatív paraméter szignifikáns. Ennek az időszaknak a tavaszán a pont mellett már az új törési zóna is láthatóvá vált. A 2003 pontnál a negatív sebesség a domináns, amit kisebb pozitív gyorsulás lassít. Az utolsó szakaszok is hasonlóak, de a három adatpont miatt még jelentős következtetéseket nem célszerű levonni.

3 Összefoglalás és szintézis

A dolgozatban részletesen bemutattuk a kinematikai függvény tulajdonságait és a használhatóságát kinematikai folyamatok modellezésére hagyományos kiegyenlítéssel és Kálmán-szűrővel.

A Kálmán-szűrő kiváló eszköznek bizonyult a vizuálisan is feltételezhető tendenciák, a jelentősebb szakadások számszerű kiemelésére, amit a pillanatnyi sebesség és gyorsulás görbék jeleznek. Az így definiálható intervallumok jellegzetes paramétereit hagyományos kiegyenlítéssel határoztuk meg.

A paraméterek alapján felvázolt jellegzetes tendenciák közvetlenül nem alkalmasak dinamikai modell felállítására, de közvetve hasznos információkat szolgáltatnak. Ha a sebesség a domináns (egyenes vonalú egyenletes mozgás) a folyamatokat egy konstans erő okozza, az eltérő gyorsulások ennek az erőnek a csökkenését vagy növekedését jelzik. Az 1000 és 2001 pontoknál a 2. szakaszban tapasztalt emelkedés nagyon hasonlít az elasztikus viszkózus modell viselkedésére. Mivel 2001-es pont emelkedése egy idő után az eredeti értékhez konvergált, az emelkedést nem a rugalmasság, hanem a belső tömegmozgások okozhatták. Annak ellenére, hogy a lösznek ismert a rugalmassági tényezője, a változások irreverzibilis folyamatokat eredményeznek, ezért csak kvázi elasztikus viszkózus modellt tételvezethetünk fel. Ennek lényege a következő. A Duna vízszintje alatti vörösgyag rétegek plasztikussá, folyóssá válnak, ami már nem bírja elartani a merev lösz rétegek önsúlyát. A merev rétegek ezért lassan meggörbülhetnek, dőlhetnek, és mikro repedések alakulhatnak ki, amit a felszíni vizek is befolyásolhatnak. A plasztikus rétegek anyaga a Duna irányába mozoghat, amit a víz folyamatosan elszállít. Ha a repedések menti súrlódás és a plasztikus rétegek csökkent szilárdsága már nem tudja lassítani a folyamatot, intenzív leszakadás történik, a plasztikus tömegek nagy része kitorlódvá a Dunában szigeteket képez, más része a magas part peremét is megemelheti. Az ezt követő lassú változások az egyensúly ismételt kialakulásáig folytatódnak.

A valódi dinamikai modellezés végelem módszerrel lehetséges, ahol az ismert fizikai és geometriai paramétereket is figyelembe kell venni.

Köszönetnyilvánítás. Ez a tanulmány az OTKA K 78332 pályázatának támogatásával készült.

Hivatkozások

- Bányai L** (2011a): Geodéziai mérések integrált 3D kiegyenlítése, Geomatikai Közlemények, 14(1), 45-54.
- Bányai L** (2011b): Rigorous 3D Integrated Adjustment of GPS Baselines, Geodetic Total Station and Levelling Measurements, Proceedings, FIG web site, ISBN 978-87-90907-92-1.
- Bányai L, Újvar G, Mentés Gy** (2012): Kinematics and dynamics of a river bank failure determined by integrated geodetic observations - Case study of Dunaszekcső Landslide, Hungary. Proceeding of the annual International Conference on Geological & Earth Sciences (GEOS 2012), ISSN 2251-3361. DOI: 10.5176/2251-3361_GEOS12.36 pp. 51-54.
- Husti Gy, Ádám J, Bányai L, Borza T, Busics Gy, Krauter A** (2000): Globális helymeghatározó rendszer (bevezetés), Nyugat-magyarországi Egyetem.
- Mentés Gy, Bányai L, Újvári G, Papp G, Gribovszki K, Bódis V B** (2011): Recurring Mass Movements On The Danube's Bank at Dunaszekcső (Hungary) Observed by Geodetic Methods., Proceedings of the Joint International Symposium on Deformation Monitoring. Hong Kong, China, 2-4. November 2011.
- Mentés Gy, Bányai L, Újvári G, Papp G, Gribovszki K, Bódis V B** (2012): Recurring mass movements on the Danube's bank at Dunaszekcső (Hungary) observed by geodetic methods. Journal of Applied Geodesy, 6(3-4). 203-206.
- Teunissen PJG** (2001): Dynamic data processing. Delft University Press.
- Újvári G, Mentés Gy, Bányai L, Kraft J, Gyimóthy A, Kovács J** (2009a): Evolution of a bank failure along the River Danube at Dunaszekcső, Hungary. Geomorphology 109, 197-209 doi:10.1016/j.geomorph.2009.03.002.
- Újvári G, Bányai L, Mentés Gy, Gyimóthy A, Holler I** (2009b): A dunaszekcsői csuszamlás mozgásvizonyai. Geomatikai Közlemények, 13, 233-239.
- Újvári G, Bányai L, Gyimóthy A, Mentés G** (2009c): A dunaszekcsői földcsuszamlás geodéziai mozgásvizsgálatának eredményei. Geodézia és Kartográfia 61(7), 11-17.
- Újvári G, Bányai L, Mentés Gy, Papp G, Gribovszki K, Bódis VB, Bokor Z** (2011): Utómozgások a dunaszekcsői magasparton. Geomatikai közlemények 14(1), 105-110.