

VOXELEK FELHASZNÁLÁSA 3D FÖLDTANI MODELLEZÉSBEN

KISALFÖLDI PÉLDATERÜLETRE

Tudományos Diákköri Dolgozat



Készítették:

Bartakovics Edina

geológus MSc

Koma Zsófia Viktória

földtudomány BSc geofizika szakirány

Témavezető:

Dr. Székely Balázs

egyetemi docens

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Geofizikai és Űrtudományi Tanszék

Budapest, 2013. január 8.

Tartalom

1. Bevezetés.....	3
2. Mihályi és környékének geológiája.....	5
Terület áttekintő geológiai ismertetése	5
Felhasznált fúrásadatbázis.....	7
3. Módszertan	10
Digitális modellezés	10
Voxel fogalma	11
Elméleti megfontolások.....	12
3D voxeles adatbázis létrehozásának lépései	13
Interpoláció.....	14
Mesterséges adatmodellezés	17
4. Eredmények.....	20
Szeizmikus szelvények feldolgozása	22
Fúrásadatbázis felhasználásával készült modellek és kiértékelésük	25
Különböző interpolálási eljárásokkal kapott eredmények összehasonlítása	29
A modellek összevetése a fúrásadatbázissal	34
A modellek összevetése a szeizmikus horizontokkal.....	39
Szeizmikus horizontok és fúrás adatok alapján készített modell	43
5. Összefoglalás.....	49
6. Köszönetnyilvánítás	50
7. Irodalomjegyzék.....	51

1. Bevezetés

A geológiai adatok feldolgozása napjainkig legtöbbször 2 dimenziós (2D) térképek, szelvények segítségével történt. A geoinformatika fejlődése révén elterjedtek azonban különböző alapon működő 3 dimenziós (3D) földtani modellezések, melyek új távlatokat nyitottak a geológiai adatok 3D-ben való feldolgozására és értelmezésére (pl. Fallara et al, 2006; Calcagno et al, 2006).

Munkánk előzményeként érdemes megemlíteni egy a Keleti-Alpokra készült 3D geológiai modellt. Itt az alapadatok geológusok által rajzolt szelvények voltak, amelyeket vektoros adatrendszerben (az egyes kereszt- és hosszmeteszeteket egymással együtt) ábrázoltak. Azonban nem volt egyszerű a geológusok által rajzolt 2D szelvényeket 3D-ben integrálni (Székely et al, 2007). Ez a kérdéskör számunkra érdekessé tette, hogy mi történik, ha egy tetszőleges példaterületen rendelkezésünkre álló különböző geológiai adatok integrálásával 3D objektumokat feltöltünk geológiai tartalommal. Motivációt jelentett számunkra az is, hogy például Hollandia területére létezik voxelizált adatbázis (igaz, csak 500 méter mélységig), amely online bárki számára szabadon hozzáférhető (<http://www.dinoloket.nl/nl/download/subsurfacegeotop.html>).

A 3D-ben történő geológiai modellezés rengeteg problémát vet fel:

- 1) hogyan induljunk ki pontszerű fúrásadatokra, illetve szeizmikus szelvényekre és geológiai *apriori* ismeretekre támaszkodva
- 2) miként integráljuk a különböző skálájú adatokat
- 3) hogyan modellezzük a különböző sztratigráfiai helyzeteket, ahol az egymásra település nem folytonos
- 4) hogyan modellezzük a vetőket

Dolgozatunkban azt vizsgáltuk, hogy milyen lehetőségeket nyújt a 3D földtani modellezésben a voxelek (3D pixelek) alkalmazása. Ez egy térinformatikai kísérlet melynek során a kisalföldi példaterületen fúrásadatok és szeizmikus szelvények értelmezésének segítségével létrehoztunk voxeles modelleket. Összehasonlítottuk egyrészt a különböző adatbázisokon alapuló adatkockákat, és megnéztük az egyes modellek megbízhatóságát, geológiai realitását. Megvizsgáltuk a metodikai lehetőségeket, amelyekkel különböző adattípusokból 3D voxeles modellt tudunk generálni, teszteltük az alkalmazott szoftvert különböző, mesterségesen előállított geológiai helyzetekre.

Jelenleg Magyarország területére vonatkozóan csak Jordán Győző (Jordán, 2012) által létrehozott voxeles modelleket ismerjük, aki a Zalai- és a Káli-medence területére készített ilyen jellegű térkitöltő modelleket.

Példaterületünknek a Kisalföldet választottuk. Ennek okai egyrészt a Geofizikai Tanszéken elérhető, erre a területre vonatkozó szeizmikus adatbázis, másrészt a Magyar Földtani és Geofizikai Intézet Geoinformatikai Osztálya által rendelkezésünkre bocsátott a területre eső ártértékelt fúrás-adatbázis. Ezeken kívül elérhető volt számunkra jó néhány publikált szeizmikus értelmezés a területről, és segítették az értelmezést – maga az értelmezés nem volt elsődleges feladata dolgozatunknak. A terület kiválasztásában az is döntő érvként szerepelt, hogy a Kisalföldön kis reliefekkel lehet számolni, ami szintén könnyíti a voxeles modellezést. A modellezés során többfajta szoftver nyújtotta lehetőséget ötvöztünk annak érdekében, hogy a kapott voxeles modell az adott adatblokkokra minél pontosabb legyen. Jellegzetes problémája az a 3D földtani modellezésnek, hogy egyelőre csak többszoftveres eljárás során juthatunk ilyen modellekhez.

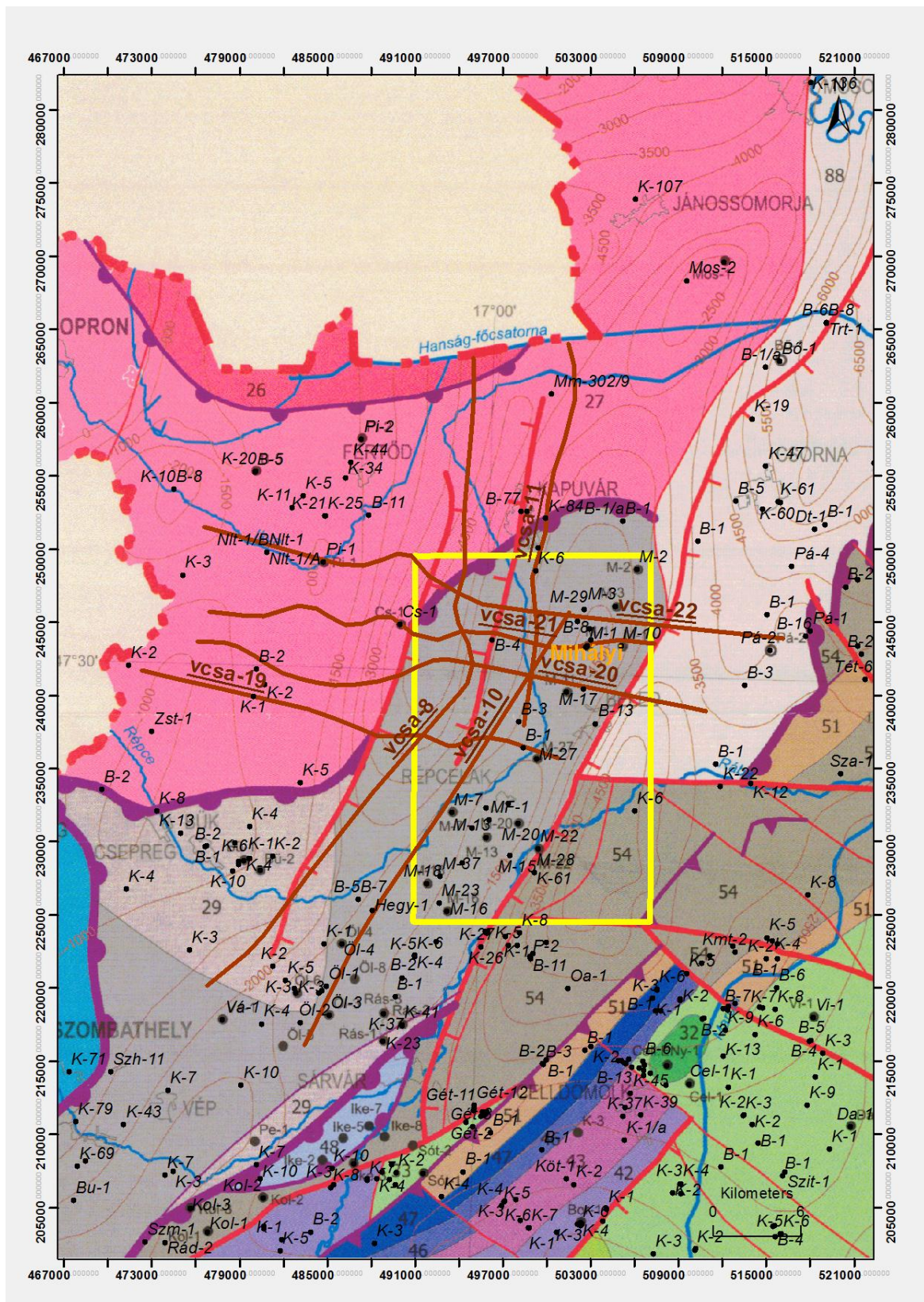
2. Mihályi és környékének geológiája

Ebben a fejezetben az általunk vizsgált példaterületet szeretnénk röviden bemutatni, főleg arra fókuszálva, ami a voxeles modelljeink értelmezéséhez szükséges.

Terület áttekintő geológiai ismertetése

Példaterületünk a Kisalföld délkeleti részén, Mihályi település közelében található (1. ábra). A Kisalföld kialakulása hasonló az Alföldéhez, bár annál sokkal kisebb terület. Szerkezetileg átlós és peremtörések mentén kialakult katlanszerű süllyedék. Aljzatát alapvetően két kristályos egységre lehet osztani (Kőrössy, 1987). A nyugati részen a Nyugat-magyarországi Kristályos Öv kőzetei fordulnak elő, melyek egészen a Rába-vonalig húzódnak. Ezen a területen főleg ópaleozoós képződmények találhatók. A Rába-vonaltól délkeletre mezozoós kőzetek alkotják az aljzatot (Kőrössy, 1987). A képződményekre mindkét területen miocén üledékek települnek, ezekre pedig negyedidőszaki képződmények. Az általunk vizsgált területen paleozoós kőzetek alkotják az aljzatot.

A területen több szeizmikus szelvény és fúrásadat is rendelkezésünkre állt a 3D modellezéshez.



1. ábra: A Kisalföld áttekintő aljzattérképe a rendelkezésünkre álló adatbázisról. feketével a fúrások, barnával a Geofizikai Tanszéken hozzáférhető szeizmikus szelvények, sárgával az általunk vizsgált kisebb példaterületet jelöltük. Az alaptérkép forrása: Haas et al, 2010

Felhasznált fúrásadatbázis

A Magyar Földtani és Geofizikai Intézettől (MFGI) egy 2011-ben újraértelmezett fúrásadatbázist kaptunk, elsősorban abból dolgoztunk. Mivel az általunk alkalmazott szoftver megkívánta az egyes formációk sorrendbe tételét, ezért a kapuvári rétegsor régi értelmezésének (1. táblázat) és az MFGI-től kapott fúrásadatok felhasználásával létrehoztunk egy közetrétegtani táblázatot a vizsgált területre (2. táblázat).

Ez a rétegtani táblázat tartalmazhat hibákat, például nem vettünk figyelembe heteropikus fácieseket, viszont létrehozása szükséges volt, mert a program amivel dolgoztunk megkövetelte egy sorrend felállítását.

Kapuvári térképlap földtani képződményei				
Földtani korbeosztás			Vastagság (m)	Képződmények
Negyedidőszaki		Holocén	0-30	Ártéri képződmények, kavics, homok tőzeg
		Pleisztocén	0-400	Folyóvízi kavics, kavicsos homok, vörös agyag, áthalmazott bazalttufa, alginít, betonit
Harmadidőszak	Pannóniai	Felső-pannóniai	400-1800	Hansági Formáció
				Pulai Alginít Formáció
				Tapolcai Bazalt formáció
				Rábaközi Formáció
				Tihanyi Formáció
				Újfalui Homokkő Formáció
				Somlói Formáció
	Miocén	Alsó-pannóniai	300-1000	Drávai Agyagmárga Formáció
				Tófeji Homokkő Formáció
				Beleznai Mészmárga Formáció
				Mihályi Konglomerátum Formáció
				Pásztói Trachit Formáció
		Szarmata	0-450	Kozárdi Formáció
				Pásztói Trachit Formáció
		Bádeni	0-800	Rákosi Formáció
				Bádeni Formáció
		Kárpáti	0-300	Pásztói Trachit Formáció
				Terrigén tarka agyag, homok, konglomerátum (Ligeterdői Kavics Formáció)
Paleozoikum	Perm	Felső	0-450	Vörös homokkő
		Alsó		
	Devon		>40	Fillit, mész-dolomitpala, agyagpala, kvarcit, kristályos mészkő
	Szilur		>60	Szericitpala, grafitos fillit, homokkőpala, kloritos fillit

1. táblázat: A kapuvári térképlapban szereplő elvi rétegsor (Scharek, 1993 alapján módosítva)

Mihályi környékének földtani képződményei			
Földtani korbeosztás			
Negyedidőszaki		Holocén	Folyóvízi üledékek (aleurit, homok)
		Pleisztocén	Pleisztocén képződmények általában (folyóvízi kavics, homok, aleurit, agyag)
Harmadidőszak	Pannóniai	Felső-pannóniai	Hansági Formáció
			Tapolcai Bazalt formáció
			Zagyvai Formáció
			Tihanyi Formáció
			Somlói Tihanyi Formáció összevontan
			Újfalui Homokkő Formáció
	Alsó-pannóniai		Algyői Formáció
			Szolnoki Homokkő Formáció
			Endrődi Márga Formáció
	Miocén	Szarmata	Kozárdi Formáció
			Szilágyi Agyagmárga Formáció
			Pásztori Trachit Formáció
		Bádeni	Rákosi Mészkő Formáció
			Pusztamiskei Formáció
			Bádeni Formáció
			bádeni korú breccsa
		Kárpáti	Ligeterdői Kavics Formáció
Paleozoikum	Devon		Mihályi Fillit Formáció

2. táblázat: A kapuvári rétegsor ismeretében Mihályi-hát és környékének az újraértelmezett fúrásadatokról felállított rétegsora.

A Mihályi–Répcelak terület legidősebb képződményei szilur-devon korúak, délnyugat-északkelet irányú és északnyugat felé fiatalodó övekbe rendeződnek (Körössy, 1987). (A továbbiakban az egyes formációk leírása tekintetében a magyarországi litosztratigráfiai alapirodalomra (Császár, 1997) támaszkodunk.) A fúrási adatok alapján az aljzat legtöbbször

a Mihályi Fillit Formációba sorolható, bár néhol az adatbázisban csak annyi volt feltüntetve, hogy paleozoós kőzet alkotja.

A miocén-pliocén medenceüledékek szögdiszkordanciával és tetemes üledékhiánnyal telepszene devon-, szilur kori anchimetamorfitokra (Kőrössi, 1987). A területen előforduló formációk közei pannóniai, szarmata, bádeni, kárpáti korúak. Kárpáti korú üledékeket a Ligeterdői Kavics Formációba lehet sorolni (Scharek, 1993).

A bádeni képződmények az alábbi formációkba sorolhatóak be: Bádeni Formáció, Pusztamiskei Formáció, Rákosi Mészke Formáció. Ezeken kívül még bádeni korú breccsa is fellelhető számos fúrásban. A Bádeni Agyag Formációt uralkodóan szürke, zöldesszürke agyag, agyagmárga alkotja, gazdag, vékonyhéjú molluska- és foraminifera-fauna található benne, nyíltvízi medence fáciesű. Ezzel szemben a Rákosi Mészke Formáció alapvetően lithothamniumos mészkőből, molluszkás mészhomokkőből (kalkarenit), molluszkás mészkő képződményekből álló sekélytengeri zátonyképződmény (Scharek, 1993, Császár, 1997).

Szarmata korú üledékek sorolhatók a Pásztori Trachit Formációba, Szilágyi Agyagmárga Formációba és a Kozárdi Formációba. A Szilágyi Agyagmárga Formáció sekély neritikus szürke foraminiferás agyagmárga alkotja főleg, gyakran turitellás-corbulás makrofauna található benne. Néhol laterálisan összefogazódik a Rákosi Mészke Formációval, ezeket vékony homokkő és tufit zsinórok jelzik (Császár, 1997).

Alsó-pannóniai képződmények közé tartoznak az Endrődi Márga Formáció, a Szolnoki Homokkő Formáció, és az Algyői Formáció közei. Az Endrődi Márga Formáció képződményei általában mészmárgák, márgák, agyagmárgák, melyek rendkívül változatos vízmélység-viszonyok között (15–800 m) képződött nyíltvízi üledékek. Szolnoki Homokkő Formáció mélyvízi környezetben keletkezett, turbidit eredetű finomszemcsés homokkő, aleurolit és agyagmárgamárga rétegek váltakozásából áll. Vastagsága változó lehet, a mélymedencékben akár 1000 métert is elérheti, a medenceperemek irányába viszont kiékelődik. Az Algyői Formáció üledékei elsősorban víz alatti lejtő környezetben (deltalejtő és medencelejtő) lerakódott sötétszürke agyagmárga sorozat, mely szenesedett növényi maradványokat tartalmazhat (Császár, 1997).

A felső-pannóniai képződményeket az Újfalui Homokkő Formációba, Tihanyi Formációba, Zagyvai Formációba, Tapolcai Bazalt Formációba, Hansági Formációba sorolták, ezeken kívül még a Somlói és a Tihanyi Formációt néhány fúrásban összevontan kezelték (Scharek 1993, MFGI fúrásadatbázis 2011). Ezeket a felső-pannóniai formációkat a Dunántúli Formációcsoportba szokták sorolni, melynek legjellemzőbb üledékei a szürke agyagmárgás aleurit és finom-aprószemű homok, homokkövek, néhol szürke agyag, tarkaagyagos aleurit,

vörösgyag, szenesagyag betelepülések is találhatóak, valamint Na-alkáli kemizmusú bazaltok, bazalttufák. A képződmények egy része deltafront-deltasíkság környezetben rakódott le, másik része fluviális és tavi eredetű. A Tapolcai Bazalt Formáció kőzetei a vulkáni tanúhegyekhez köthetőek (Császár, 1997).

A pleisztocén képződmények általában folyóvízi kavicsok, homokok, folyóvízi-tavi aleuritok, agyagok. A holocén képződmények pedig legtöbbször folyóvízi üledékek, például aleuritok, homokok (Scharek, 1993). Az interpolálás megkönnyítése érdekében a pleisztocén és holocén üledékeket nem bontottuk további csoportokra.

3. Módszertan

Ebben a fejezetben először rövid áttekintést adunk a digitális modellezésről, majd definiálni fogjuk a voxel fogalmát, ezután pedig a voxeles földtani adatbázis létrehozásának lépéseit. Ismertetjük a különböző interpolálási problémákat, végül pedig mesterségesen létrehozott adatokat modellezünk voxelekkel.

Digitális modellezés

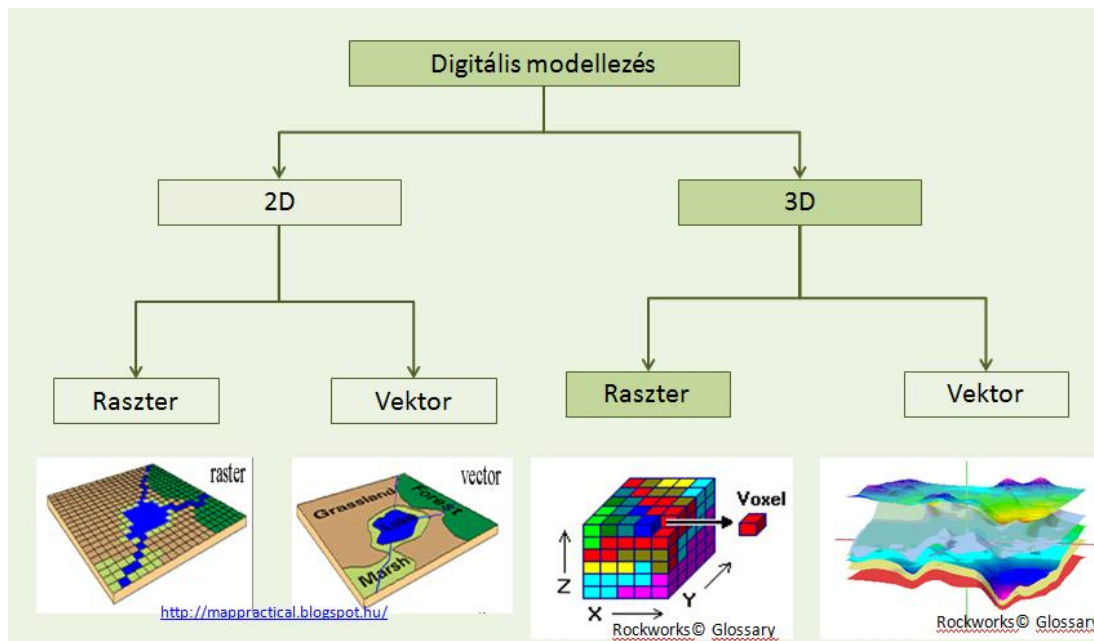
A digitális modellezés során az adatainkat két különböző rendszerben tárolhatjuk, a kétfajta adatrendszer nagyon rövid ismertetését Elek (2006) alapján foglaltuk össze.

Az egyik adatrendszer a raszteres, melynek legkisebb geometriai objektuma az elemi pixel, amelyek diszjunkt, de térkitöltő elemekre bontják a modellteret. A másik a vektoros, ahol a legelemibb geometriai építőelem a pont (node) és ebből kiindulva létrehozhatóak szakaszok, vonalláncok, illetve poligonok (6. ábra).

A két adatrendszer közötti alapvető különbség, hogy míg a raszteres adat kitölti a teret, addig a vektoros esetén meg tudjuk adni, hogy hol mi található.

Jelen esetben a rendelkezésre álló alapadataink (pontok és vonalláncok, azaz polyline-ok) vektoros adatok, ezekből interpoláció révén konverzióval nyerünk raszteres adatrendszert.

A rendelkezésre álló adatok, amelyeket interpolálunk, korántsem egyenközűen mintavételezettek. További probléma, hogy voltaképpen egyenértékű függvényként definiáljuk a felületeket (X, Y, Mélység), pedig ezeket különböző vetők szabdalják fel, illetve, a különböző rétegek kivékonyodnak, eltűnnek, szakadás van bennük.



2. ábra: Digitális modellezés áttekintő képe

Voxel fogalma

A voxel az elemi pixelnek a 3D-ben való kiterjesztése, azaz térbeli pixel, mely mindhárom tengely mentén kiterjedéssel bír. Ezt egy 3D térfogatelemként kell elképzelni, amit adattal töltünk fel, és horizontálisan és vertikálisan meghatározott módon a rendelkezésre álló adatblokkot egyenközűen felosztjuk úgy, hogy mindegyik térbeli elemnek ugyanaz a felbontása. A 6. ábrán láthatjuk, hogy a digitális modellezés 3D-ben a raszteres adatbázis megfelelője a voxeles modell. Az ábrán az elemi térfogatok különböző színei a különböző adatokat szemléltetik.

Egy voxeles adatbázis felépítése azt a célt szolgálja, hogy a voxelek létrehozásakor az adott esetben pontszerű, illetve vektoros adatrendszereink (és esetleg meglévő, más raszteres vagy voxeles adataink) 3D-re interpolálva egységes felbontású képet adjanak egy-egy 3D blokkra. Természetesen attól függően, hogy mennyi és milyen adat áll rendelkezésünkre a kapott voxeljeink hibával terheltsége és megbízhatósága eltérő. A voxeleket minden esetben különböző adatokkal paraméterezhetünk fel. A jelen dolgozatban a különböző formációk térbeli elterjedésére voltunk kíváncsiak, így a különféle formációkat tartalmazzák különböző felbontásban a voxelek.

Azaz a voxeles adatbázis egy lehetséges modellt ad eredményként, arra vonatkozóan, hogy jelenlegi mért adataink, értelmezett szelvényeink, egyéb rendelkezésünkre álló (geofizikai mérések, geológiai jegyzőkönyvek) adatainkat integrálva, a kiválasztott interpolálási módszer

használata esetén mindez 3D-ban hogyan néz ki. A modellek alapján elgondolkozhatunk, hogy ez geológiailag és/vagy geofizikailag helyes-e.

A modellünk megbízhatóságát leginkább azzal tudjuk visszaellenőrizni, hogy a modellezés során néhány adatot a modellezésből kihagyva megnézzük, hogy kevesebb adat felhasználásával sikerült-e visszaadni az eredetiből kihagyott, de rendelkezésünkre álló adatot. Bár logikusnak hangozna egy fajta inverziós eljárást alkalmazni az adatokon, azaz kiszámolni a voxelek által feltételezett közzettestekben feltételezhető gravitációs, mágneses anomáliát, és ezt a mért adatokkal összevetni, de sajnos az interpolált közzettestekről rendelkezésre álló információ általában nem elég pontos, illetve nem kellő sűrűségű ehhez a kalkulációhoz.

A voxelek ezen kívül lehetővé teszik egy-egy tetszőlegesen kiválasztott adat térbeli kiterjedésének vizsgálatát, mégpedig izofelületek létrehozásával. Ez sekélygeofizikai vizsgálatnál például adott esetben lehetővé teszi, hogy ha vannak multielektródás méréseink egy területre, akkor egy adott fajlagos ellenállás lehetséges 3D kiterjedését vizualizálni tudjuk. A jelen projektben ez természetesen nem használható.

A voxelek segítségével térfogatot is számolhatunk, a kapott modellekből, kiszámítható, hogy a 3D blokkban az adott adatkategóriából (pl. közzettípus) mennyi van jelen.

Elméleti megfontolások

A voxelek létrehozása például egy osztályozott pontfelhő segítségével történik, amelyben jelen esetben az (X , Y , Z , *Formáció*) adatnégyes szerepel. Az interpoláció során keressük azt a függvényt, ami a térben megadott pontokra egy olyan modellt hoz létre, amely leginkább megbecsüli a hiányzó pontok értékeit a megadott pontok értékei alapján.

A formációkat sorrendbe helyezve különböző számokat rendeltünk hozzájuk, viszont mivel a vizualizálni kívánt adatok nem folytonos adatok, hanem különböző rétegeket jelző indexértékek, ezért a voxelek létrehozásakor egyfajta szakértői rendszerként (expert system) geológiai interpolációt kell alkalmaznunk. Ha rögtön 3D-ben interpolálnánk a kevés pontszerű adatot, az egyes formációk könnyedén túlinterpolálódnak műtermékeket (artifaktokat) okozva az eredményekben. Ennek a fő oka az, hogy a formációk kiterjedése vízszintes és függőleges irányban nagyon erősen anizotróp: vízszintesen akár 50-100 km hosszan is kiterjedhet egy-egy formáció, míg vertikálisan a vastagsága lehet csupán néhány méter. Interpolálási szempontból ez nagyon kellemetlen tulajdonság.

Következésképpen mesterséges határok közé kell szorítanunk az interpolálást. Ez az eljárás már ismert 2D interpolálás esetén is, amikor beépítünk a modellbe ún. *hardline* és *softline* vonalakat, melyek pl. a vetőket építik be a modellezett felszínbe.

A 3D interpolálás során szükséges az interpolálás lehatárolása mind vertikális mind horizontális irányban, hogy a „túlinterpolálás” ne, vagy kevésbé jelenjen meg az eredményeken. A vertikális lehatárolás jelen dolgozatban fekü- és fedőgridek 2D-ben történő interpolálásával valósult meg. A fekü- és fedőgrideket fúrásadatokból hoztuk létre.

A horizontális lehatárolás nem valósult meg a jelen dolgozat keretein belül, itt a vetők modellbe való beépítését kell majd távlatilag végrehajtani.

Fontos megjegyezni, hogy mivel különféle rétegeket modellezünk, számolnunk kell az egyes rétegek egymásra településével. Könnyen elképzelhető, hogy a néhány fúrás alapján interpolált eredmények „ütköznének”, ennek elkerülésére kényszerfeltételt alkalmazhatunk: az onlap funkció használatával érvényesíthetjük az egymásra település törvényét, azaz a nagyobb számértéket képviselő formációra (idősebb) települ a kisebb számértékű formáció (fiatalabb).

Elméleti megfontolást kíván még a felbontás kérdése. Ennek kialakítása függ, a modellezendő adatbloktól, illetve a modell céljától. A horizontális felbontást az adatsűrűség a mérvadó, míg a vertikális felbontás esetén a becsült rétegvastagságok figyelembe vételével érdemes kialakítani.

3D voxeles adatbázis létrehozásának lépései

Dolgozatunkban a voxeleket geofizikai igényrel, de geológiai tartalommal hoztuk létre. Célunk a különböző formációk térbeli kiterjedésének vizsgálata volt, főként a Magyar Földtani és Geofizikai Intézet újraértelmezett fúrási adatbázisa és különböző, a Geofizikai és Űrtudományi Tanszék által rendelkezésünkre bocsátott szeizmikus szelvények értelmezése alapján.

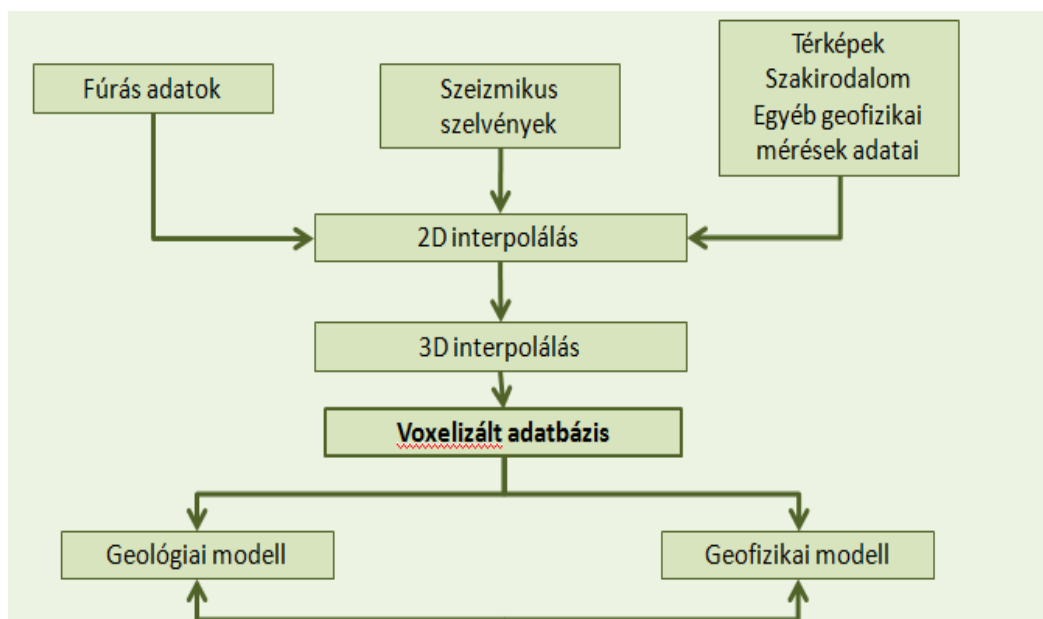
A kiinduló adataink ezek alapján egyrészt a fúrásadatbázisban megtalálható formáció feküjének és fedőjének elhelyezkedése méterben, az ehhez tartozó kor, a fúrás elhelyezkedése, teljes mélysége és a balti tengerszinthez viszonyított magassága. Mindez egy pontszerű adatbázis, mégis ez a legfontosabb rendelkezésünkre álló adat.

Másik adatforrásunk, a már feldolgozott szeizmikus szelvények, amelyben a különböző reflexiók lefutását követve, ms-ban megkapjuk az egyes formációk elhelyezkedését. A mélység–sebesség konverziót checkshot adatok alapján becsültük, ennek segítségével a fúrásadatbázist integráltuk a szeizmikus adatbázissal. Az értelmezés során figyelembe vettük a fúrásból ismert különböző formációk talpmélységét, majd a 2D polyline-ok megfelelő mélység–sebesség konverziójának elvégzése után előállt számunkra ezeknek a vonalaknak a mélységben való elhelyezkedése.

Egyrészt felfoghatjuk a különböző adatbázisokból nyert pontszerű információkat (a polyline is vertexekből áll) egy osztályozott 3D pontfelhőnek. Ez egy $(X, Y, Z, Osztály)$ attribútumokkal bíró adatrendszer, ahol az (X, Y) EOVS koordináták, a Z a mélység, az *Osztály* pedig a vizualizálni kívánt adat, azaz a formáció számszerű megfelelője.

Az osztály adattípusától függően ezek után létrejött a geológiai tartalmú voxeles adatbázisunk. Dolgozatunkban mi csak geológiai modelleket készítettünk, de lehetett volna geofizikai adatok felhasználásával is voxelizálni, ha rendelkezésre állnak a fúrásokhoz tartozó logok (7. ábra).

Ezután következik a kapott modell vizsgálata, esetleg többféle interpolálás kipróbálása, a kapott modell eddigi elképzelésekkel összevetése. (7. ábra).



3. ábra: Folyamatábra a voxelizálás egyes lépéseiről

Interpoláció

Három interpolációs módszerrel hoztunk létre modelleket, melyek a legközelebbi pontok módszere (nearest neighbour, closest point) és a súlyozott számtani közép módszere (inverse distance weighted) valamint a krigelés.

Az interpolálás kérdése azért volt nehéz, mivel a modellünkbe nem építettünk be geofizikai adatokat, ezért alapvetően számokkal megfeleltetett és időrendi sorrendbe rendezett számokkal ellátott formáció (index-) adatokat használtunk, amely nem alkot folytonos adatsort. Két formáció indexének nem létezik átlaga, így leginkább a közeli pontok módszere vezethet célra.

A legközelebbi pontok interpolációs módszernél az interpolált pontok, azt az adatot kapják, amely valós ponthoz közelebb esnek. Ennek révén azok a pontok melyek, egy adott

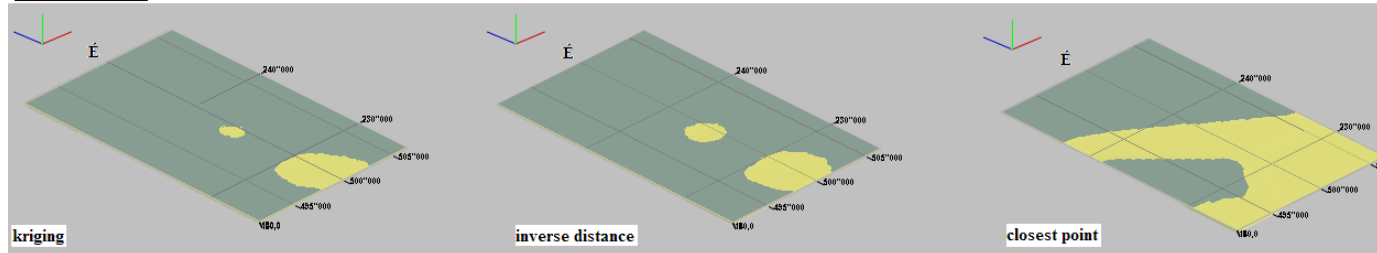
formációhoz közelebb esnek, azok ugyanazt a formáció értéket kapják. A módszer során a Thiessen-poligonok 3D megfelelőjeként Thiessen-poliéderek alakulnak ki, melyek esetlegesen vetőként értelmezhetünk egy geológiai modellben (8. ábra).

A súlyozott számtani közép módszere esetén (8. ábra) az eredmény lényegében a környező pontok értékeinek súlyozott számtani közepe lesz. Amennyiben megadjuk, hogy leginkább a közeli pontok értéke érvényesüljön nagyobb súllyal, elképzelhető, hogy a módszerrel létrehozott modell alkalmazható lesz. Ennél a módszernél nem jönnek létre vetőszerű képződmények, azonban elképzelhető, hogy megjelennek olyan formációk, amelyek a két határformáció értékének átlagaként kerülnek oda, azaz plusz formációk épülnek be a modellbe. Ezen kívül jellemző interpolálási hiba, az ún. tehén szemek (bull's eye-ok) megjelenése.

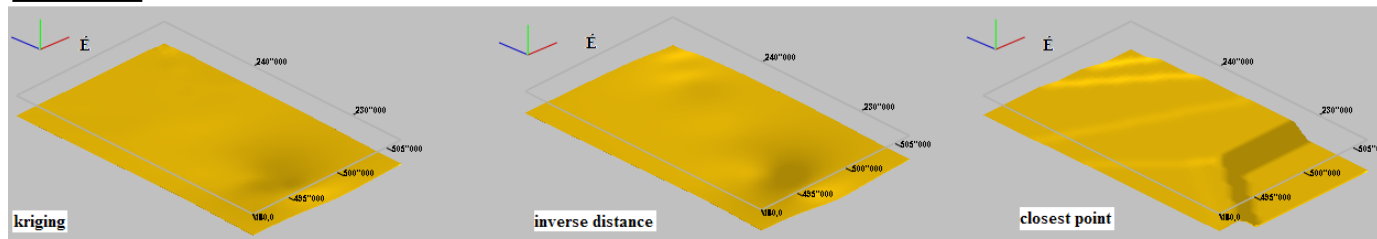
Krigelés során (8. ábra) egy ismeretlen értékű pont várható értékének meghatározásához a környező mért adatokat használjuk fel. Ezeket a különböző távolságú pontokat azonban nem ugyanakkora súllyal, valamint a hatástávolságon kívüli pontokat egyáltalán nem vesszük figyelembe. Az eljárás során variogramokat vizsgálunk, és a lehető legjobbat keressük, és az szerint interpoláljuk az adatsorunkat. A variogram megmutatja, hogy a pontok közötti távolság hogyan függ a pontokhoz tartozó értékek átlagos eltérésétől. Az eljárás kiküszöböli a bull's eye-problémát, azonban, itt is előfordulhatnak betoldott formációk, hiszen szintén folytonos számadatként kezeli a beadott adatokat.

Az utóbbi két eljárás előnye viszont a legközelebbi pontok módszerével szemben, hogy itt lehetőség van 3D-ben anizotróp interpolálás végrehajtására, amire az eltérő horizontális és vertikális felbontás esetén szükség van.

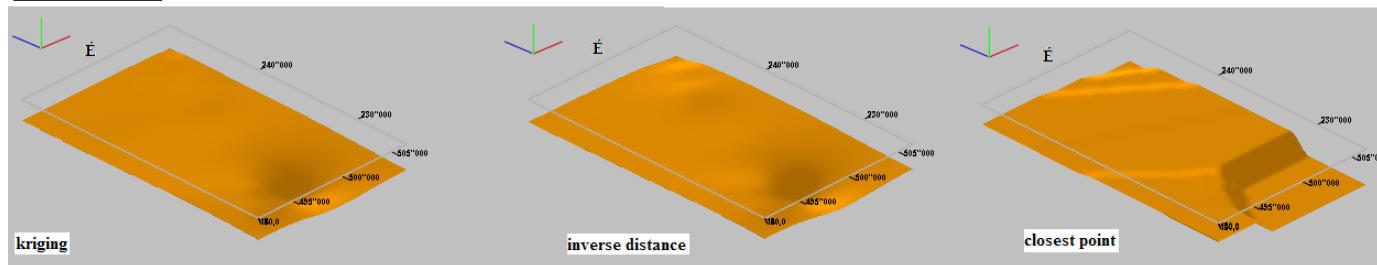
Hansági Formáció



Kozárdi Formáció



Ligeterdői Formáció

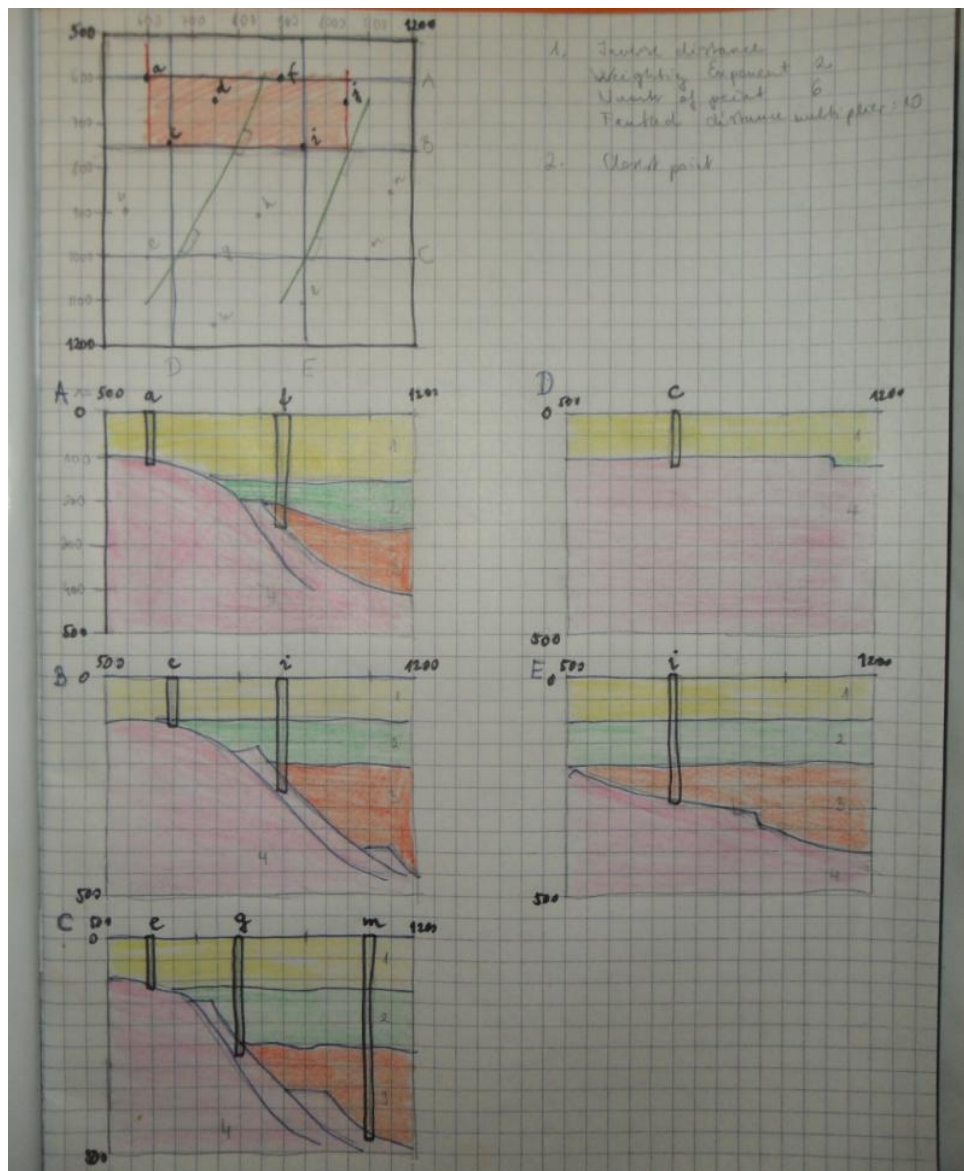


4. ábra: A különböző interpolációs eljárások szemléltetésére készítettük ezt a képet, melyen jól látható, hogy a hasonló formációk milyen módon interpolálódnak ki. Az interpolációs eljárások: krigelés (kriging), a súlyozott számtani közép (inverse distance) és a legközelebbi pontok (closest point/nearest neighbour) módszere volt.

Mesterséges adatmodellezés

Először egy általunk elképzelt szituációra szeretnénk bemutatni a voxelekkel való modellezés előnyeit és hátrányait. Többféle módszert is találtunk arra nézve, hogyan hozzunk létre voxeleket a Rockworks illetve a Voxler szoftverek segítségével. A kísérlet célja, hogy egy tipikus geológiai modellalkotási szituációt végigkövessünk a voxelizálásig úgy, hogy közben figyelemmel legyünk a lehetséges hibákra.

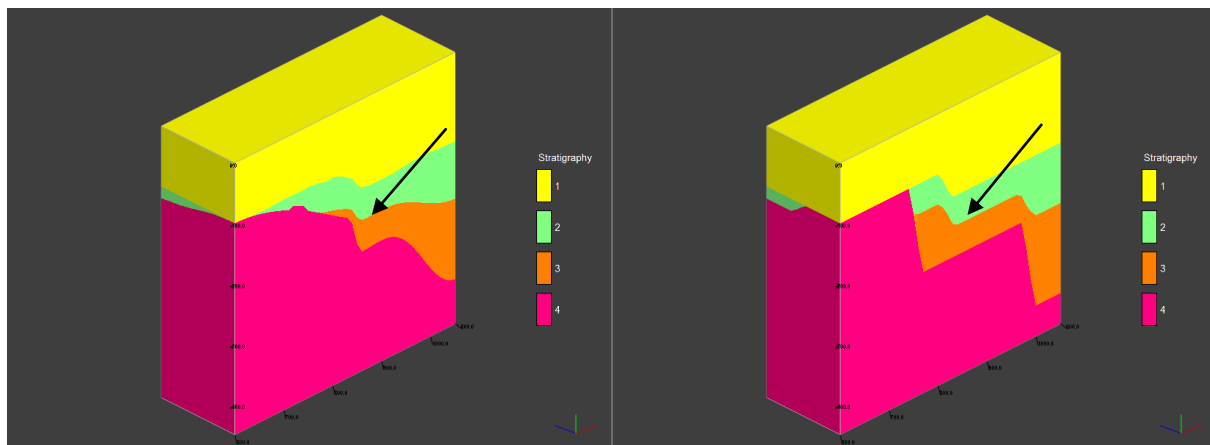
Először viszonylag egy egyszerű helyzetet modelleztünk szabadkézi rajz alapján (9. ábra). Az elképzelt szituáció a következő: a kutató geológus különféle megfontolások alapján kézi (de méretarányos) rajzot (egy vagy több elvi keresztmetszelvényt) készít a feltételezett geológiai helyzetről, és a feladatunk ebből a bemenetből voxelizált adatbázist készíteni. A modellben egy megemelkedett helyzetű aljzatra normálvetős szerkezet következik, és ezekre települnek a különböző korú üledékek. Az elképzelt rajzon több fúrást is mélyítettünk virtuálisan és meghatároztuk a rajzok alapján a fekü-fedő határokat.



5. ábra: Kézzel rajzolt mesterséges szelvények a virtuális fúrásokkal (fekete vonalak)

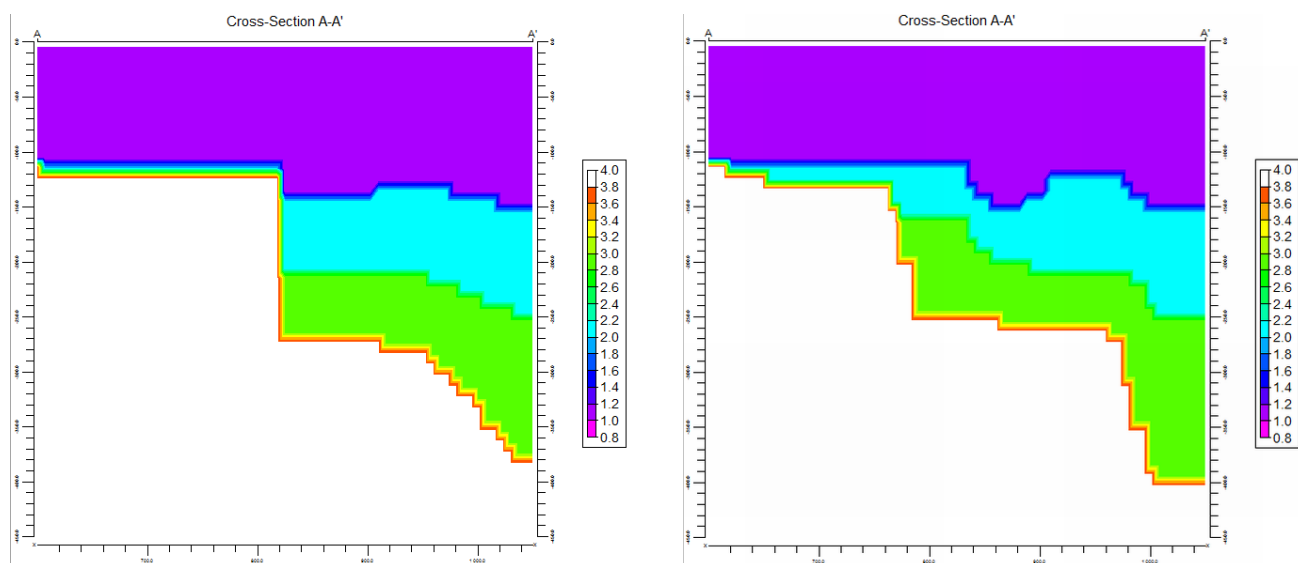
A modellezés során, a virtuális fúrás adatok importálása után a pirossal jelölt területre elkészítettük a fekvő és fedő grideket, majd ezután 3D-ben interpoláltunk. Mind a 2D mint a 3D interpolálás során egyező módszereket alkalmaztunk. Első modell súlyozott számtani közép (inverse distance) interpolációval készült, a második pedig legközelebbi pontok (nearest neighbour) módszere alapján.

Az első megjelenítés Rockworksben történt itt az egyes $10 \times 10 \times 10$ méteres felbontású voxelekből felépülő modellt ábrázoltuk. Látható némi különbség a két modellben az eltérő interpoláció miatt. A legközelebbi pontok használata az ideálisabb, hiszen két formációnak nincsen átlaga, nem folytonos érték, mégis az modell súlyozott számtani közép megfelelő paraméterekkel egészen jól simuló modellt ad eredményül (10. ábra).



6. ábra: Mesterséges fúrásadatok modellje inverse distance (bal oldalon) és nearest neighbour alapján, fekete nyíllal jelöltük a két interpoláció lényeges különbségét: az súlyozott számtani közép esetén az eredmény jóval simább mint a Thiessen-poliédereket létrehozó legközelebbi pontok esetén

Ezután húztunk két azonos profilt a két modellre, hogy jobban láthatóak legyenek a különböző interpolálási módszerekből adódó eltérések (11. ábra).



7. ábra: Profilok mesterséges adatok súlyozott számtani közép és legközelebbi pontok módszerének modellje alapján

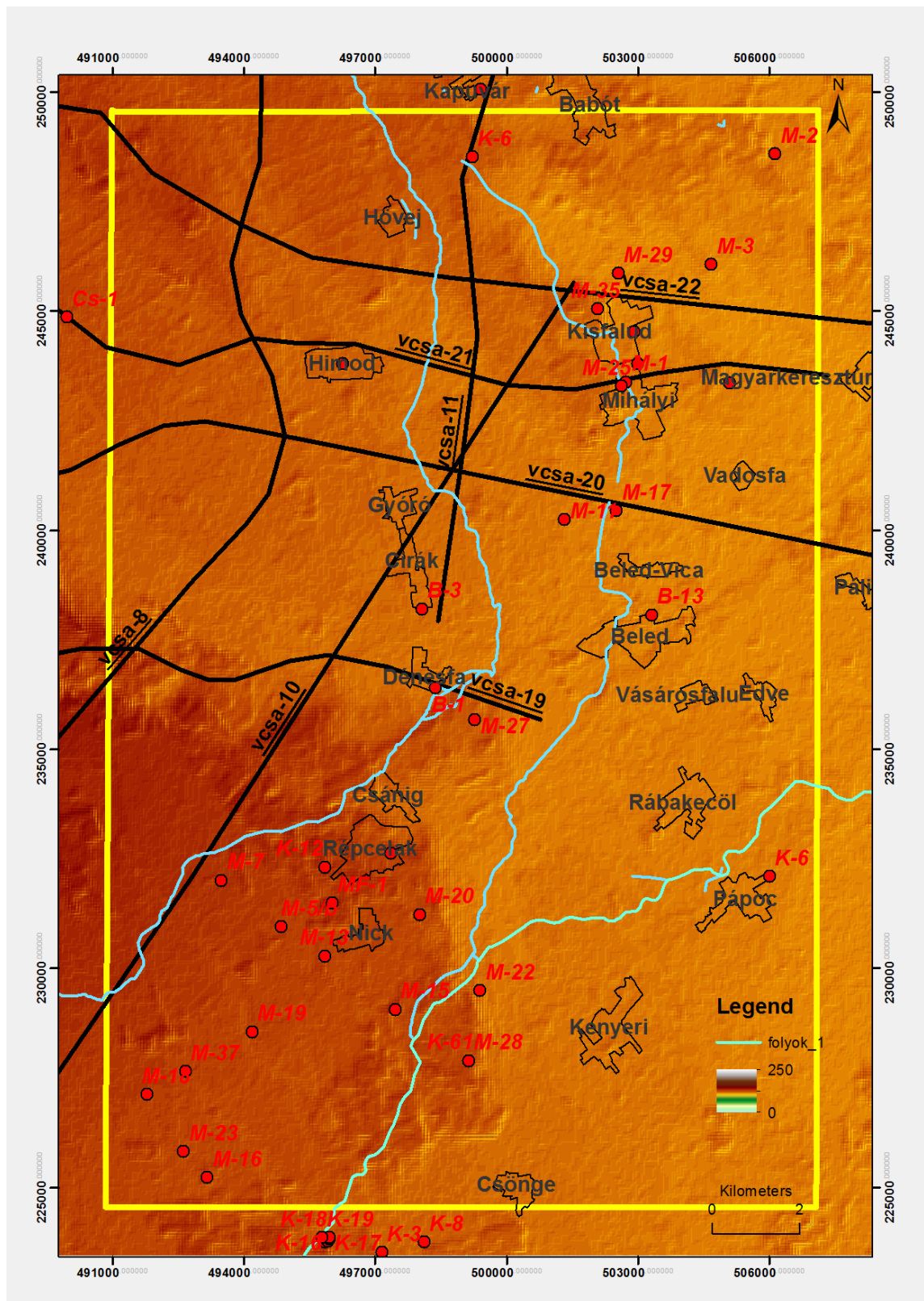
A második ábrasorozaton a sztratifikai modell a fekü- és fedőgridek figyelembe vételével készült el. Látható (fekete nyíllal jelölve), hogy itt a simítás miatt az súlyozott számtani középpel készült modell pontosabban visszaadja az általunk rajzolt kiinduló elképzelt modelleket. Fontos még megjegyezni, az adott formációk onlap funkcióval vannak egymásra

helyezve, ami lehetővé teszi, hogy ha két interpolált réteg közül a fiatalabbikhoz igazodjon az idősebb réteg.

Látható ebben az esetben mivel a terület kicsi, a virtuális fúrások helyét pedig a modellezéshez alakítottuk ki, így pontosan visszkapjuk az eredetileg elképzelt adatrendszert. Más a helyzet azonban akkor, ha a terület vetőkkel jobban felszabdalt vagy ha intrúziók vannak jelen és esetleg az egymásra település nem dobostorta szerkezetet ad, vagy több formáció kiékelődik, illetve elvékonyodik. Ráadásul a rendelkezésre álló fúrásokat és a szeizmikus szelvényeket elsősorban a szénhidrogén-kutatás céljából készítették, tehát nem egyenletesen helyezkednek el területen.

4. Eredmények

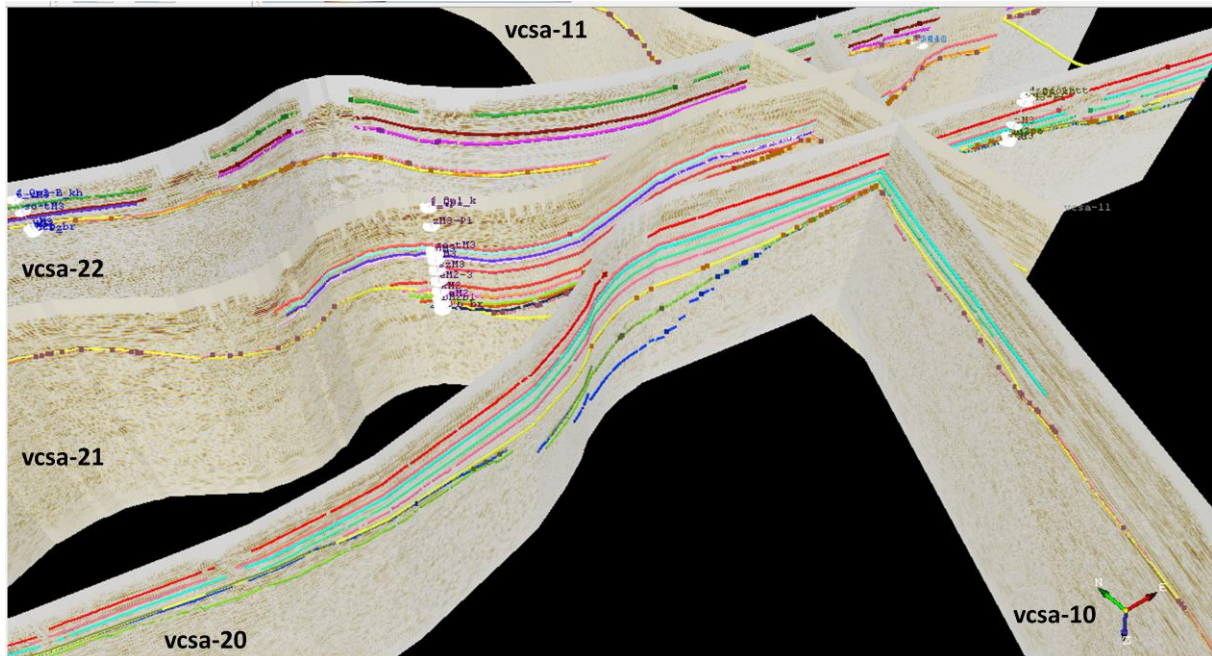
Ebben a fejezetben elért eredményeinket ismertetjük. Először bemutatjuk, a rendelkezésünkre álló adatokat majd ismertetjük a csak fúrásadatbázis felhasználásával elkészített voxeles modelleket, és ezek részletes elemzését. Összehasonlítjuk a többféle interpoláció által létrehozott modelleket egymással, illetve az eredeti kiinduló adatokkal és a szeizmikus értelmezésből nyert adatokkal, és teszteljük, hogy ha kiveszünk és berakunk bizonyos adatokat miként módosul az eredmény. Majd az így végrehajtott elemzések felhasználásával a szeizmikus értelmezésből származó adatokat is beleépítjük a modellbe.



8. ábra: Modellezett terület lehatárolása. Pirossal az egyes fúrások, feketével a szeizmikus szelvények, sárgával a modellezett adatblokk határai. Az alaptérkép az SRTM adatbázisból származó digitális domborzatmodell a területre.

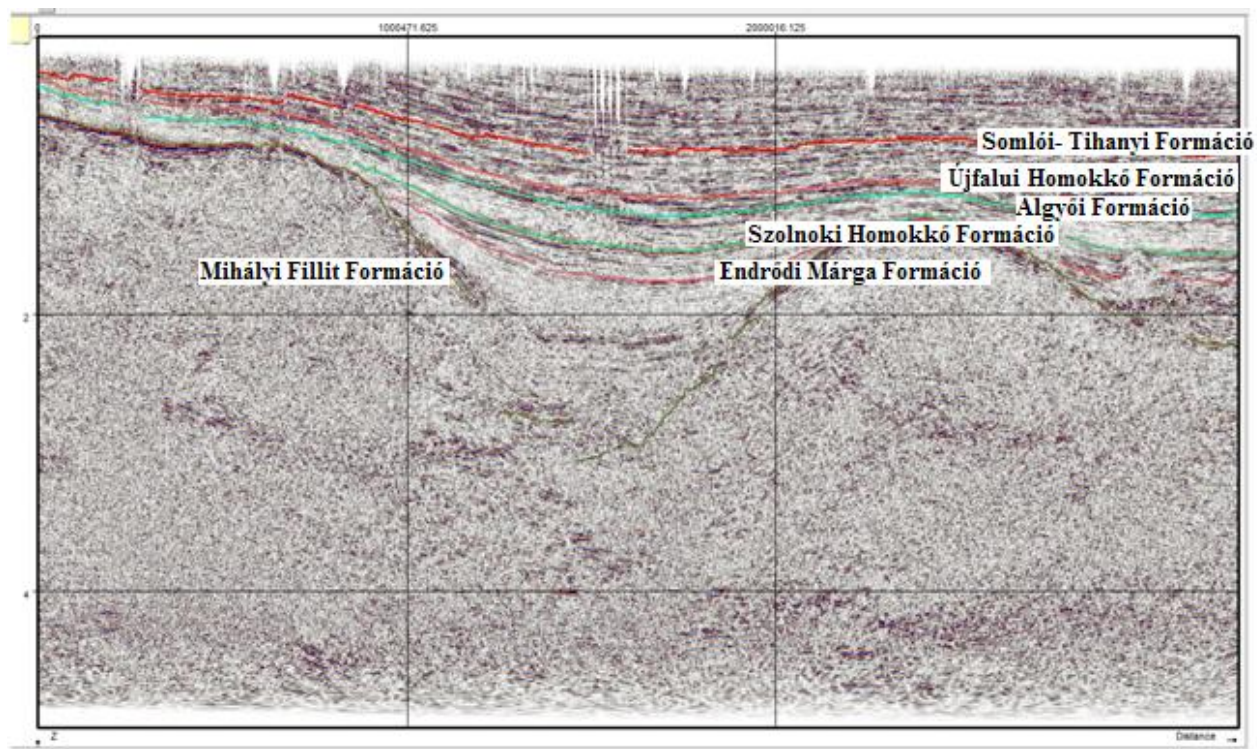
Szeizmikus szelvények feldolgozása

A szeizmikus szelvények feldolgozását Opendtect szabad felhasználású szoftverrel végeztük (2. ábra). Az értelmezés során Tari (1996); Szafián et al. (1999); Horváth és Rumpler (1984), Koncz (2010), valamint Uhrin (2011) munkáiból ismert szeizmikus értelmezéseket használtuk fel.

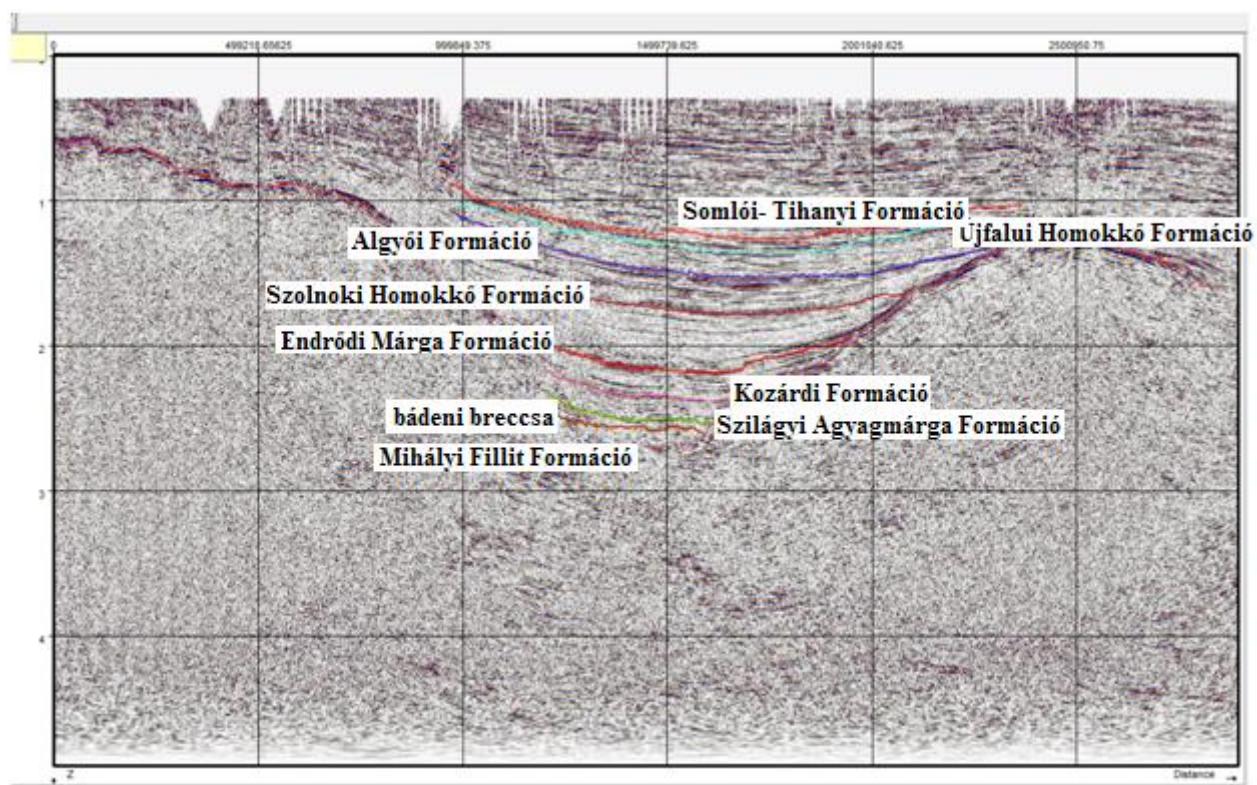


9. ábra: Opendtectben értelmezett szelvények közül a vcsa-11, vcsa-21, vcsa-22, vcsa-20 és vcsa-10 3D nézetben. Különböző színekkel jelöltük az egyes behúzott formációkat, illetve a formációtetőket az M-27 checkshot adat felhasználásával vittük be.

A fúrásadatbázisból a Pi-2, Cs-1, M-1 újraértékelt fúrásadatokkal értelmeztük a vcsa-8, vcsa-10, vcsa-11, vcsa-14, vcsa-20 (3. ábra) és a vcsa-21 (4. ábra) és vcsa-22 szelvényeket. A fúrásadatbázis illesztése a horizontok értelmezéséhez M-27 fúrás checkshot adatainak ismeretében vált lehetővé.



10. ábra: A vizsgált területre értelmezett vcsa-20-as, Ny-K irányú szelvény.



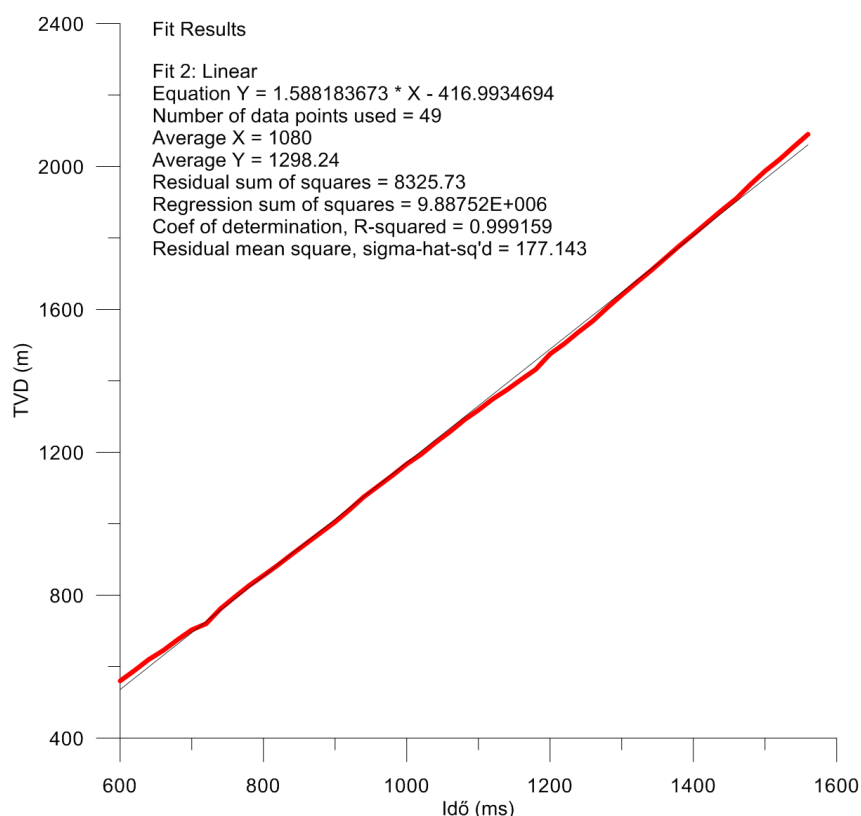
11. ábra: A vizsgált területre értelmezett vcsa-21-es, DNY-ÉK irányú szelvény.

Mivel egy checkshot adat állt rendelkezésünkre a sebességtér meghatározásához, ezt későbbiekben mindenképpen pontosítani kívánjuk, hiszen az így végrehajtott sebesség–mélység konverzió hibával terhelt, viszont számunkra a voxeles modellek előállításakor nagyon fontos lenne a sebességtér minél pontosabb ismerete. A körülhatárolt terület azonban nem nagy kiterjedésű (15 km széles), így valószínűleg a sebességtér sem változik drasztikusan.

Ezen kívül a 2D horizontokat csak időben (ms-ban) tudtuk kiexportálni, mert a szoftver csak 3D horizontok esetén engedélyezi a mélység–idő konverziót, egyetlen átlagos sebességérték alapján, viszont az adatok interpolálásánál ez az egységes 2000 m/s való konvertálás nem pontos.

Az így a kapott horizontokat egy általunk felállított sebesség–mélység táblázat alapján számítottuk ki az M-27 checkshot adataiból kiindulva.

Először ábrázoltuk a valódi mélység (TVD) és idő függvényt, amire egyenest illesztve (felhasználva, hogy a mélység–idő közötti összefüggés lineáris) kaptuk a későbbiekben a 2D horizontok idő–mélység konverziójához szükséges egyenletet (5. ábra).

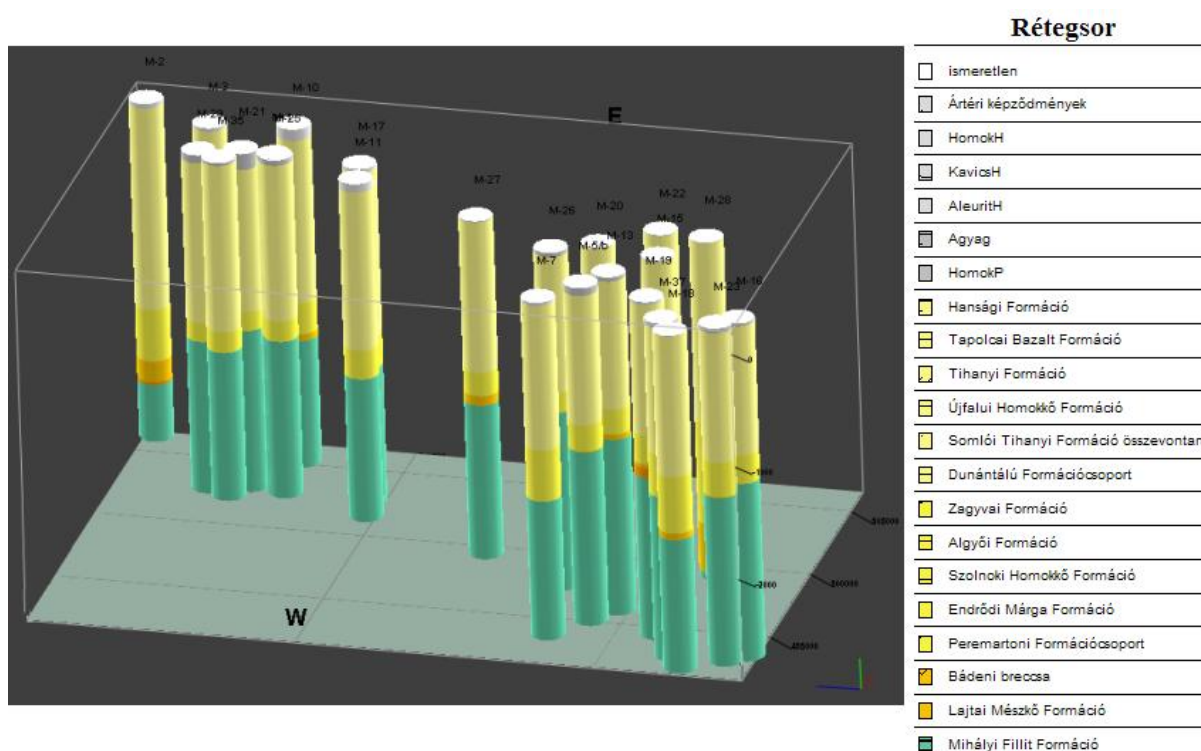


12. ábra: Idő függvényében a TVD az M-27-es checkshot adatara (Geofizikai Tanszék szeizmikus adatbázisa). Erre egyenest illesztettünk és az így kapott egyenletet használtuk fel a 2D horizontjaink mélység idő konverziójához

Fúrásadatbázis felhasználásával készült modellek és kiértékelésük

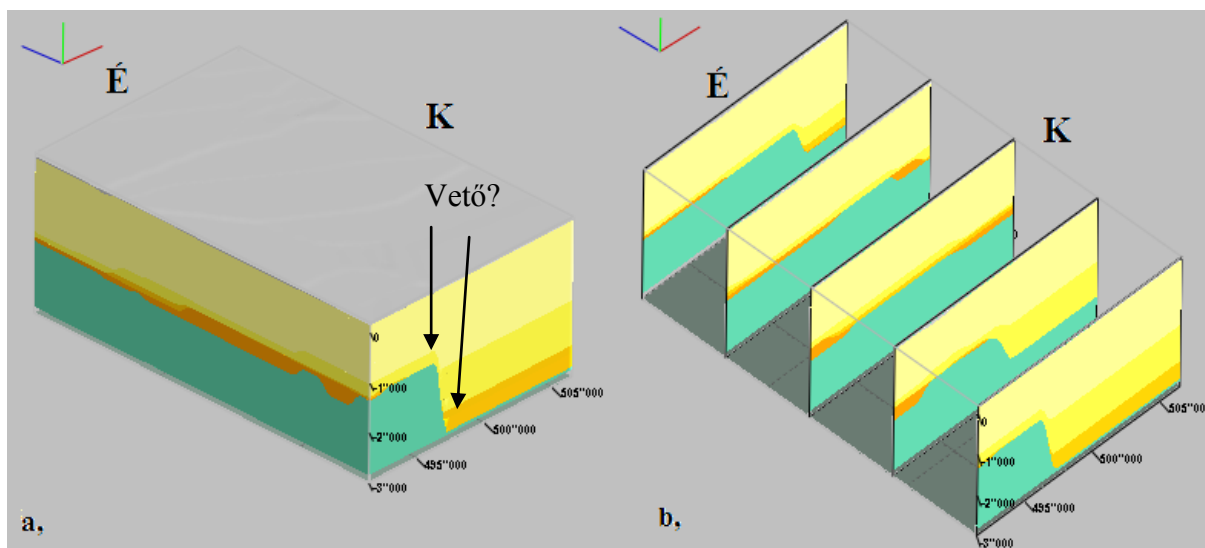
A fúrásadatok a modellezés szempontjából a legmegbízhatóbb pontszerű elemek, így innen kezdtük el a modellezést. Látható a térképen, hogy az északkeleti és a délnyugati területen áll rendelkezésünkre sok fúrásadat. Ebből következik, hogy az interpolálás során a kijelölt blokk északnyugati és délkeleti részén nem lesz annyira megbízható a modellünk (13. ábra).

A felbontást az egyes fúrásokban lévő rétegvastagságok figyelembe vételével alakítottuk ki, célunk egy robusztus becslés adása volt, így 100 méterre vettük a vertikális felbontást és 500 méterre a horizontális felbontást.

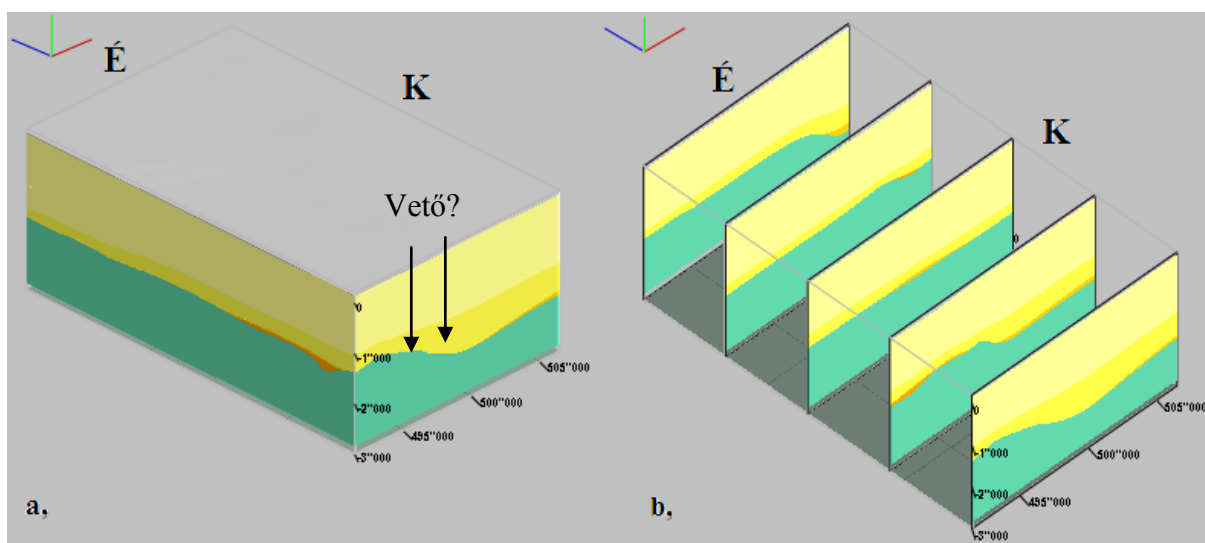


13. ábra: A képen a felhasznált fúrások elhelyezkedése látható; az északnyugati és a délkeleti részen igen kevés adat áll rendelkezésre az interpoláláshoz.

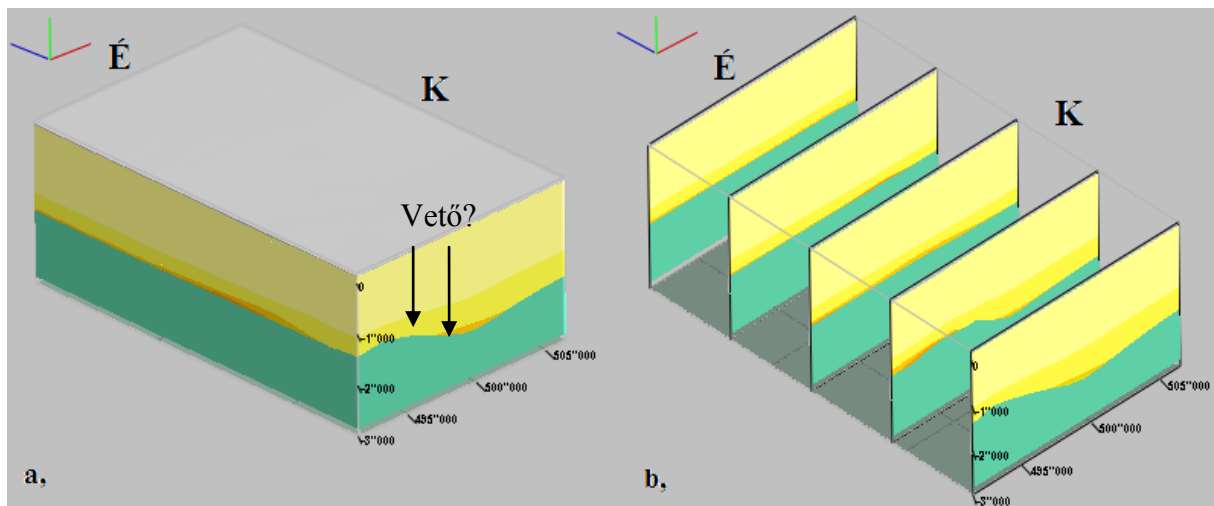
Először a legközelebbi szomszéd (closest point), a súlyozott számtani közép (inverse distance weighted) módszerek és a krigelés segítségével létrehozott eredményeket mutatjuk be, amelyek az összes mélyebb (1000 méter alatti) fúrás felhasználásával készültek. Az ábrákon a 3D blokkmodellek láthatók, majd ugyanannak a modellnek NY-K-i irányú metszetei (14. ábra, 15. ábra, 16. ábra).



14. ábra: Legközelebbi pontok módszerrel létrehozott $250 \times 250 \times 10$ felbontású modell (a) és ugyanennek a modellnek NY-K irányú keresztmetszetei (b). Fekete nyíllal a feltételezhető vető van jelölve, az egyes színek pedig megegyeznek az ábrán látható formáció-színkulccsal.



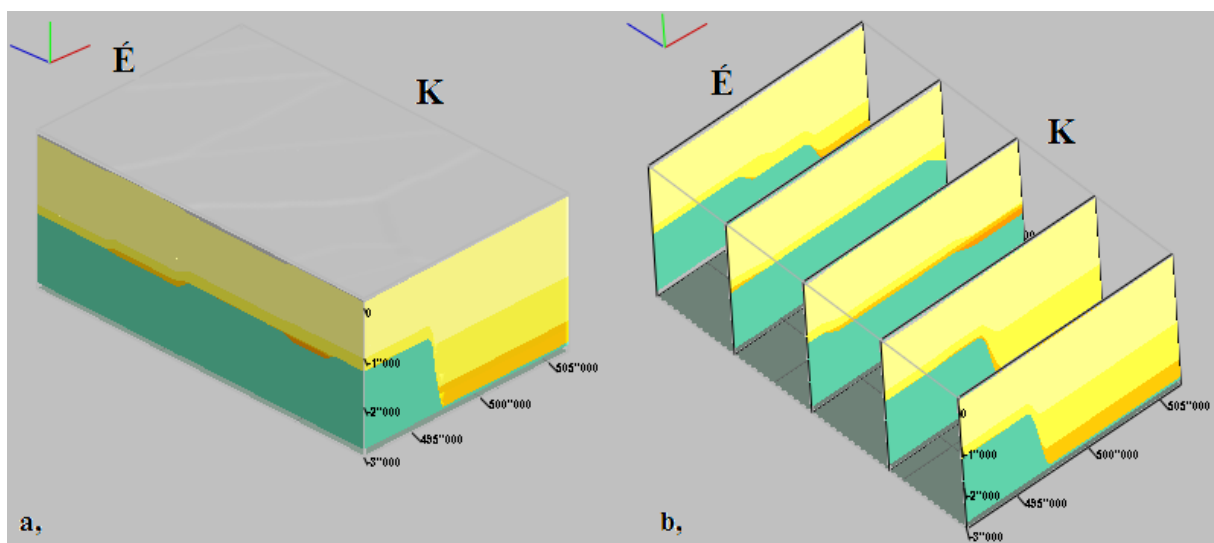
15. ábra: A súlyozott számtani közép módszerrel létrehozott $250 \times 250 \times 10$ felbontású modell (a) és ugyanennek a modellnek NY-K irányú keresztmetszetei (b). Fekete nyíllal a feltételezhető vető van jelölve, az egyes színek pedig megegyeznek az ábrán látható formáció-színkulccsal.



16. ábra: Krigeléssel létrehozott 250×250×10 felbontású modell (a) és ugyanennek a modellnek NY-K irányú keresztmetszetei (b). Fekete nyíllal a feltételezhető vető van jelölve, az egyes színek pedig megegyeznek az ábrán látható formáció színeivel.

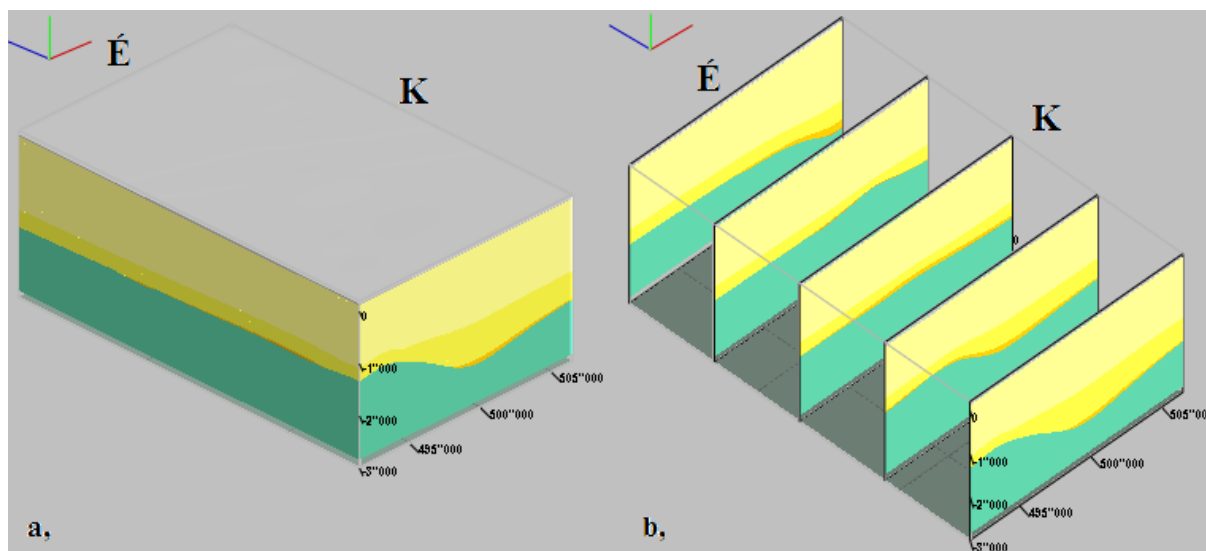
Az 3D blokkmodelleket összehasonlítva, megállapíthatjuk, hogy a legközelebbi pontok módszere alapján a Thiessen-poliéderek nyomán vetőket feltételezhetünk, míg ez a többi interpolálási eljárásnál nem jelenik meg. Mivel alapvetően számértékkel megjelölt formációkat interpolálunk, nagy valószínűséggel a legközelebbi pontok módszere által kapott modell lesz a legmegfelelőbb.

Mivel korlátozott mennyiségű fúrásunk van területről, ezért fontosnak tartottuk azt is megvizsgálni, hogy mi történik olyan esetben, ha például csak 10 fúrás állna rendelkezésünkre, azaz ezzel is modelljeink megbízhatóságát vizsgáltuk. A modell elkészítéséhez felhasznált fúrások: M-13, M-16, M-17, M-19, M-2, M-25, M-27, M-28, M-3, M-5/b (17. ábra, 18. ábra, 19. ábra).



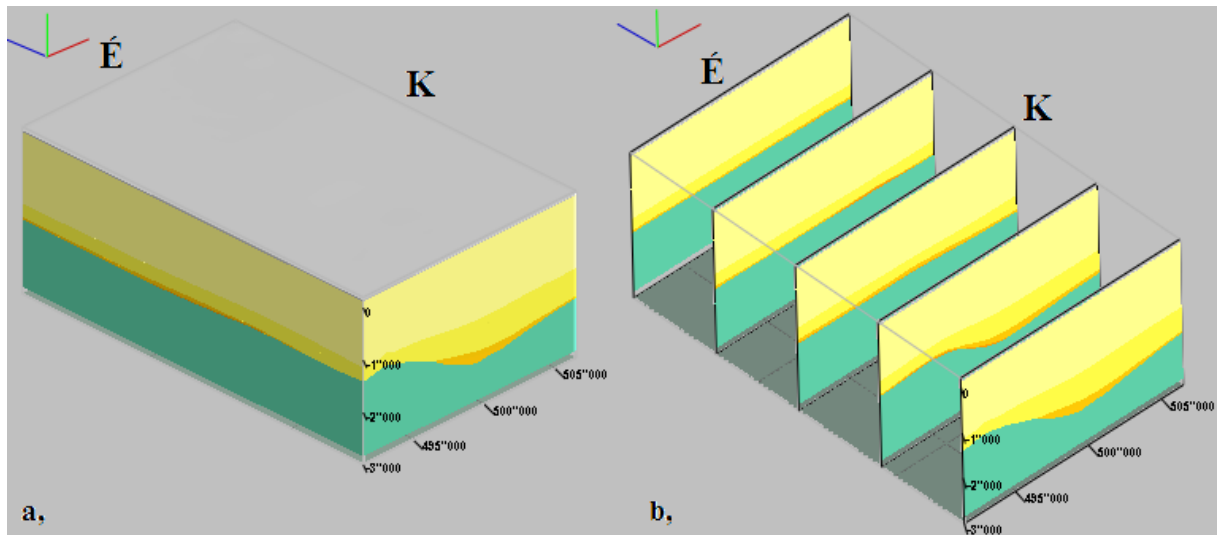
17. ábra: Legközelebbi pontok módszerrel létrehozott $250 \times 250 \times 10$ felbontású, 10 fúrásból készített modell (a) és ugyanennek a modellnek NY-K irányú keresztmetszetei (b). Az egyes színek pedig megegyeznek az ábrán látható formáció-színkulccsal.

A fenti, összes fúrásból készült ábrával (14. ábra) összevetve látható, hogy ebben a modellben (17. ábra) kevésbé jelennek meg a szarmata, kárpáti és bádeni üledékek. Ennek oka az lehet, hogy kevesebb fúrásban szerepeltek az ide sorolható formációk.



18. ábra: A súlyozott számtani közép módszerrel létrehozott $250 \times 250 \times 10$ felbontású, 10 fúrásból készített modell (a) és ugyanennek a modellnek NY-K irányú keresztmetszetei (b). Az egyes színek pedig megegyeznek az ábrán látható formáció színkulccsal.

Ennél a modellnél (18. ábra) szintén ugyanazt lehet megállapítani, mint a legközelebbi pontok módszerével készült modellnél, azaz itt szintén jóval kevésbé jelennek meg szarmata, kárpáti és bádeni üledékek az eredeti, összes fúrásból készült modellhez képest. A krigeléssel készült modellnél (19. ábra) is ugyanezt láthatjuk.



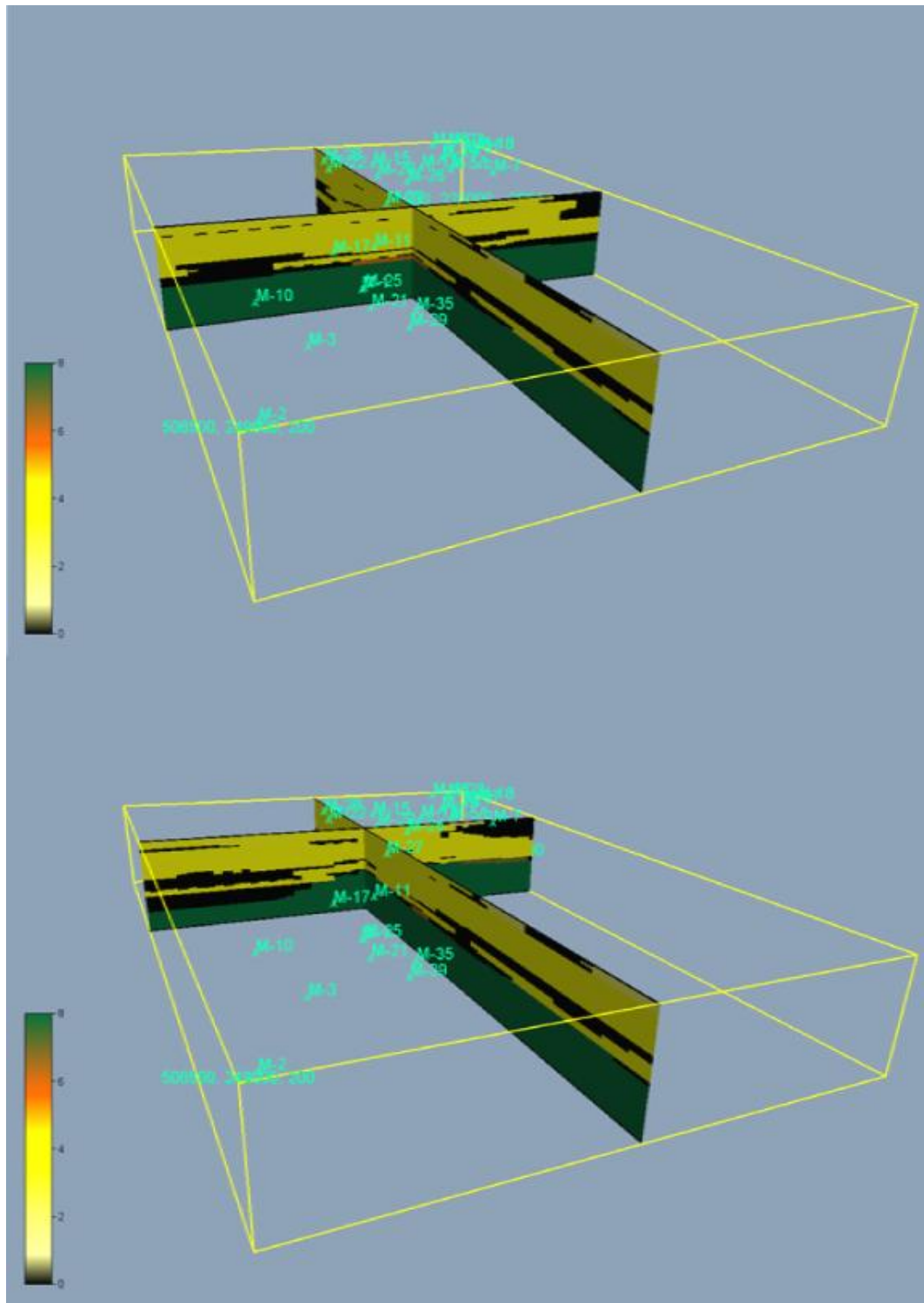
19. ábra: Krigeléssel létrehozott 250×250×10 felbontású, 10 fúrásból készült modell (a) és ugyanennek a modellnek NY-K irányú keresztmetszetei (b). Az egyes színek megegyeznek az ábrán látható formáció színekkel.

Különböző interpolálási eljárásokkal kapott eredmények összehasonlítása

Ezek után a három interpolálási eljárással készült modellt kvantitatívan összehasonlítottuk egymással. A vizsgálat során, azt a kérdést helyeztük középpontba, hogy mely voxelek egyeznek meg az egyes interpolálással létrehozott modellekben és melyek nem. Ehhez a kiexportált osztályozott pontfelhő adatait használtuk fel, mely minden egyes voxelközéppontra adott volt, valamint koordináták szerint összerendezve, megadta, hogy melyek azok a voxelek, amik ugyanabban az adatkockában ugyanazzal az adattartalommal rendelkeznek és melyek nem.

A vizsgálat során először a 3 különböző interpolálással létrehozott modell megegyező voxeljeit vizsgáltuk meg, egyrészt formációk szerint hisztogramban ábrázolva másrészt pedig vizualizálva térben az egyező voxelek halmazát. A hisztogram esetén a darabszámot százalékban fejeztük ki, hiszen az adott adatblokkot adott felbontással véges számú voxel tölti ki, így lehetőség volt ennek kiszámítására (20. ábra, 21. ábra).

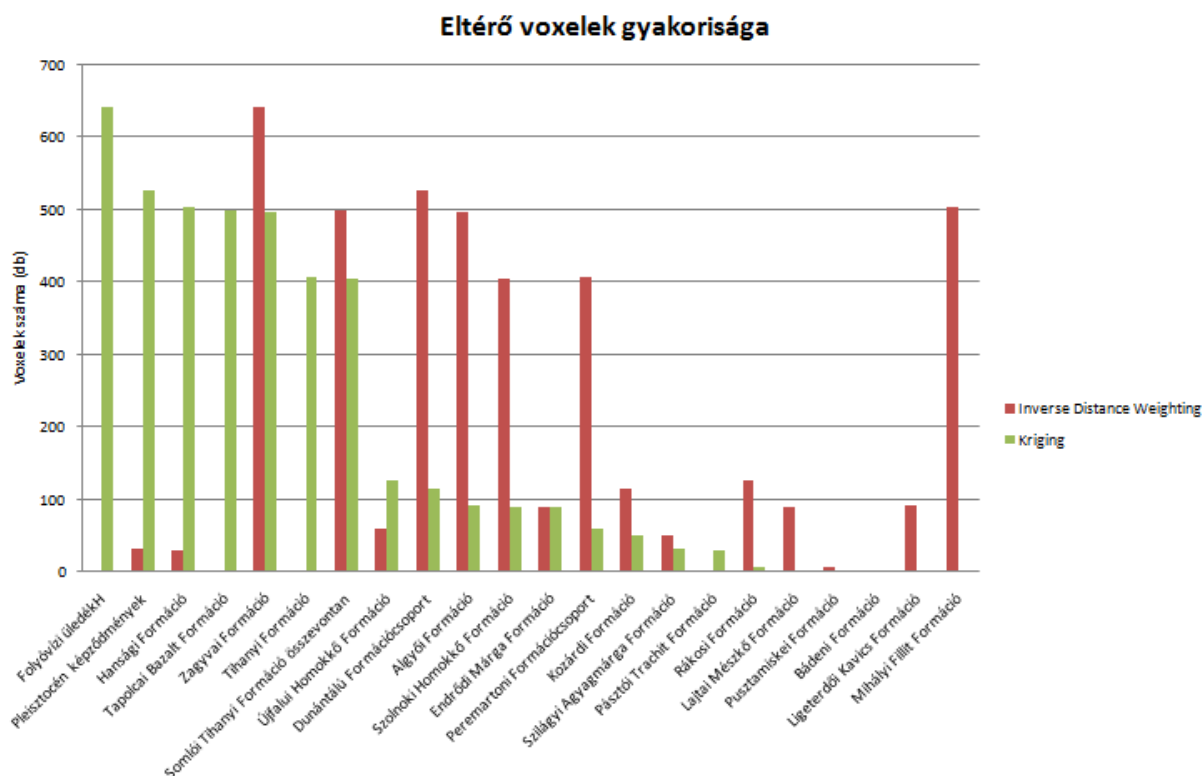
21. ábra: Mindhárom interpolálás esetén egyező voxelek megjelenítése. Eltérés esetén üres voxelek vannak az ábrában.



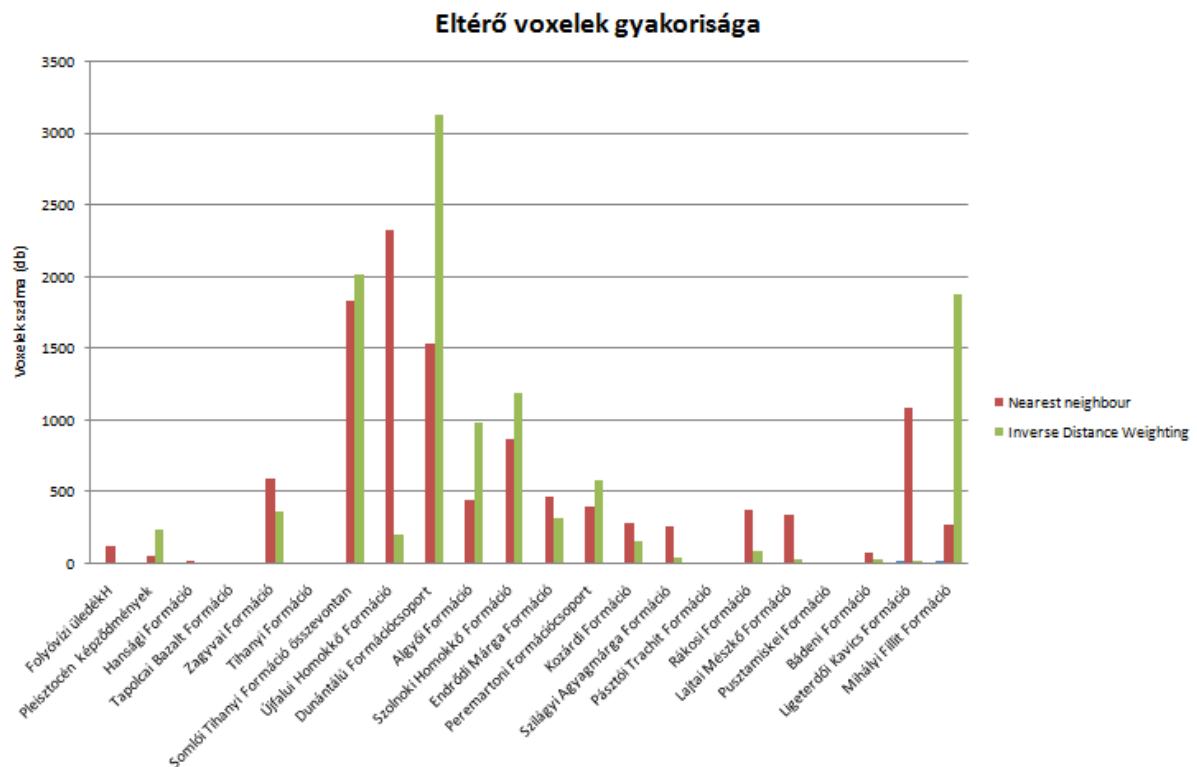
22. ábra: Mindhárom interpolálás esetén egyező voxelek megjelenítése keresztmetszetben, eltérés esetén a voxel területe feketével van jelezve.

Az ábrán látható (22. ábra), hogy eltérések főleg a kárpáti, szarmata, bádeni üledékek elterjedésében van, ezen kívül még az alsó-pannon üledékeknél (Szolnoki Homokkő Formáció, Endrődi Márga Formáció). Kisebb eltérések jelentkeznek még egyes felső-pannon üledékek esetén, például a Hansági Formációnál és a Tapolcai Bazalt Formációnál. Az eltérések legfőbb oka az, hogy ezek a formációk viszonylag kevés fúrásban szerepelnek, ezért nem lehet őket pontosan lehatárolni, megadni a pontos kiterjedésüket.

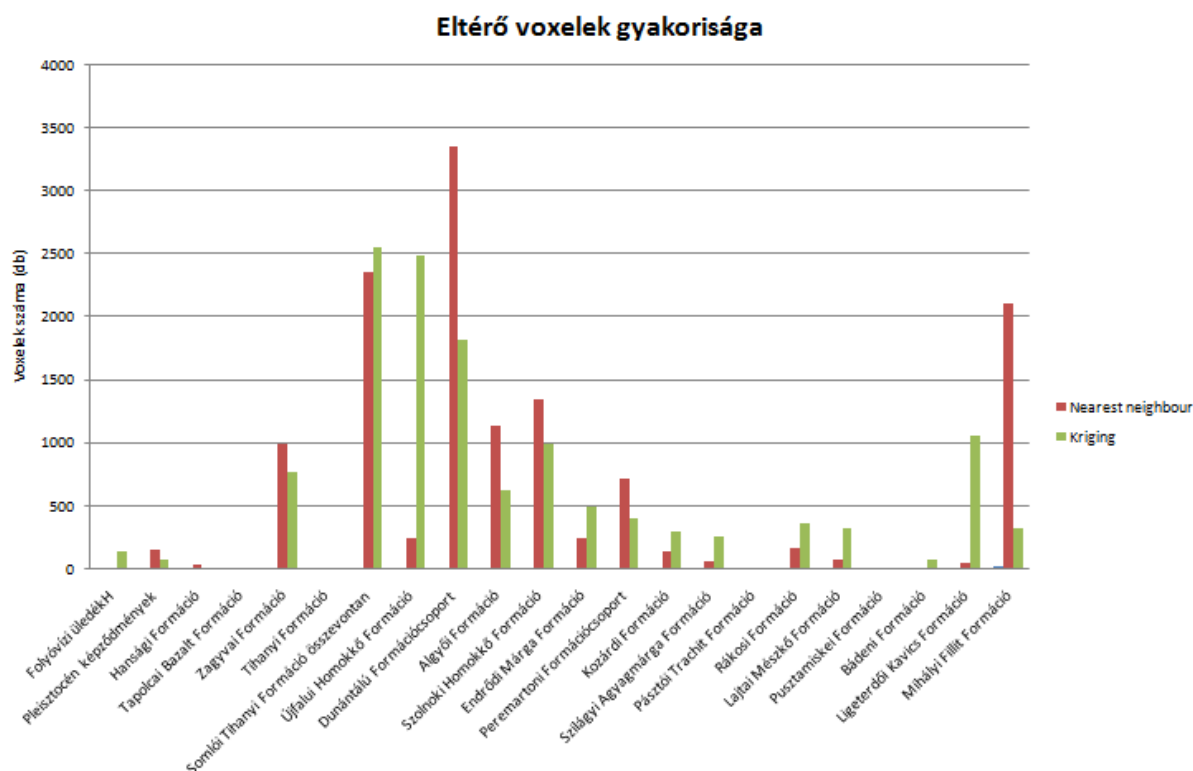
Ezek után azt vizsgáltuk, hogy a 31,4%-ban eltérő voxelek az egyes interpolálás esetén miként különböznek egymástól. A vizsgálatok esetén mindig egy modellt hasonlítottunk össze egyik és másik interpolálás esetén. Ehhez szintén készítettünk hisztogramokat, megmutatva, hogy két interpolálási eljárás esetén a nem egyező voxelek, egyrészt az egyik, másrészt a másik interpolálási eljárással milyen adatokkal töltene fel a rendelkezésre álló adatblokkokat, azaz azt vizsgáltuk, hogy a nem egyező formációk esetén, hogyan alakulnak az egyes formációk gyakorisága. A különbségeket már a 14., 15. és 16. ábrákon szemmel összehasonlítva is láthattuk, de itt a hisztogramokban ez kvantitatívan jelenik meg. Fontos megjegyezni, hogy amikor a két interpolációs eljárást összehasonlítottuk, ezeknek a voxeljei között találunk egyezőt, az nem feltétlen egyezik meg a harmadik interpolációs eljárásból származóval. A hisztogramok itt a két interpolálás során egymástól különböző voxelek gyakoriságát adja meg, a két interpoláció esetén egyező voxeleket nem ábrázoltuk (23. ábra, 24. ábra, 25. ábra)



23. ábra: A súlyozott számtani közép módszer és a krigelés során készült modellekben az eltérő voxelek száma ugyanarra a modellre.



24. ábra: Az eltérő voxelek száma egyrészt legközelebbi pontok (Nearest neighbor), másrészt a súlyozott számtani közép (Inverse Distance) módszer alkalmazása esetén ugyanarra a modellre.



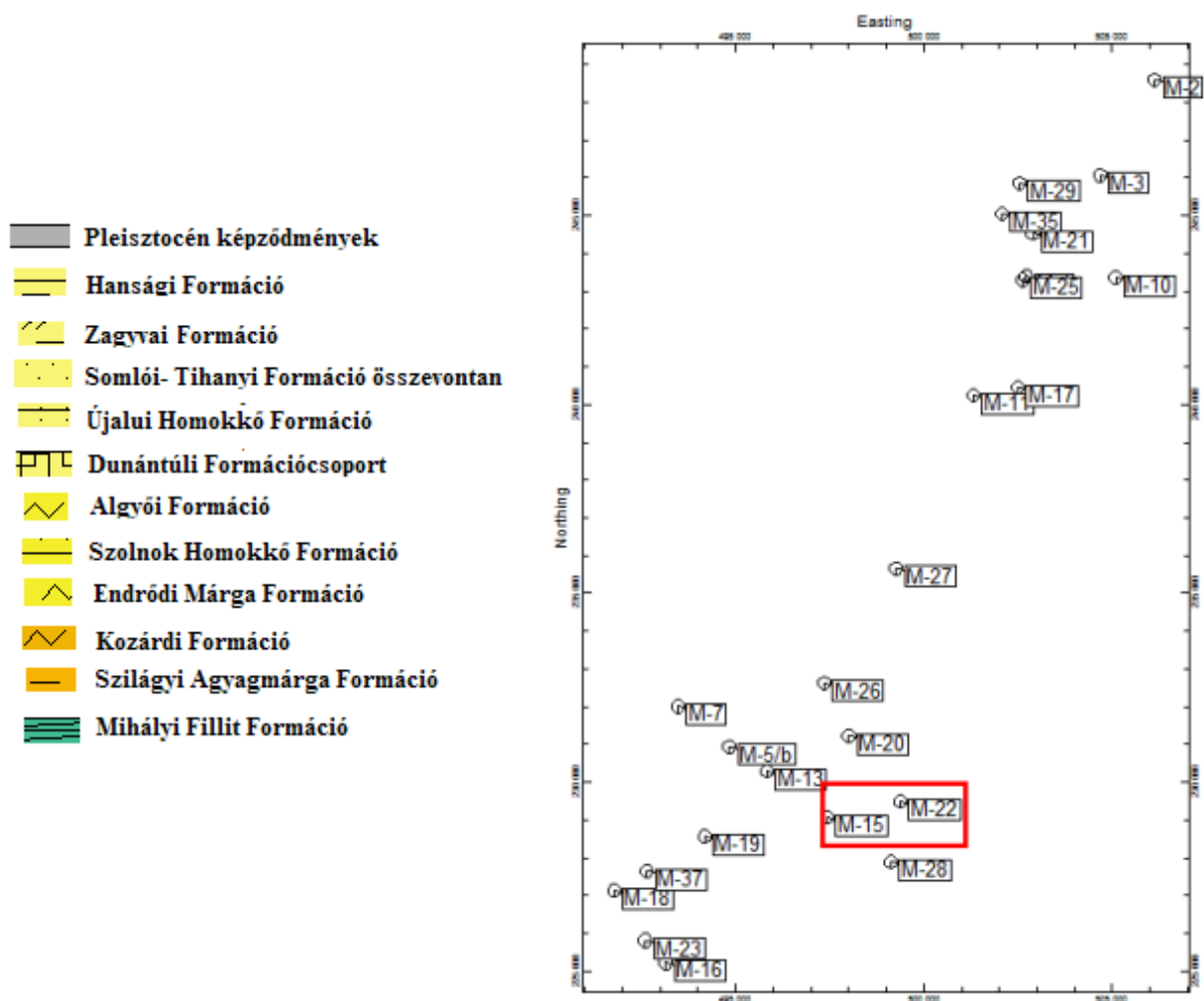
25. ábra: A legközelebbi pontok módszere (Nearest neighbour) és a krigelés (Kriging) során az eltérő voxelek száma ugyanarra a modellre.

A hisztogramokat szemlélve megállapíthatjuk, hogy leginkább az inverse distance és kriging interpolálással létrehozott modellek esetén a legnagyobbak a különbségek, de a többi interpolációs eljárás esetén is jelentős eltéréseket mutatnak egymáshoz képest a különböző modellek. Viszont figyelembe kell venni az eltérések esetén, hogy vannak olyan formációk, amelyek térfogata eleve nagyobb, így az eltérések ebben az esetben nagyobb gyakoriságú.

A modellek összevetése a fúrásadatbázissal

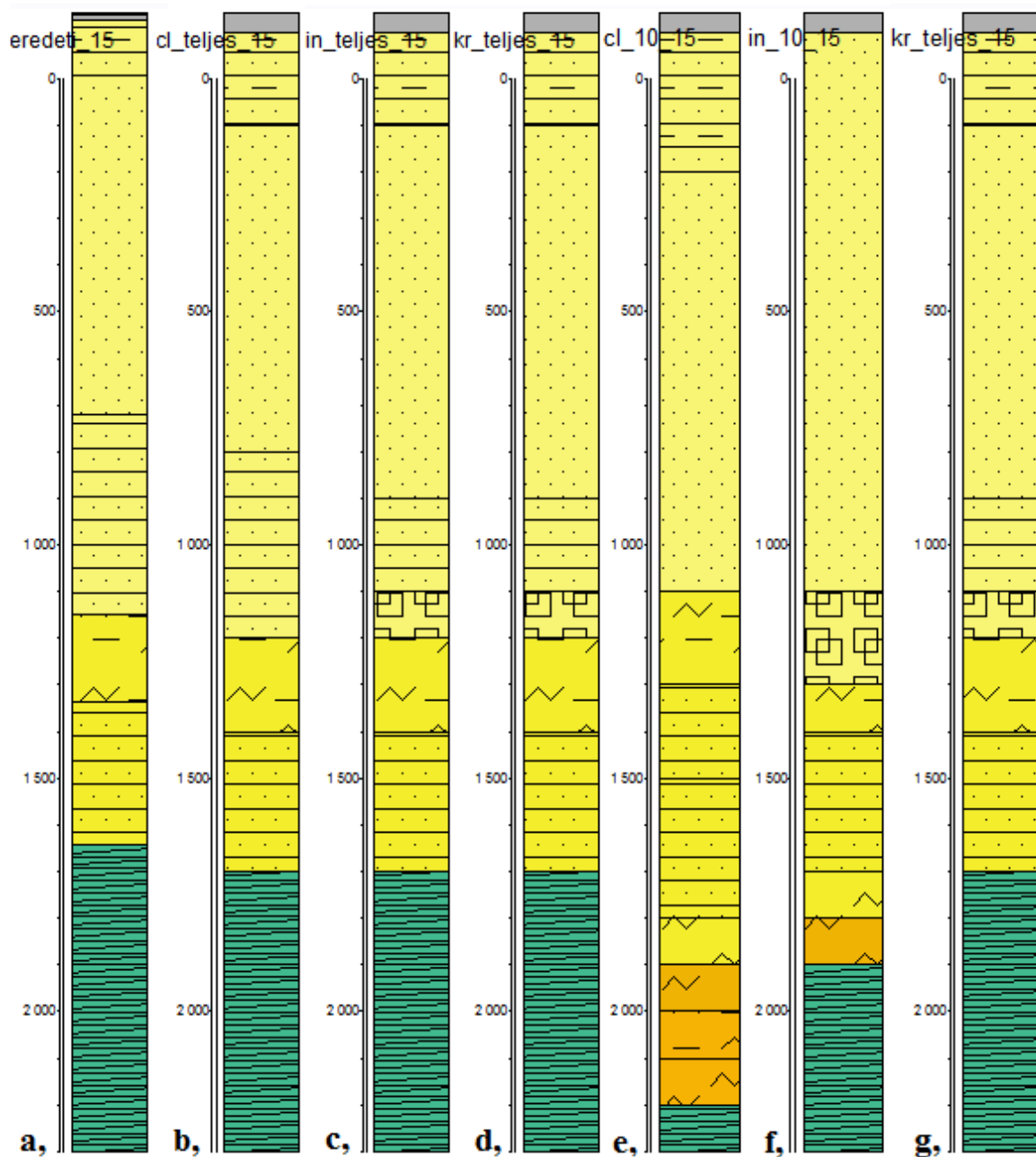
Ebben a részfejezetben azt vizsgáljuk meg, hogy a modellekből származó adatok és a valós fúrásértékek milyen mértékben egyeznek. Ezen kívül megnéztük azt is, hogy mi történik, ha egy-egy modellt csak 10 fúrás figyelembe vételével állítunk elő. Olyan fúrásokat választottunk, melyek nem játszottak szerepet a modell létrehozása során és megnéztük, hogy ezekre a területekre milyen becslést ad a modellünk.

Két fúrást választottunk ki: az M-15-ös és az M-22-es fúrásokat. Ezek egyike sem szerepelt abban a 10 fúrásban, melyekből a modellt létrehoztuk (26. ábra).



26. ábra: A jobb oldali térképen a két fúrás helye, bal oldalon pedig a területen előforduló formációk láthatók. Ezzel a két fúrással hasonlítottuk össze különböző modelljeinket.

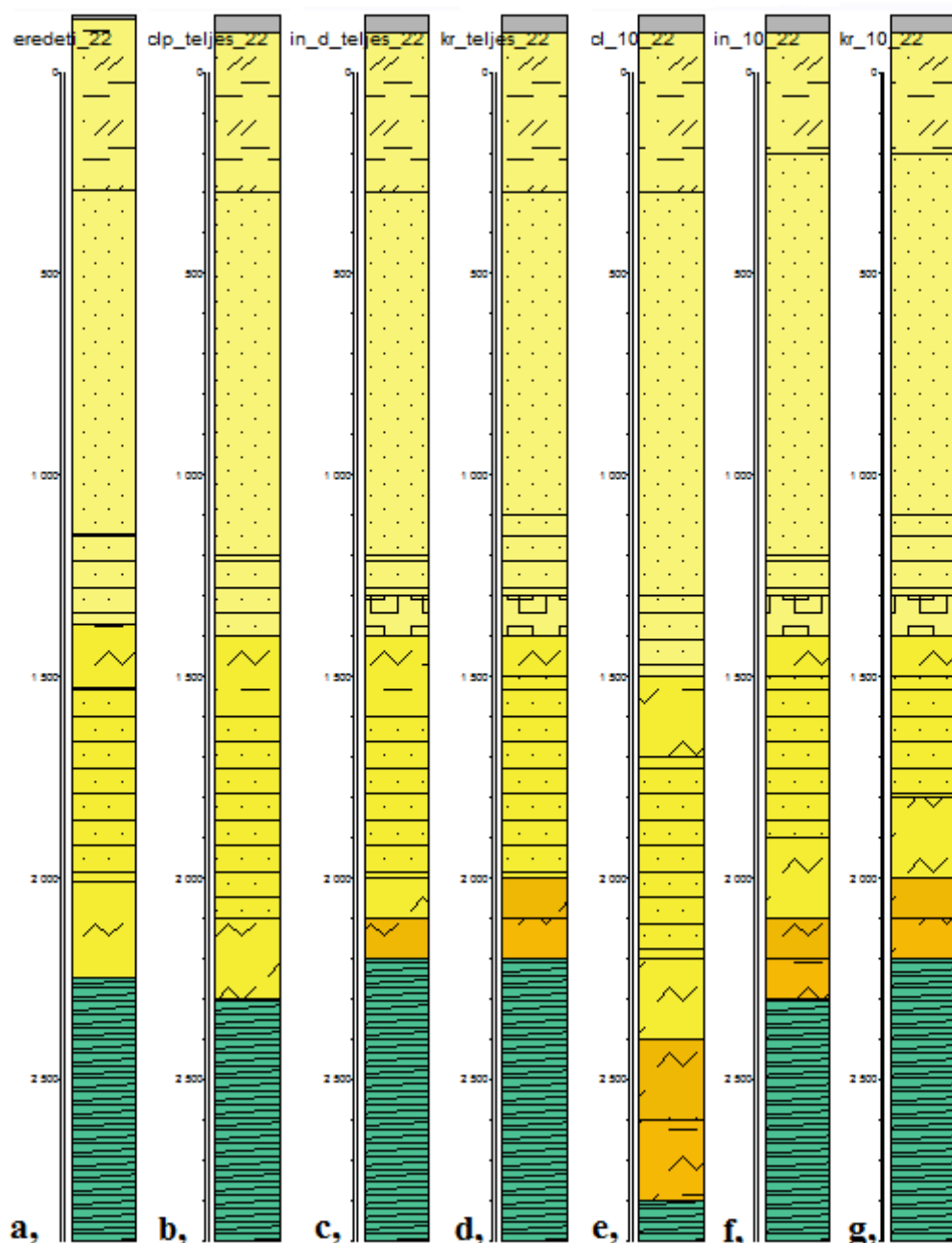
M-15-ös fúrás:



27. ábra: M-15-ös fúrás és a területre eső voxeles modellek. *a*, eredeti fúrás adatai *b*, összes fúrás figyelembe vételével létrehozott legközelebbi pontok módszerével létrehozott modell, *c*, összes fúrás figyelembe vételével létrehozott súlyozott számtani közép módszerével, *d*, összes fúrás figyelembe vételével krigelembe létrehozott modell *e*, 10 fúrás figyelembe vételével legközelebbi pontok módszerével létrehozott modell *f*, 10 fúrás figyelembe vételével létrehozott súlyozott számtani közép módszerével létrehozott modell, *g*, 10 fúrás figyelembe vételével krigelembe létrehozott modell.

Az ábrán (27. ábra) jól látható, hogy a *b*, oszlop mutatja a legnagyobb egyezést az eredeti fúrásértékekkel, a legnagyobb eltérés pedig az *e*, oszlopban található, amely szintén legközelebbi pontok módszerével létrehozott modellből származik, ez esetben viszont csak 10 fúrásérték szerepelt a modellben, csakúgy, mint az *f*, és *g*, oszlop esetén, melyek súlyozott számtani közép módszerével és krigelés segítségével készült modellből származnak. A legnagyobb eltéréseket az eredeti modelltől elsősorban a felbontás okozza, a formációk elterjedése a különböző modellekben a kiértékeléskor csak 100 m nagyságrendekben volt meg (500×500×100 m). Az aljzat az *f*, és *g*, oszlop kivételével viszonylag jó egyezést mutat az eredetivel, valamint a Szolnoki Homokkő Formáció és az Algyői Formáció is. Nagyobb eltérések jelentkeznek az Újfalu Homokkő Formáció és a Somlói Tihanyi Formáció vastagságában, némelyikben az Újfalu Homokkő Formáció meg se jelenik, helyette a Dunántúli Formációcsoporthoz tartozó Formáció szerepel (23. ábra).

M-22-es fúrás:



28. ábra: M-22-es fúrás és a területre eső voxeles modellek. *a*, eredeti fúrás adatai *b*, összes fúrás figyelembe vételével legközelebbi pontok módszerével létrehozott modell, *c*, összes fúrás figyelembe vételével súlyozott számtani közép módszerével létrehozott modell, *d*, összes fúrás figyelembe vételével krigeléssel létrehozott modell *e*, 10 fúrás figyelembe vételével legközelebbi pontok módszerével létrehozott modell *f*, 10 fúrás figyelembe vételével súlyozott számtani közép módszerével létrehozott modell, *g*, 10 fúrás figyelembe vételével krigeléssel létrehozott modell.

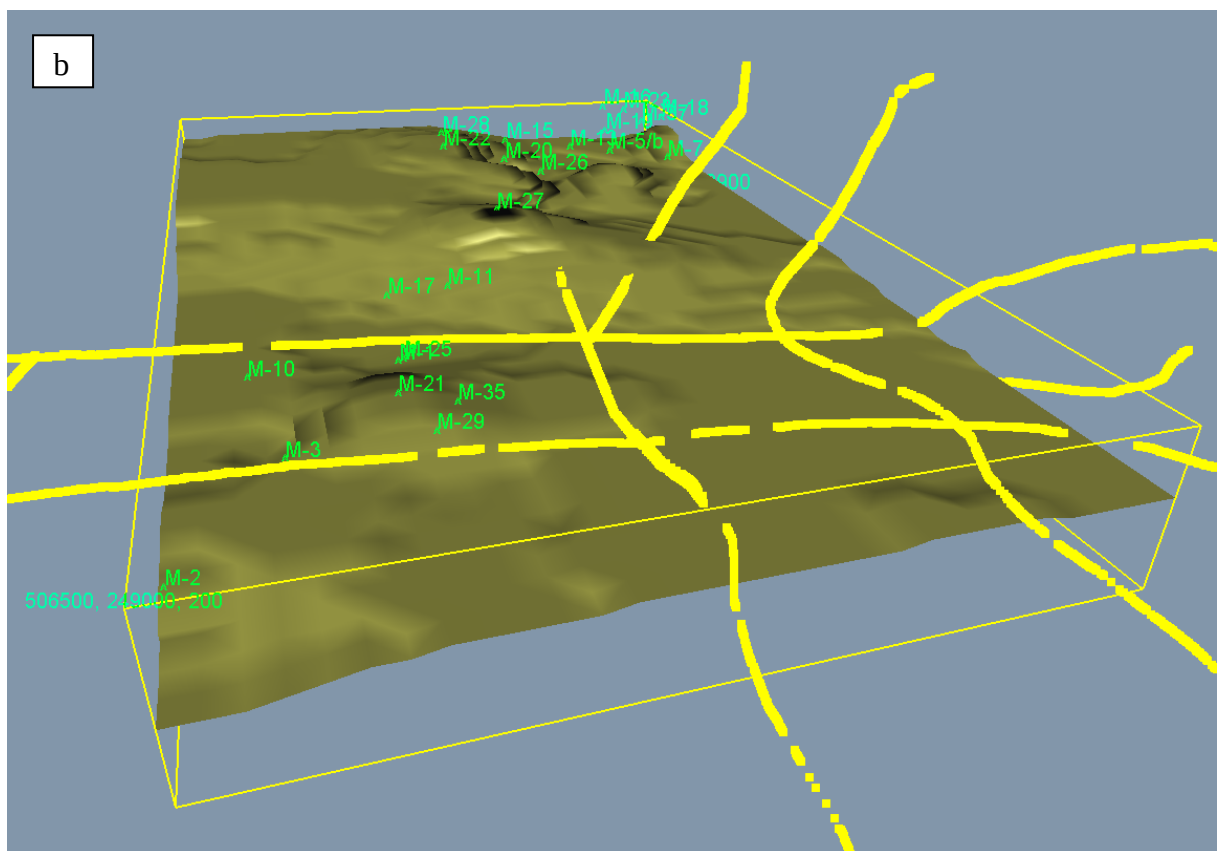
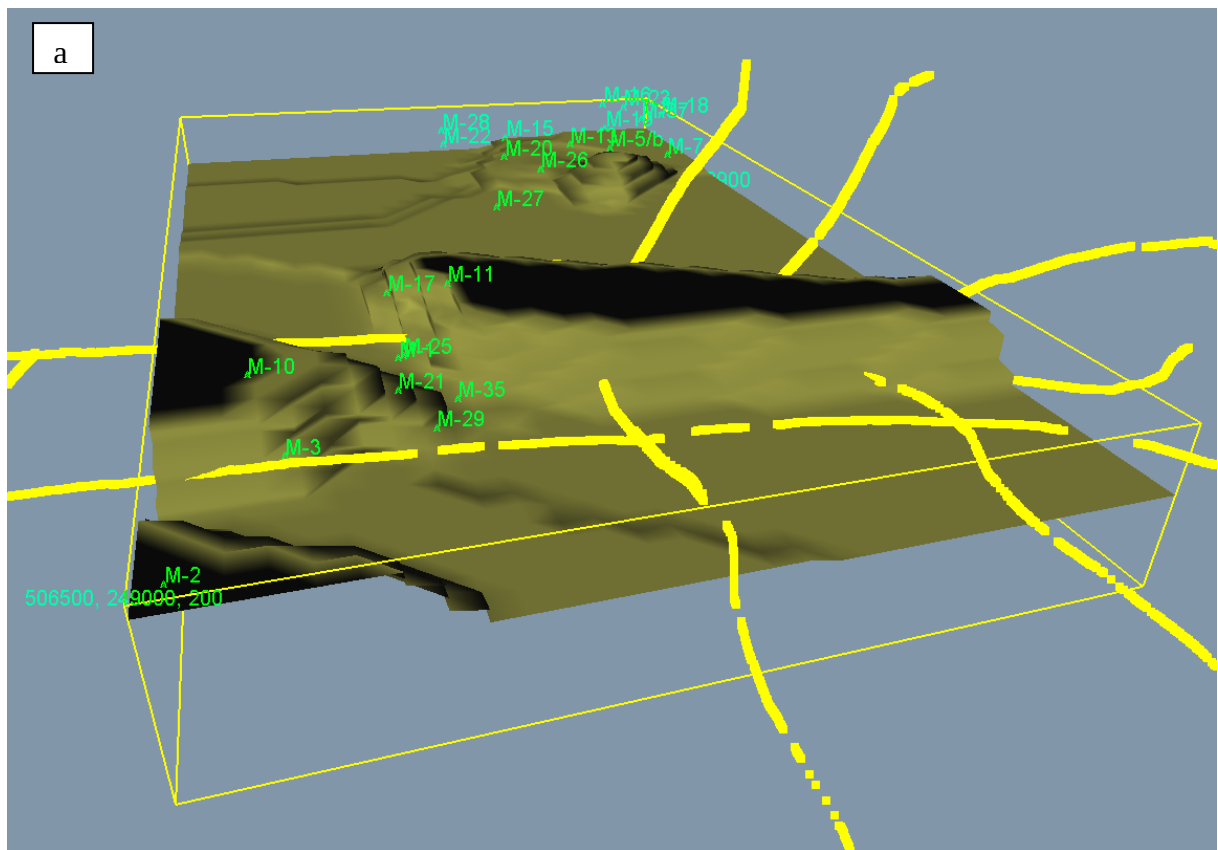
Az M-22-es fúrás esetén (28. ábra) is a legközelebbi pontok eljárásból készült modellből kapott b oszlop értékei hasonlítanak legjobban az eredetihez és itt is a 10 fúrásértékből legközelebbi pontok módszerével létrehozott modellből származó e oszlop mutatja a legnagyobb eltérést. Ezek alapján megállapítható, hogy a legközelebbi pontok módszere csak sűrű mintavételezés esetén megbízható. Ennél a fúrásnál a felszínközeli formációk nagyjából mind a 6 oszlopban viszonylag jó egyezést mutatnak, az aljzat esetében is egyedül az e oszlopban kezdődik 2800 méterről. A súlyozott számtani közép módszere és a krigelés segítségével készült modelleknél megjelennek másik fúrásokból származó formációk (ezek láthatók narancssárga színnel az oszlopokban), melyek az interpolálás révén kerültek erre a területre. Valamint itt is az Újfalui Homokkő Formáció helyét néhol a Dunántúli Formációcsoport veszi át.

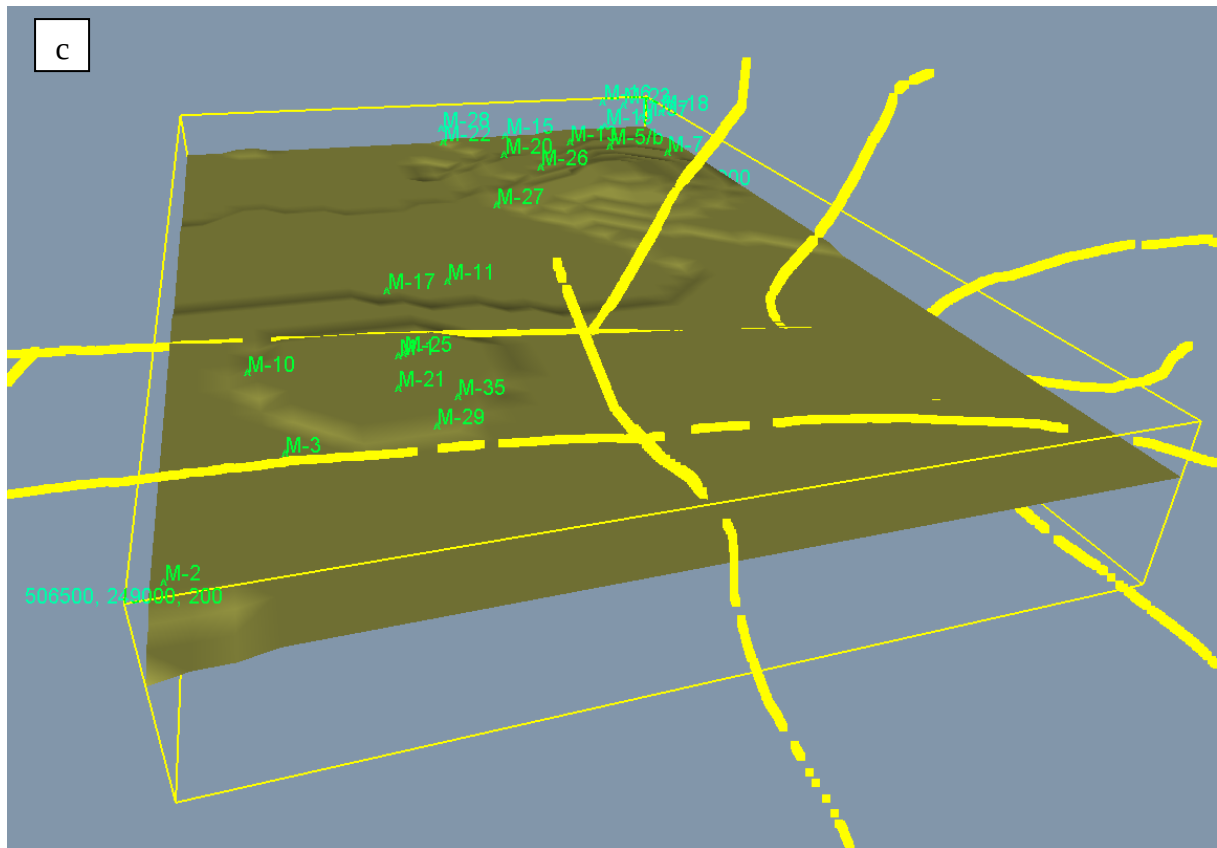
A különböző oda nem illő formációk megjelenése a voxeles modellekben többféle indokkal magyarázható. Egyrészt nincs horizontálisan lehatárolva a modell, az egyes vetők nem kerültek beépítésre, másrészt a modell felbontása $500 \times 500 \times 100$ m, így csak közelítőleg tudtuk megkeresni az adott fúráshoz tartozó voxelekből álló oszlopot, ez is okozhat némi pontatlanságot.

A modellek összevetése a szeizmikus horizontokkal

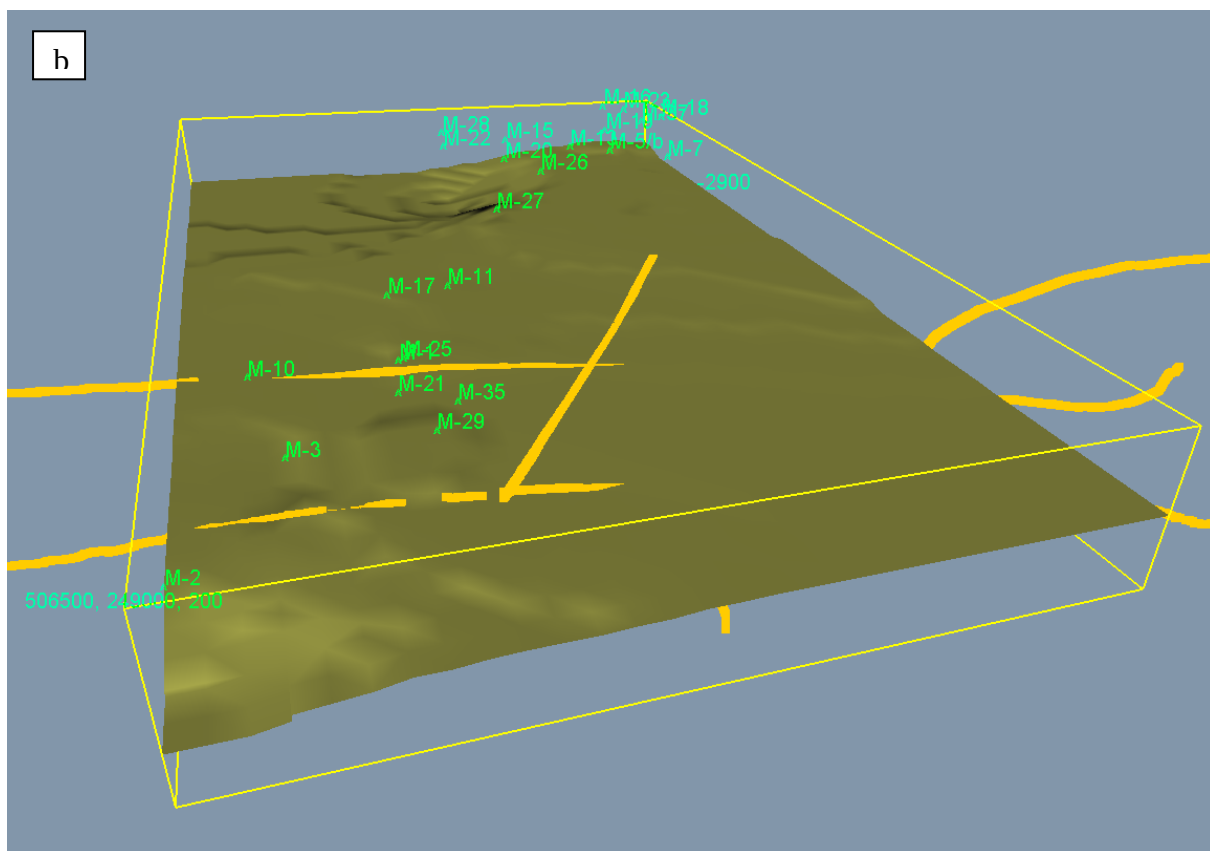
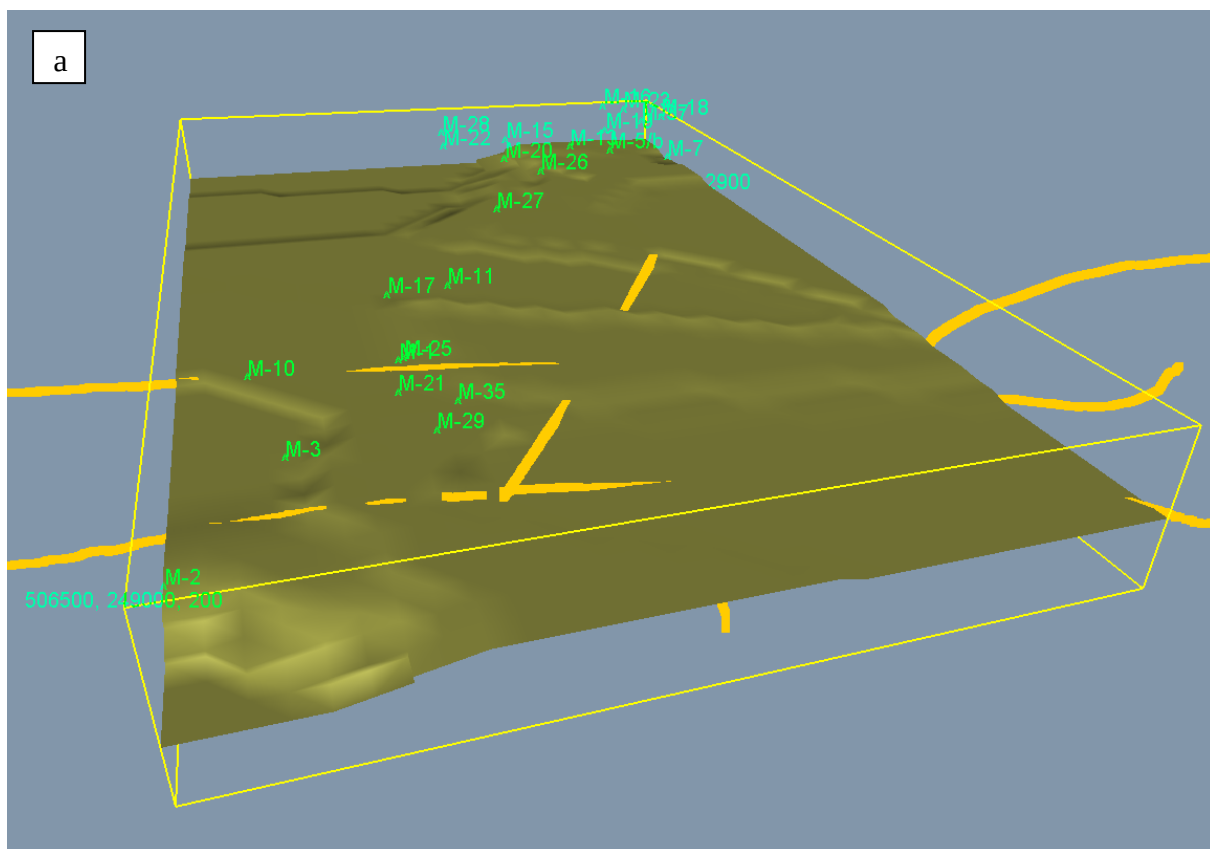
A következő ábrákon (29. ábra, 30. ábra) az elkészített voxeles modelljeinket összevetettük az értelmezett 2D horizontjainkkal. A voxeles modellek esetén két tetszőlegesen kiválasztott jelentősebb formációt választottunk ki (a Somlói Formációt és az Algyői Formációt), majd az egyes formációk felső határfelületére egy izofelszínt hoztunk létre, amely megadta az $500 \times 500 \times 100$ méteres adattégla határait. Ezt vetettük össze a szeizmikus értelmezés során interpretált és sebesség-mélység konverzióval átváltott 2D vonalakkal, amely az egyes formációk fedő határának felelnek meg.

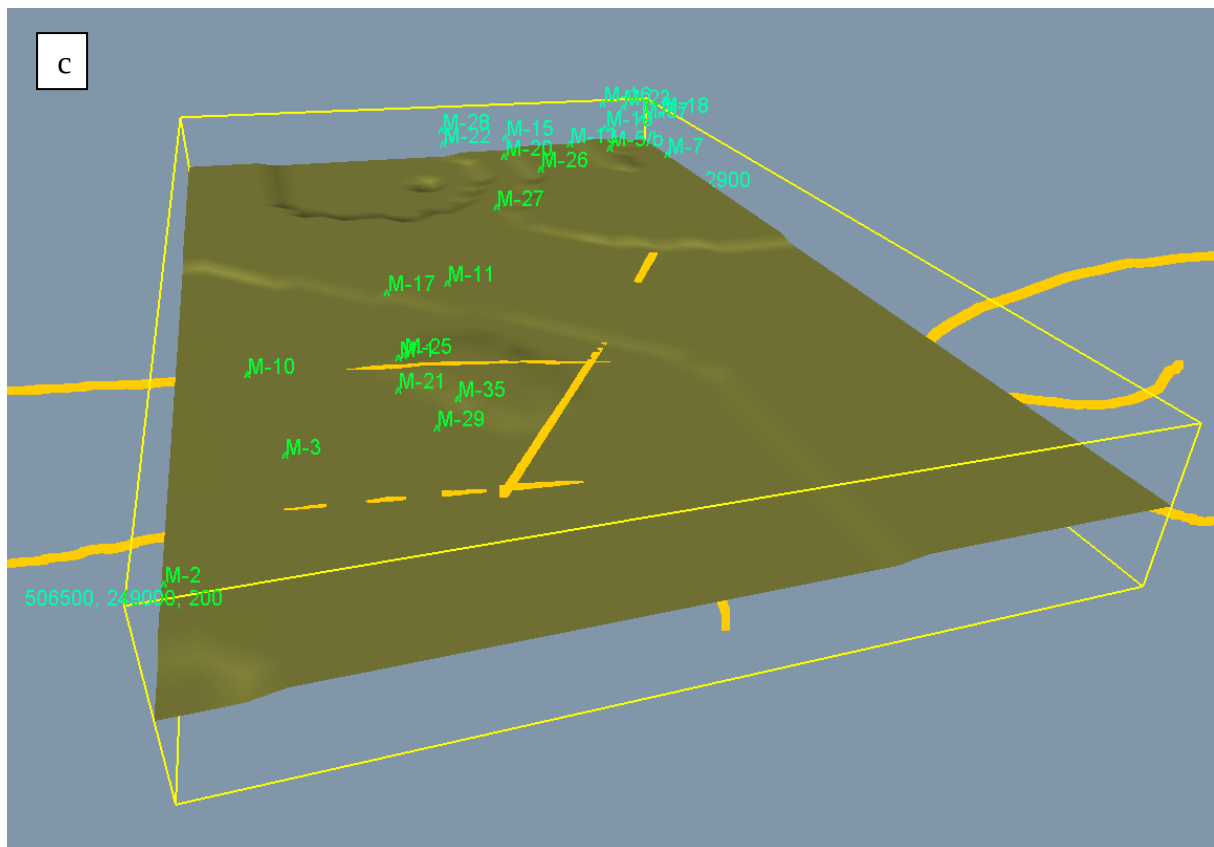
Következtetesként levonhattuk, hogy jelentős eltérések vannak az egyes interpolációs eljárások által kirajzolt voxeles izofelszínek között, illetve ezek a felszínek csak hibával közelítik meg az interpretált szeizmikus szelvények vonalait. Viszont a szeizmikus szelvények sebesség-mélység konverziója sem teljesen pontos, hiszen egyetlen az M-27-es checkshot adatai alapján történt az átváltás, azaz nem készítettük el a területre vonatkozó lehetséges sebességteret.





29. ábra: Az *a*, *b*, *c* ábraszorozat a különböző interpolálási eljárással létrehozott (*a*: legközelebbi pontok, *b*: súlyozott számtani közép módszere, *c*: krigelés) voxelek felső határfelülete a Somlói Formációra (izofelszín) és ennek összevetése a szeizmikus értelmezésből nyert Somlói Formáció horizontjaival (sárga térbeli vonalak).





30. ábra: Az *a*, *b*, *c* ábraszorozat a különböző interpolálási eljárással (*a*: legközelebbi pontok, *b*: súlyozott számtani közép módszere, *c*: krigelés) létrehozott voxelek felső határfelülete a Algyői Formációra (izofelszín) és ennek összevetetése a szeizmikus értelmezésből nyert Algyői Formáció horizontokkal (sárga térbeli vonalak).

Szeizmikus horizontok és fúrás adatok alapján készített modell

Az előzőekben bemutatott modellezés alapján, mind a fúrásadatok, mind az értelmezett szeizmikus szelvények felhasználásával létrehoztunk voxeles modelleket. Itt a rendelkezésünkre álló adatbázist egy 3D osztályozott pontfelhőként kezeltük, ahol az egyes osztályok száma a formációknak felelt meg. Ezt megtehetjük, mivel a szeizmikus horizontok 3D vonalai vertexekből épülnek fel, a fúrások pedig eleve a formációhatárokat meghatározó adatsort alkotnak.

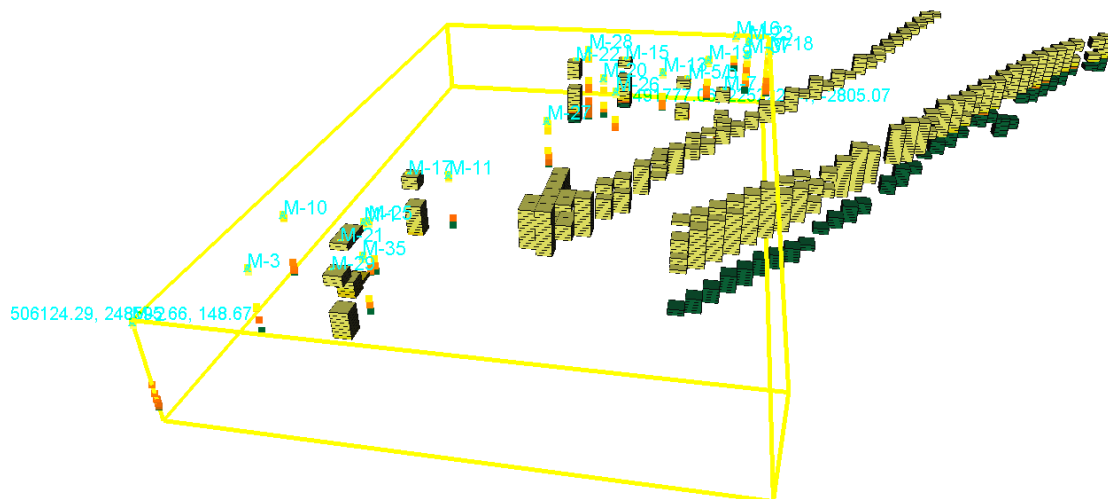
Az előzőekben elvégzett vizsgálatok alapján beláttuk, hogy az interpolációk lényeges eltéréseket eredményeznek a modellben, aminek pontosítását csak további adatok, a vetők és geofizikai logokból származó adatokkal lehet pontosítani.

Mindazonáltal, felhasználva a szeizmikus értelmezést, az egyes rétegek lehetséges vastagságáról némileg több információ állt rendelkezésünkre, így lehetővé vált egy vertikálisan jobban meghatározott voxelfelbontás kialakítása. Érdeemes végiggondolni, hogy

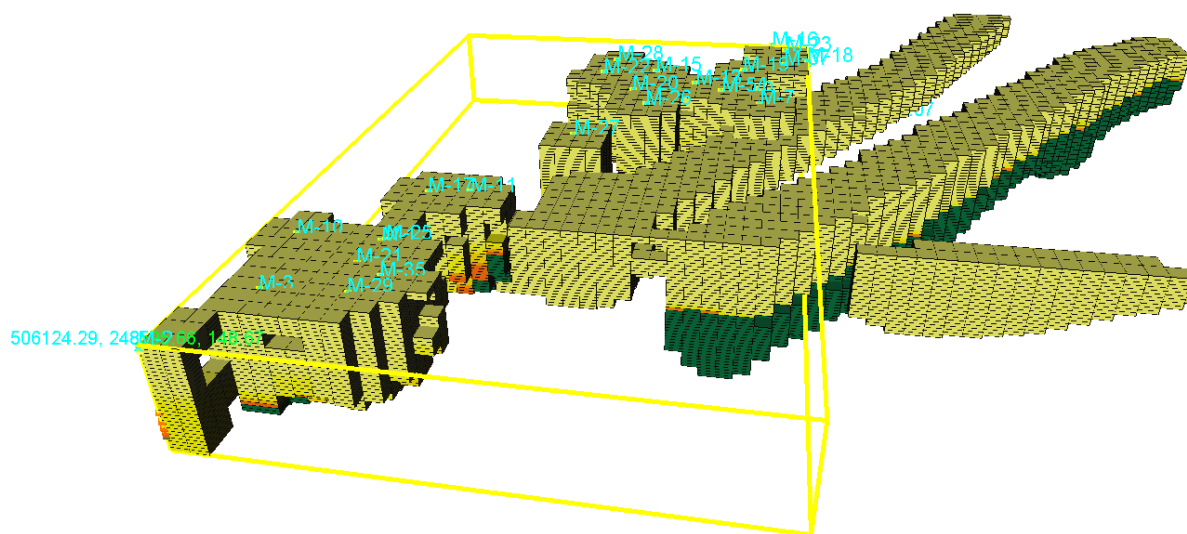
az adott adatblokkot főként vertikálisan, milyen magasságú voxelekkel érdemes közelíteni, melyik közelíti meg a helyes mintavételezés révén a tényleges határokat. A mintavételezésnek olyannak kell lennie, hogy az eredeti vastagságok az adatkockákból kirakhatóak legyenek, ezáltal az eredeti kiinduló adat is visszanyerhető legyen. A holocén és pleisztocén rétegek modellezésére nem kívánunk hangsúlyt fektetni, mivel ezek legtöbbször néhány méter vastagságúak, ezért ezeket jelen esetben „zajnak” tekinthetjük és nem szükséges ehhez igazítani a voxelek vertikális felbontását. Az értelmezés során megfigyeltük, hogy ez a vastagság fontosabb formációk tekintetében, az értelmezett horizontok alapján legtöbbször 200 méter és 500 méter vastagság körül mozog. Így a fúrások során használt 100 méteres felbontás jól alkalmazható.

Horizontális felbontás szintén fontos, meghatározza, hogy mekkora legyen az adott konkrét adathból származó információ hatásköre, sugara. A szeizmikus és fúrás voxeles adatmodell elkészítésekor lehetőség nyílt ennek vizsgálatára is, hiszen a két adattípus együttes használatával már érdemes vizsgálni, hogy milyen horizontális felbontás lehet ideális.

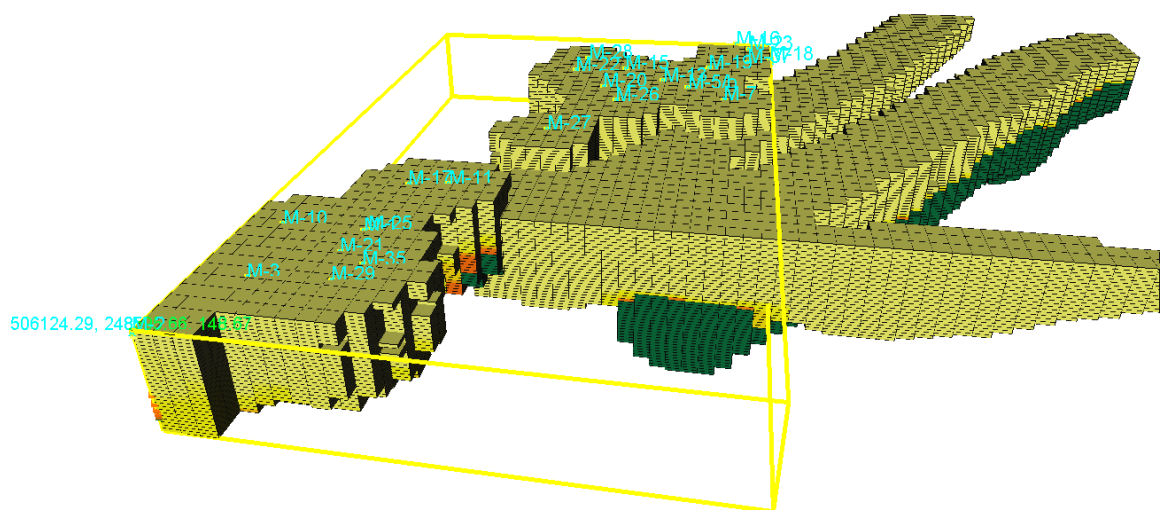
Az összegzett osztályozott 3D pontfelhő 3D való interpolálása esetén először 500 méter majd 1500 méter, végül 2000 méter sugárral dolgoztunk (31. ábra, 32. ábra, 33. ábra).



31. ábra: 500 méteres sugár esetén a 3D pontfelhő 3D-be való interpolálása

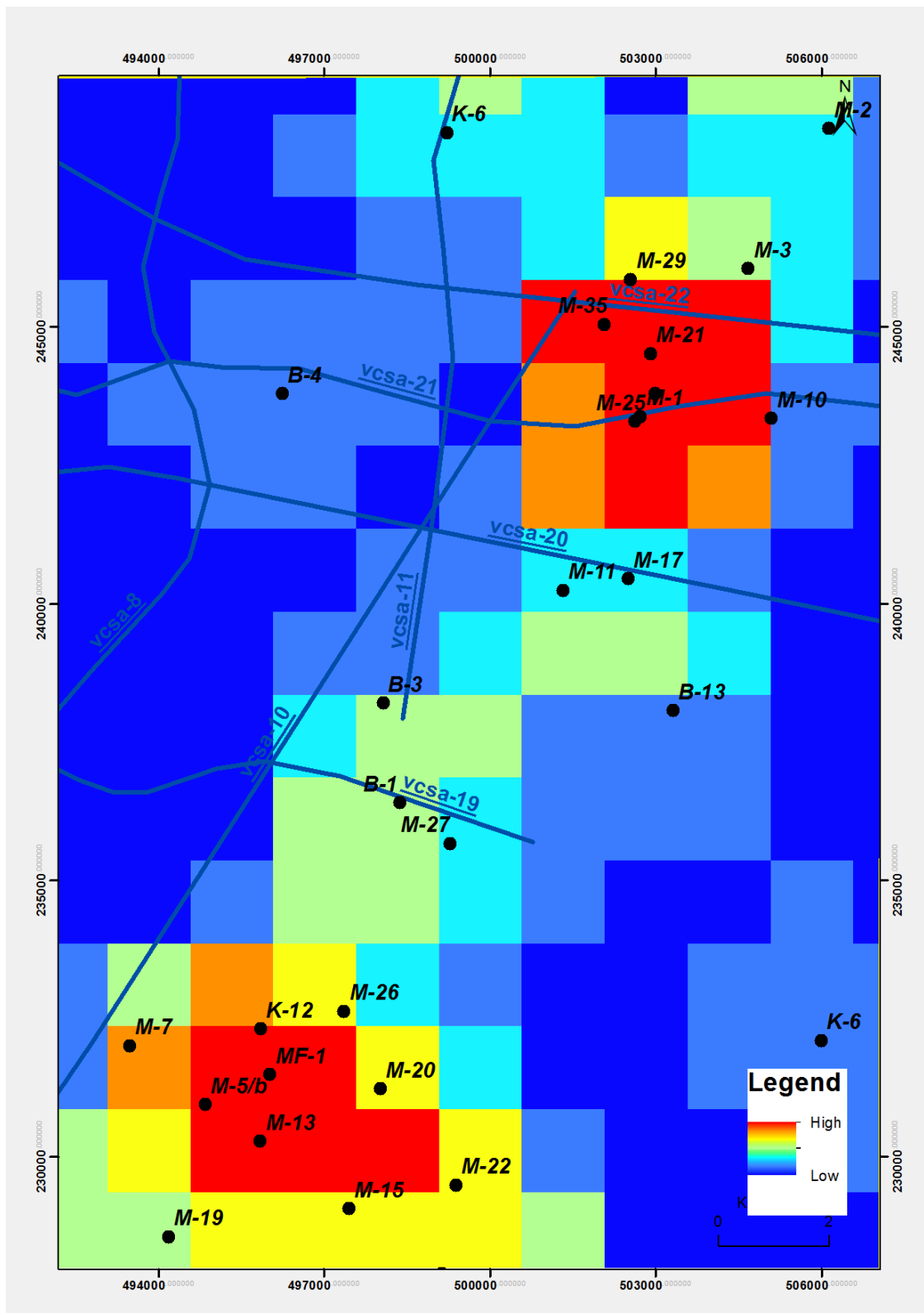


32. ábra: 1500 méteres sugár esetén a 3D pontfelhő 3D-be való interpolálása

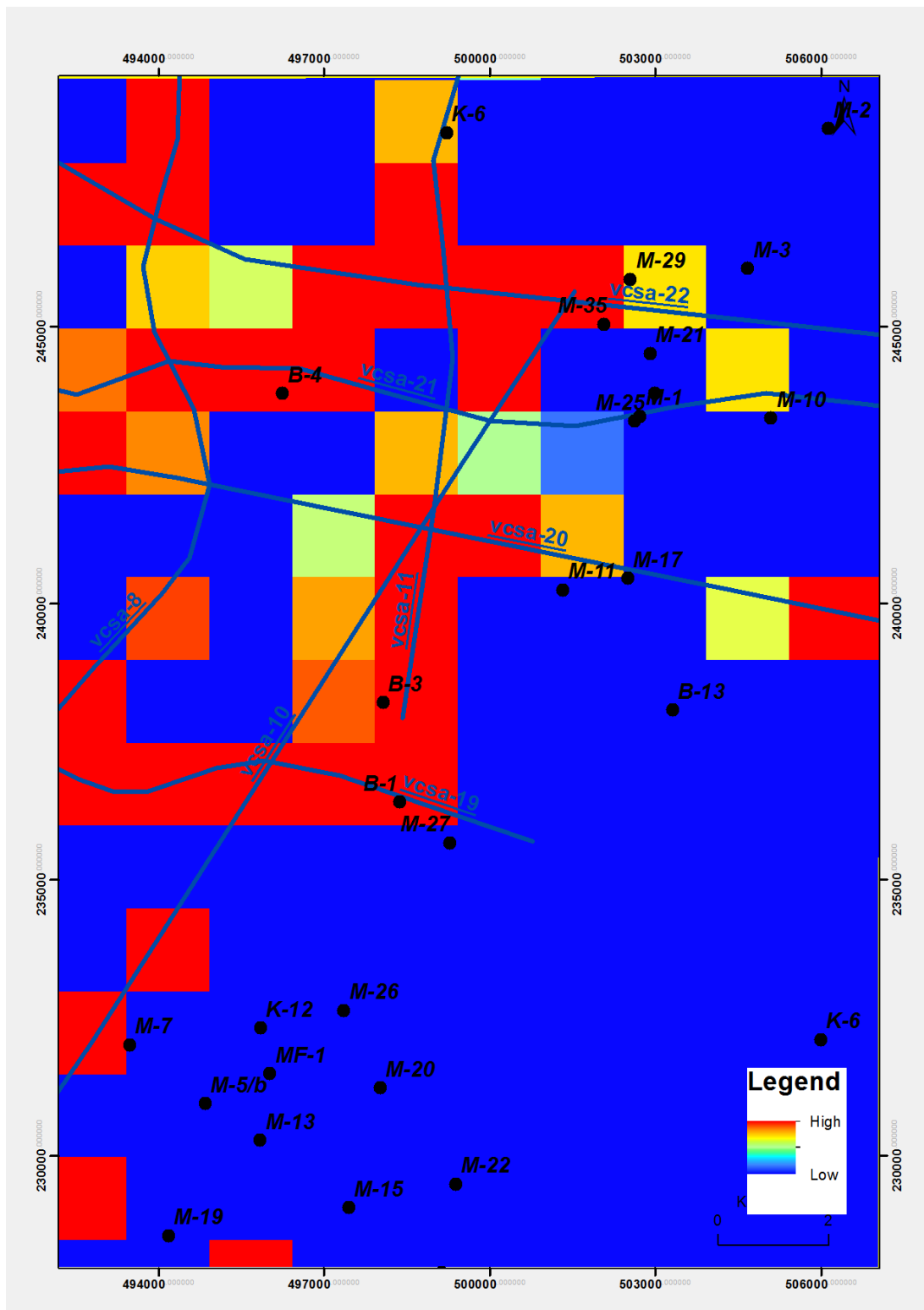


33. ábra: 2000 méteres sugár esetén a 3D pontfelhő 3D-be való interpolálása

Megállapítottuk, hogy 1500 sugár esetén kapunk geológiai szempontból a viszonylag legmegbízhatóbb modellt. Ezt a megfigyelést, megjelenítettük, egy fúrás és egy szeizmikus szelvény adatait figyelembe vevő adatsűrűség térképen. A 35. és 36. ábrát megvizsgálva, láthatjuk, hogy piros színnel vannak jelölve azok a területek, ahol a rendelkezésre álló adatsűrűség viszonylag magas, a sötétkék területeken viszont, egyáltalán nem áll rendelkezésünkre adat, így ide a meglévő adatok alapján interpolálnunk kell, és ezáltal egy robusztus becslést kapunk, hogy vajon mi lehetséges azon a területen amelyről, jelenleg nem állnak rendelkezésünkre mérések. A két adatsűrűség térképet összevetve is maradnak kézzel jelölt területek, ezekre adtunk a csak fúrások bevitelével készült modellek esetén becslést, annak segítségével, hogy az interpolálást megfelelő képen lehatároltuk. A 3D osztályozott pontfelhő interpolálásakor megállapíthatjuk, hogy azokon a területeken, ahol nincs adat, ahhoz olyan nagy sugár figyelembe vételével kellene interpolálni, amely az adat megbízhatóságát rontja.



34. ábra: Fúrásadatok figyelembevételével készült adatsűrűség-térkép, amely 1500 méter felbontással vizsgálja, hogy egy-egy pixel meghatározásához mennyi adat áll rendelkezésre. Pirossal vannak jelölve azok a területek, ahol sok adatpont áll rendelkezésre, kézzel azok a területek ahol nem állnak rendelkezésünkre adatok.



35. ábra: Szeizmikus adatok figyelembevételével készült adatsűrűség térkép, amely 1500 méter felbontással vizsgálja, hogy egy-egy pixel meghatározásához mennyi adat áll rendelkezésre. Pirossal vannak jelölve azok a területek, ahol sok adatpont áll rendelkezésre, kékkel azok a területek ahol nem állnak rendelkezésünkre adatok.

5. Összefoglalás

Dolgozatunk célja voxeles adatbázis létrehozása volt fúrásadatok és értelmezett szeizmikus szelvények alapján, valamint az egyes formációk modellezése egy alkalmasan kiválasztott kisalföldi példaterületre. A voxeles adatbázisból kapott geológiai modellek egy robusztus becslést adnak azokra a területekre, ahol sem szeizmikus szelvények, sem fúrásadatok nem állnak rendelkezésünkre. Az adatbázis egy 3D földtani modellt szolgáltat, elősegítve ezzel a 3D geológiai gondolkodást.

A modellek előállítására kétféle módon történt. Egyrészt a Rockworks szoftver használatával, ahol a fúrás adatok alapján először 2D-ban interpoláltuk az egyes formációk fekü- és fedőpontjait, majd ezeket határként használva kezdtük el a 3D interpolációt. Másrészt pedig Voxler szoftver használatával egy a fúrásokból és a 2D horizontokból előállított 3D osztályozott pontfelhőből egyből 3D-ban interpolálva állítottunk elő voxeles modellt.

A csak fúrásból létrehozott voxeles modell esetén a legközelebbi pontok és a súlyozott számtani közép módszereket, valamint a krigelést használtunk. A Rockworks szoftver használatával létrehozott modellek előnye, hogy itt sikerült a fekü- és fedőgridek figyelembevételével vertikálisan lehatárolni a modellt, így viszonylag megbízhatóan adhattunk becslést azokra a területekre is ahol nem áll rendelkezésünkre adat. A három különböző interpolálási eljárással létrehozott modelleket többféle vizsgálattal hasonlítottuk össze. Egyrészt kiszámoltuk és hisztogramokban ábrázoltuk a három interpolálás esetén egyező voxeleket és a különböző eljárások során létrejött különböző adattartalmú voxeleket. Ezenkívül pedig, a modellből kiszedtük adatokat és az alapján is interpoláltunk majd megnéztük, hogy az így interpolált modell, milyen becslést ad arra az adatra amit eredetileg ismerünk. Ezek alapján levontuk a következtetéseket. A legközelebbi pontok módszer eredményeként Thiessen-poliéderek jelennek meg és ezek geológiailag nem feltétlenül utalhatnak vetők jelenlétére, viszont itt nem toldódnak be plusz formációk. A súlyozott számtani közép módszerének alkalmazása során az egyes formációk lefutása realisabb, simább lett, viszont plusz formációk toldódtak be az eljárás során. Ennek oka elsősorban az volt, hogy az egyes formációkhoz tartozó számszerű adatokat a program ilyenkor folytonos adatként kezeli. A krigelés statisztikailag megbízhatóbb módszer, mint az súlyozott számtani közép vagy a legközelebbi pontok módszere, azonban itt is megfigyeltük a plusz formációk betoldódását.

Az adatbázis 2D értelmezett horizontokkal való összevetésekor ahol volt fúrásadatunk, ott jó egyezést mutatott az egyes formációhatárok lefutásában, ahol viszont nem állt

rendelkezésünkre adat ott némi eltérés mutatkozott a szeizmikus értelmezéssel összevetett adatok esetén.

A második eljárással a voxeles modelleket a fúrások és a 2D szeizmikus szelvények alapján állítottunk elő. Itt problémaként még az is felmerült, hogy nem sikerült sem vertikálisan sem horizontálisan lehatárolnia a modelleket, így horizontálisan látványosan extrapolálódott modell. Viszont előnye volt a módszernek, hogy a vertikális és horizontális felbontást a szeizmikus adatoknak köszönhetően pontosabban sikerült lehatárolni.

Összességében véve megállapítható, hogy jelenleg a voxelek előállítása, csak több szoftver együttes használatával lehetséges. Külön kell kezelni a 3D pontfelhők osztályozását, a voxelek előállítását és azok vizualizálását. A vizualizáció lényegében videókkal a legoptimálisabb (a dolgozatban technikailag nem reprodukálható), mert ezáltal lehet legjobban megmutatni a modelleket minden oldalról. A voxelek elemzése egyelőre szoftveresen nem megoldott, így a kapott voxelek elemzését szintén külön kell kezelni.

Megállapítható, hogy a Rockworks szoftver alkalmazásával létrehozott modell sokkal jobban közelíti az általunk kitűzött célt, mint a Voxler szoftverben a fúrás- és szeizmikus adatok felhasználásával létrehozott osztályozott pontfelhőből közvetlenül interpolált modell, mivel az utóbbinál a lehatárolások hiánya súlyos extrapolációt okoz az eredményekben, így nem ad az egész adatblokkra megbízható becslést.

Probléma viszont, hogy a Rockworksben a horizontok importálása csak virtuális fúrások vagy előre elkészített 2D interpolált 3D horizontokkal lehetséges. A jövőben ezért szükség van még egyéb szoftverek tesztelésére is, mint például Petrel, amely képes a fúrás és szeizmikus adatok együttes voxelizálására, illetve képes a horizontális határok mellett a vetők figyelembe vételére is.

6. Köszönetnyilvánítás

Szeretnénk megköszönni, először is témavezetőnknek, Székely Balázsnak a sok ötletet és tanácsot, amit a téma vezetése során adott nekünk.

Ezenkívül, szeretnénk köszönetet mondani Zámolyi Andrásnak, Kutas Péternek és Kovács Gábornak a tőlük kapott hasznos megjegyzésekért.

Az adatok rendelkezésünkre bocsátását és az informatikai eszközök használati lehetőségét köszönjük az ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszéknek, amit a NK83400 SourceSink Magyarország- OTKA pályázat keretében használhattunk (Témavezető: Dr. Timár Gábor tszv. doc.).

Ezenkívül köszönettel tartozunk a Magyar Földtani és Geofizikai Intézetnek a rendelkezésünkre bocsátott fűrásadatbázisért.

7. Irodalomjegyzék

1. Calcagno P., Courrioux G., Guillen A., Fitzgerald D., McInerney P. (2006): How 3D implicit geometric modelling helps to understand geology: The 3D GeoModeller Methodology: Society for mathematical geology XIth International Congress, University of Liege, Belgium
2. Császár G. (ed.) (1997): Magyarország litosztratigráfiai alapegységei. Táblázatok és rövid leírások. Magyar Állami Földtani Intézet, p. 114
3. Elek I. (2006): Bevezetés a geoinformatikába. ELTE Eötvös Kiadó, Budapest
4. Fallara F., Legault M., Rabeau O. (2006): 3-D Integrated Geological Modeling in the Abitibi Subprovince (Québec, Canada): Techniques and Applications. Exploration and Mining Geology, 15(1-2): 27-41.
5. Horváth F., Rumpler J. (1984): The Pannonian basement: extension and subsidence of an Alpine orogene. Acta Geol. Hung., 27: 222-236.
6. Haas J., Budai T., Csontos L., Konrád Gy. (2010): Magyarország pre-kainozoos földtani térképe, 1:500.000 – Magyar Állami Földtani Intézet
7. Koncz M. (2011): Fiatal vetőszerkezetek korrelációja 2D szeizmikus szelvények alapján, szakdolgozat, ELTE FFI Geofizikai és Űrtudományi Tanszék, Budapest
8. Kőrössy L. (1987): A kisalföldi kőolaj- és földgázkutatás földtani eredményei. – Általános Földtani Szemle, 22: 99-174.
9. Scharek P. (1993): A Kisalföld földtani térképsorozata – Kapuvár, Magyar Állami Földtani Intézet, p. 39

10. Szafián P., Tari G., Horváth F. (1999): Crustal structure of the Alpine-Pannonian transition zone: a combined seismic and gravity study, *International Journal of Earth Sciences*, 88(1): 98-110
11. Székely B., Szafián P., Frisch W., Kuhlemann J., Danišík M., Dunkl I. (2007): ATHMEA: A three-dimensional model of the Eastern Alps, *Geophysical Research Abstracts* 9: paper. 08663
12. Tari G. (1994): Alpine Tectonics of the Pannonian Basin - Doktori (Ph.D.) értekezés, Rice University, Houston
13. Uhrin A. (2011): Vízszintváltozási ciklusok és kialakulásuk okai a késő-miocén Pannon-tó egyes részmedencéiben – Doktori (Ph.D.) értekezés, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest

Internetes jegyzék:

Jordán, Gy. (2012): <https://sites.google.com/site/gyozojordan/>, utolsó elérés 2013. január 8.
<http://www.dinoloket.nl/nl/download/subsurfacegeotop.html>, utolsó elérés 2013. január 8.