

Árvédelmi töltések rézsúállékonyságvizsgálata GEO5 programmal

1. A vizsgálatok célja

Árvízvédelmünk alaplétesítményei az árvédelmi töltések. Állékonyságuk megítélése döntő jelentőségű, hiszen az esetlegesen szükséges állékonyságnövelő beavatkozások egyrészt költségesek, másrészt megvalósításukra általában rövid idő áll rendelkezésre, harmadrészt nagy értéket testesítenek meg és védenek.

Az állékonyság vizsgálata –annak konkrét eredményén túl- szemléletformálást is nyújt, hiszen segítségével képet lehet alkotni a számításba vett terhek és hatások végeredményre gyakorolt hatásáról, az egyes paraméterek súlyáról. Objektív ítélet alkotható a védekezési munkák várható eredményességéről, az elkövethető hibák következményeiről.

2. A vizsgálatok eszköze

A fentebb megfogalmazott célok eléréséhez viszonylag nagyszámú vizsgálatot kell elvégezni, mely célra ma már több szoftver is alkalmazható.

Szakmai körökben a Plaxist tekintik legjobbnak, hiszen végeसेlemes alapokon, rendkívül összetett geotechnikai problémák modellezésére alkalmas.

A vízügyi ágazat az árvíz kockázati projekt keretében egy hasonlóan megbízható modellezési háttérű, de bizonyos értelemben praktikusabban használható, moduláris szerkezetű programcsomag, a GEO5 ágazati szempontból releváns moduljainak beszerzése mellett döntött.

A GEO5 is rendelkezik végeसेlemes modullal, de van neki egy konzervatívabb, ám igen szemléletes eredményt szolgáltató „Rézsúállékonyság” modulja is.

A program használata során egyszerű rajzi eszközökkel definiálható a geometria, majd a talajrétegződés és a talajmechanikai paraméterek megadását követően többféle terhelés is figyelembe vehető, köztük az átszivárgó víz is.

A szivárgási vonal helyzetét a program nem számolja, azt bemenő adatként veszi figyelembe.

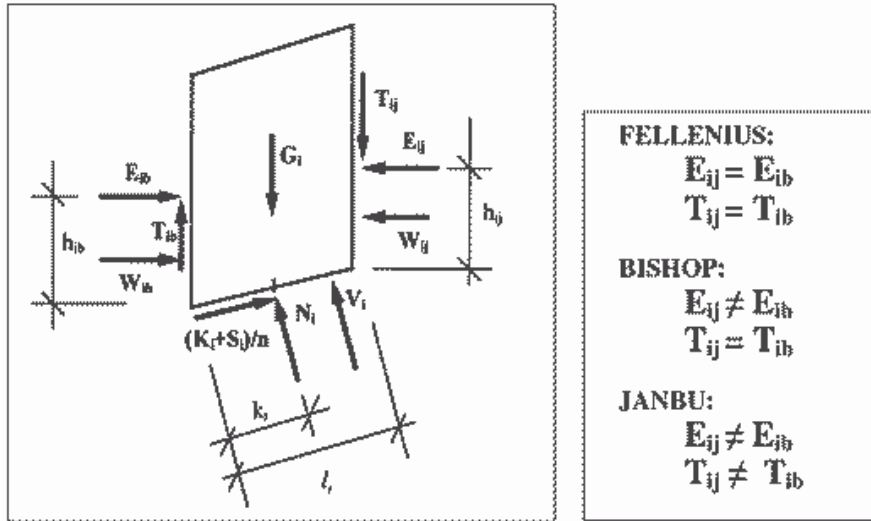
A számítások számos szabvány alapján végezhetők, melyek között szerepelnek a hazai MSZ, illetve MSZ-EN műszaki előírások is.

Számítási módszerként többet is elérhetővé tesz a program, így a:

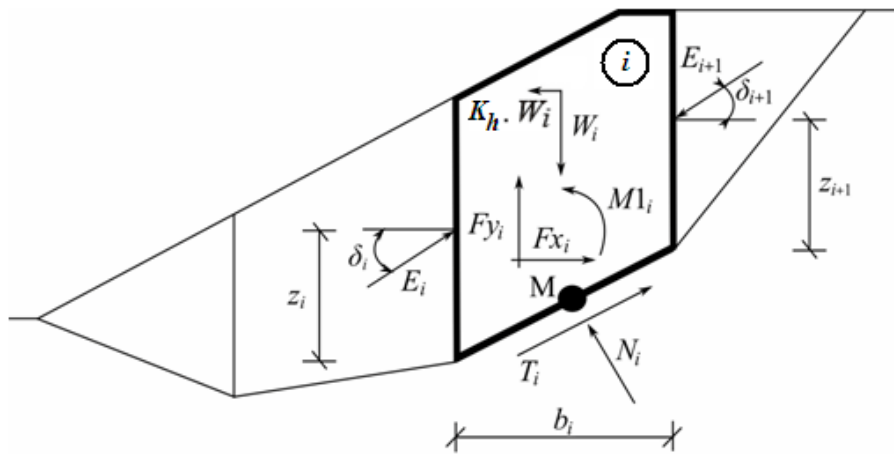
- Bishop;
- Fellenius/Patterson;
- Spencer;
- Janbu;
- Sarma;
- Morgenstern-Price és a
- Shahunyants módszert.

Az egyes módszerek eltérő egyszerűsítésekkel élnek, ezért természetesen eltérő eredményeket szolgáltatnak.

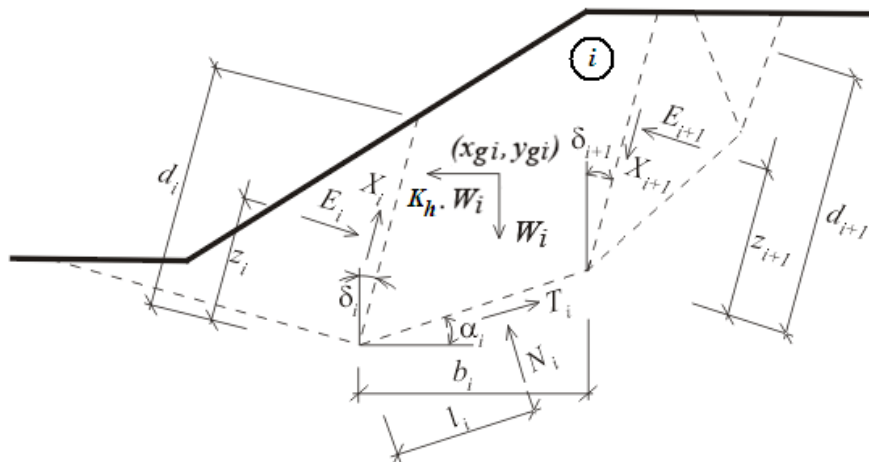
A fenti módszerekben alkalmazott egyszerűsítő feltevések és elvi megközelítések a következők:



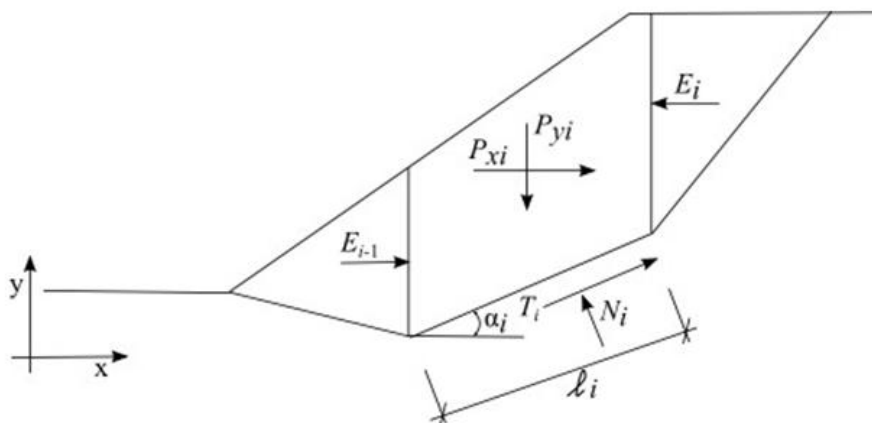
1. ábra: a lamellákra ható erők és egyszerűsítő feltevések
 (forrás: Faur Krisztina Beáta, Szabó Imre: Geotechnika)



2. ábra: a Morgenstern-Price eljárás alapjai
 (forrás: GEO5)



3. ábra: a Sarma eljárás alapjai
 (forrás: GEO5)



4. ábra: a Shahunyan's eljárás alapjai
(forrás: GEO5)

Ezek mindegyikével vagy valamennyiükkel együttesen lehet állékonyságvizsgálatokat végezni. A számítások két üzemmódban futtathatók:

- egy konkrét csúszólap állékonyságának kiszámítása (szabványos);
- egy kiinduló csúszólap megadását követően a kritikus állékonyságú csúszólap megkeresése (optimalizálás).

A dolgozat készítése során a második üzemmód, azaz az optimalizálás szerinti futtatások történtek.

Az optimalizálás alkalmazásakor tudni kell azt, hogy az eljárás végén adódó kritikus csúszólap sokszor csak relatíve, azaz a kiindulásként megadotthoz képest kritikus, vagyis ha más kiinduló csúszólap kerül megadásra, akkor –adott esetben- az előzőnél gyengébb állékonyságú, tehát az előzőnél kritikusabb csúszólapot is szolgáltathat a program.

Mindez arra kötelezi a felhasználót, hogy több kiinduló csúszólap megadásával futtassa a programot és csak azt a csúszólapot tekintse kritikusnak, amely ilyen „tömeges” számítás eredményeként adódik.

A „Számítás” funkció lehetővé teszi különféle számítási esetek elkülönült definiálását és vizsgálatát, vagyis sorszámozott számítási forgatókönyvek definiálhatók, melyek eredményeikkel együtt eltárolásra kerülnek, így a „tömeges” vizsgálatok elvégzését követően értékelhetők és összehasonlíthatók az egyes forgatókönyvek.

Az értékelés eredményeként adódó, –most már abszolút értelemben is- kritikusnak tekinthető csúszólap állékonyságvizsgálata a továbbiakban részletesen dokumentálható.

A különféle számítási esetek definiálása azért is célszerű, mert a program sajátossága, hogy adott esetben szinte lehetetlen csak úgy, emlékezetből rekonstruálni valamely, korábban kritikusnak bizonyult csúszólapot.

A számítás végén kapott csúszólap geometriai adatai egyébként megjelenítésre kerülnek és azok alapján a későbbiekben szükség szerint helyreállítható a csúszólap. Ha viszont mindegyik kiinduló próbálkozás külön számítási esethez van rendelve, akkor nem fordulhat elő ilyen probléma.

A GEO5 egyaránt figyelembe tud venni köríves, illetve sokszögvonallal határolt csúszólapot. Tekintve, hogy sokszögvonallal bármilyen csúszólap közelíthető, ezért azt kell mondani, hogy a program bármilyen csúszólapot képes kezelni.

3. A talajmechanikai paraméterek felvétele

Minden számítás hitelessége az alapadatok minőségén, megbízhatóságán múlik. Bár tagadhatatlan, hogy a számítási módszerek –a bennük rejlő kisebb-nagyobb elhanyagolások és közelítések miatt- nem egyenszilárdságúak, mégis azt kell mondani, hogy a számítási módszerekből adódó bizonytalanságokat messzemenően meghaladják az alapadatok meghatározásának hibáiból eredő bizonytalanságok.

Talajmechanikai alapadatok előállításának több szintje van:

- egyszerű becslés: amikor a talajról csak helyszíni tapasztalatok állnak rendelkezésre, ismert a rétegvastagság, de ezen felül csak szemrevételezés és tapintás általi ismeretek vannak. Ilyenkor szubjektív becsléssel lehet élni („hasra ütés”). A becslés akkor is szubjektív marad, ha szakirodalmi táblázatokat vesznek igénybe (cizellált hasra ütés).
- osztályozó vizsgálatokon alapuló becslés: ha legalább osztályozó vizsgálatok történtek, akkor különféle szakirodalmi forrásokra támaszkodva lehet becsülni a paramétereket. A becslés szűk keresztmetszete a telített víztartalom (ebből eredően a térfogatsűrűség és a kohézió) megítélése. Talajvíz alóli minták esetében közelítésként vélelmezhető azok telített állapota. Ekkor már egy fokkal megbízhatóbb becslés történhet. A talajvíz alatti minta telítettsége természetesen korántsem biztos. Minél mélyebbről származik a minta, minél tartamosabb a talajvíz alatti helyzet, annál valószínűbb a telített állapot.
- osztályozó vizsgálatokon és magmintavételen alapuló becslés: amennyiben magminta- és osztályozó vizsgálati eredmények állnak rendelkezésre, akkor egzakt és empirikus összefüggések együttes felhasználásával elfogadható pontosságú becslések tehetők.
- magmintavételen alapuló közelítő mérés: közvetlen nyíróvizsgálattal és kapcsolódó mérésekkel a valóságot jól közelítő paramétereket lehet nyerni.
- magmintavételen alapuló „pontos” mérés: triaxiális vizsgálati mérések szolgáltatják a legpontosabb laboratóriumi eredményeket.
- helyszíni szondázások: az alkalmazott eljárás és a kalibráció minőségének függvényében szolgáltat a valósághoz közeli eredményeket.

A különböző előállítási szintek különböző idő és költségigényeket testesítenek meg. Árvízi szituációban sokszor az egyszerű becslés is nehézségekbe ütközik, de valamit mondani kell, valamilyen nyírószilárdsági paramétereket fel kell venni. Megfelelő rutin hiányában az orosz ruletthez hasonlít a dolog.

Bármilyen szinten is történik a paraméterek becslése, -jobb esetben kimérése- egy alapvető dolgot le kell szögezni:

Az árvízvédelmi töltés állékonysága akkor válik kritikussá, ha anyaga telítetté válik. Kiszáradt, messze telítetlen agyagtalajok akár extrém állékonysággal is bírhatnak. Mivel mintavételezésre az esetek túlnyomó többségében csak akkor van lehetőség, amikor a töltéstest keresztmetszete még nem, vagy csak részlegesen telítődött, ezért a mindenkori lehetőségek függvényében:

- vagy laboratóriumban kell telíteni a töltésből kinyert magmintákat és a továbbiakban ezen minták felhasználásával kell elvégezni a megfelelő méréseket;

- vagy valamilyen (empirikus) összefüggéssel kell becsülnünk a telített állapotban számításba vehető nyírószilárdsági paramétereket, illetve térfogatsűrűséget.

Az elmondottak okán tehát súlyos tévedés az, amikor az árvédelmi töltés állékonyságát a – legtöbbször nem vizes, hanem közutas vagy mélyépítő - laboratórium által kiadott nyírószilárdsági paraméterek kritika nélküli felhasználásával végzik el (kivéve, ha a laboratórium kifejezetten telített állapotra vonatkozó eredményeket szolgáltatott). A mai tervezői gyakorlat sajnos a kritika nélküli elfogadás mellett használja a laborok által szolgáltatott, döntően in-situ állapot jellemzésére alkalmas adathalmazt.

A teljes töltés keresztmetszvény telített állapotának feltételezése persze önkényes. Azonban:

- a töltések telített állapotba kerülésének sem nem szükséges, sem nem elégséges feltétele az árvízi terhelés, hiszen csapadékeszivárgás hatására ugyanúgy telítődhetnek, mintha árvíz tenné ugyanezt;
- a telítettség mértékének árvíz alatti megítélésére általában nincs idő. Ha volna is, nincs rá garancia, hogy az árvízi esemény későbbi fázisában a töltéstest nem kerülhet a vizsgálat időpontjában érvényesnél kedvezőtlenebb telítettségi állapotba.
- a telítődési folyamat numerikus modellezése rendkívül bizonytalan eredményre vezet, adott esetben hamis biztonságérzetet eredményezhet;
- a telített állapot feltételezése a biztonság javára történő elhanyagolást jelent. Segítségével bizonyos mértékig kompenzálhatók a számítás, a feltárás, a laborálás bizonytalanságai, hibái és a töltéstest belső „működésének” nem megismerhető aspektusai.

4. A számítások alapadatai

4.1. Geometriai adatok

A számításokhoz 6,0m magas, 1:2, illetve 1:3 rézsűhajlású, 6 m koronaszélességű töltések lettek felvéve.

A térszín vízszintes.

4.2. Talajmechanikai adatok

Altalajként két rétegtípus került vizsgálat alá:

- természetes tömörségű ($Tr_r = 80\%$ -os), telített sovány agyag (SA_a)
- természetes tömörségű ($Tr_r = 80\%$ -os), telített, erősen kövér agyag (KVA_a)

Töltésanyagként a fenti két talaj viszonylag laza állapotban ($Tr_r = 83\%$) lett figyelembe véve, hiszen előírt tömörségű talajoknál elenyésző esetben fordulhatnak elő állékonysági gondok.

Talaj neve	W_L	I_p	telített I_c	$r_{d \max}$	Tr_r	Kohézió	Belső súrlódási szög	Telített térfogatsúly
Altalaj								
SA_a	38	17	0,50	19,0	80	2,67	20	19,7
KVA_a	55	36	0,64	18,4	80	11,82	11	19,5
Töltés								
SA_t	38	17	0,63	19,0	83	4,20	20	20,0
KVA_t	55	36	0,71	18,4	83	16,52	11	19,9

1. táblázat: talajfizikai adatok

A paraméterek karakterisztikus értékének becslése a felvett osztályozó jellemzők felhasználásával, empirikus összefüggések alkalmazásával történt.

4.3. Terhek és hatások

A terhelő vízszintek:

- korona alatt 50 cm ($H_{\text{víz}}=5,5$ m);
- koronával egyező ($H_{\text{víz}}=6,0$ m);

Szivárgások:

A töltésszivárgás felszín görbéje a Kozeny-Casagrande eljárás szerint került meghatározásra.

Külső terhek:

- járműteher:
 - közúti hídszabályzat szerinti „B” osztályú jármű (össztömeg 400 kN, három tengely)
 - kerékterhelés: 80 kN
 - kerék felfekvés: haladás irányában 0,2m, keresztirányban 0,6 m
 - hátsó tengely nyomtáv: 1840 mm
- homokzsák: $17,0 \text{ kN/m}^3$

5. Számítási eredmények

A számítások Bishop módszerrel történtek. A kezdeti csúszólap felvételét követően a program megkereste az adott forgatókönyv melletti kritikus csúszólapot és megadta annak biztonságát. Valamennyi esetben figyelembe van véve a koronán lévő, rakott, „B” osztályú jármű, melynek szélső hátsó (dupla) kerekének középvonala a mentett oldali töltéskoronától 1,0 m-re helyezkedik el.

A közölt eredmények csak a vizsgált keresztmetszelvekre igazak, mert a program nem tudja figyelembe venni a bordás leterhelések közötti szabadon hagyott sávok miatti átboltozódásokat. Emiatt a ténylegesen várható biztonság növekedés a bordák közötti szakaszokon a számítottnál kisebb lesz.

Az állékonyságvizsgálatok az alábbi terhelési esetekre készültek el:

A terhelési eset	
azonosító száma	tartalma
1.	szivárgás és jármű nélkül
2.	szivárgás nélkül, járművel
3.	szivárgással, jármű nélkül
4.	szivárgással, járművel
5.	gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel
6.	gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel, 1,0m magas bordás leterheléssel
7.	az 1,0 m-es bordából 0,5 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság
8.	az 1,0 m-es bordából 1,0 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság
9.	gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel, 2,0m

	magas bordás leterheléssel
10.	a 2,0 m-es bordából 0,5 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság
11.	a 2,0 m-es bordából 2,0 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság

2. táblázat: számítási esetek

Az 1:3, illetve 1:2-es rézsúhajlásokhoz és kétféle talajhoz tartozó, a fenti terhelési eseteket alapul vevő számítások részletes eredményeit az 1. számú melléklet tartalmazza.

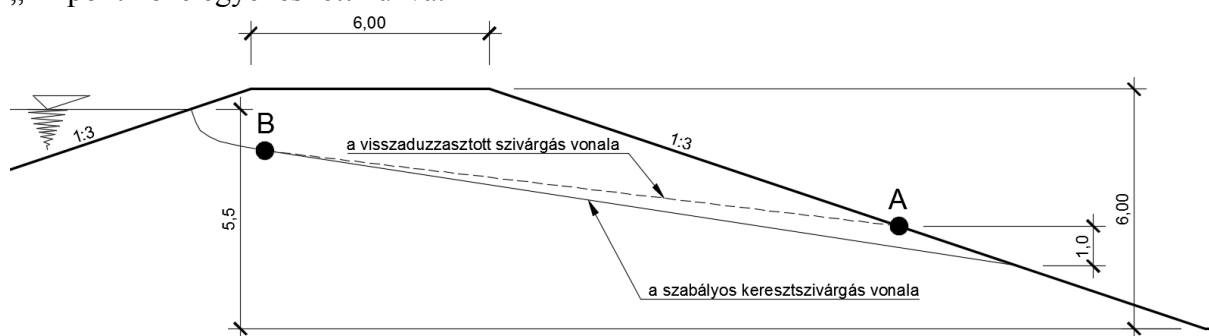
5.1. Az 1:3-as rézsúre elvégzett számítások eredményei

A természetbeni tapasztalatokkal egybevégezően a számítások is azt mutatták, hogy egy nem végletesen laza, terheletlen töltés 1:3-as rézsú mellett telített állapotban is kifogástalan állékonysággal bír.

Amennyiben jelentős terhet (pl. rakott kamiont) kap a töltés, ráadásul úgy, hogy mindez szélsőséges teherállást valósít meg, akkor karakteres ($D_n=0,22$, illetve $0,24$) állékonyságcsökkenés mutatható ki. Ez akkor is igaz, ha sovány- és akkor is, ha kövér agyagból készült töltésről van szó. Az állékonyság ugyan érzékelhetően csökken, ám ha nem is szabványos értékű, de a töltés még mindig biztonságosnak tekinthető.

Az árvíz hatására létrejövő keresztiszivárgás megjelenése még az előzőnél is karakteresebb változást eredményez a töltés állapotában, hiszen a telített állapotú, terheletlen töltés biztonsága a felvett talaj paraméterek és a töltéskorona alatt 50 cm-rel beállt vízszint ($H=5,5$ m) mellett a biztonság csökkenése $D_n=0,46$, illetve $0,39$! A sovány agyagból készült töltés biztonsága közel került az állékonysági határállapothoz, mert az $n=1,12$ -re mérséklődött. A kövér agyagból épült töltés még kellő állékonysági tartalékkal bír, mivel az $n=1,29$ még megbízható állapotot jelez.

A számítások során fel lett véve egy olyan terhelési eset is, amikor a töltés gyeptakarója 1,0 m-es visszaduzzasztást okoz a töltés belsejében. A szivárgási vonal megszerkesztése úgy történt, hogy a szabályos keresztiszivárgás rézsún való kilépési pontja („A” pont) 1,0 m-rel magasabbra lett helyezve, majd ez a pont és az eredeti szivárgási vonal lineárisa válását jelző „B” pont közé egyenes lett húzva.



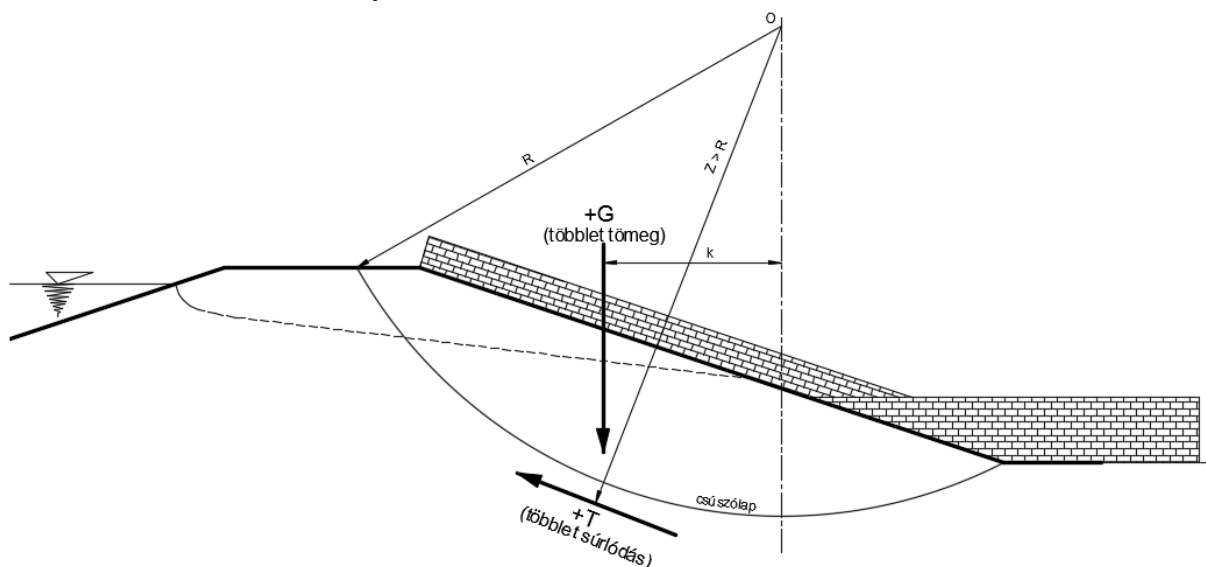
5. ábra: visszaduzzasztott szivárgás

Az így módosított szivárgás, valamint a járműteher együttese adta a leggyengébb töltésállapotot, melyeket számszerűen $n=0,96$, illetve kövér agyag esetében $n=1,14$ jellemez. A kapott értékek a szabályos keresztiszivárgásokhoz képest talajminőségtől függetlenül mindössze $D_n=0,01$ állékonyságcsökkenést jelentenek, ami azt jelenti, hogy az 1,0 m-es visszaduzzasztás adott geometriai elrendezésben és amúgy már telítődött talajkörnyezetben nem okoz érdemi állékonyságváltozást. Ez az eredmény nincs összhangban az

árvízvédekezési elvekkel és gyakorlattal, hiszen azok úgy tartják, hogy a rézsű sekély árkokkal való megcsapolása hatékony beavatkozást testesít meg. Az ellentmondás azonban csak látszólagos, mégpedig azért, mert a valóságban nagy annak a valószínűsége, hogy a megcsapolást követően lejjebb szálló szivárgási vonal miatt a víztelenített földtömeg valamelyest szárad, vagyis megnövekszik a talaj kohéziója. Jelen számítás során ez a hatás nem lett figyelembe véve.

A következőkben modellezésre került a bordás megtámasztás hatása, mégpedig a jónak és a hibásnak tekintett gyakorlat figyelembe vételével.

Jónak tekintett az a gyakorlat, amikor a bordákat csak a rézsűvel való metsződésükig készítik el. Rossznak akkor minősül egy borda, ha a részüre is ráfut, ily módon növelve az tönkremenetelt okozó erők nyomátékát.



6. ábra: a „rossz” borda egyszerűsített erőjátéka

A számítások azt mutatják, hogy érdemi biztonságnövekedéshez az adott töltés és vízterhelés mérettartományban legalább 2,0 m magas „jó” borda kell. 2,0 m-es bordák mellett a biztonságnövekedés mértéke talajtól függetlenül 0,19-re adódott.

	Rézsűhajlás	1:3			
		Talaj		KVA	
		SA	6,0m	5,5 m	6,0m
	Hvíz=	5,5 m	6,0m	5,5 m	6,0m
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel		0,96	0,99	1,14	1,14
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel, 1,0m magas bordás leterheléssel		1,03	0,99	1,21	1,19
az 1,0 m-es bordából 0,5 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság		1,08	1,06	1,21	1,2
az 1,0 m-es bordából 1,0 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság		1,11	1,09	1,23	1,21
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel, 2,0m magas bordás leterheléssel		1,15	1,09	1,33	1,32
a 2,0 m-es bordából 0,5 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság		1,16	1,14	1,29	1,28

a 2,0 m-es bordából 2,0 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	1,19	1,17	1,23	1,2
--	------	------	------	-----

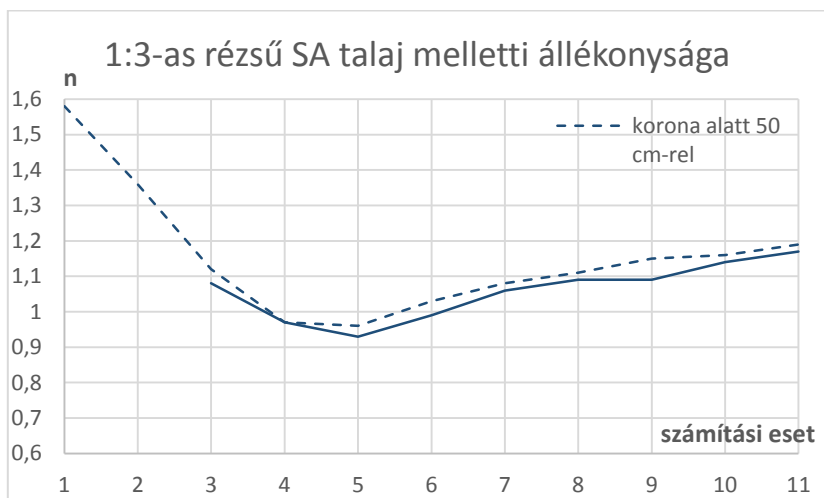
3. táblázat: bordás megtámasztások modellezési eredményei, 1:3-as rézsú

Első látásra meglepőnek tűnt, hogy a „rossz” bordák a sovány agyagból épült töltés esetében nem rontották le a rézsú biztonságát, sőt némi javulást is okoztak e téren. A kapott eredmény mindjárt elfogadhatóbb lesz, ha az erőjáték tükrében kerül vizsgálatra: ugyan a +G tömeg többlet nyomatókával rontja az állékonyságot, ám az ellenállások oldalán szereplő belső súrlódás relatíve nagy súlya miatt a +G tömeg hatására jelentkező többlet súrlódó erő jóval nagyobb erőkaron hat, mint a többlet borda tömegereje, ezért megfelelően nagy belső súrlódás esetén az eredő hatás mégiscsak pozitív változást eredményez az állékonyságban.

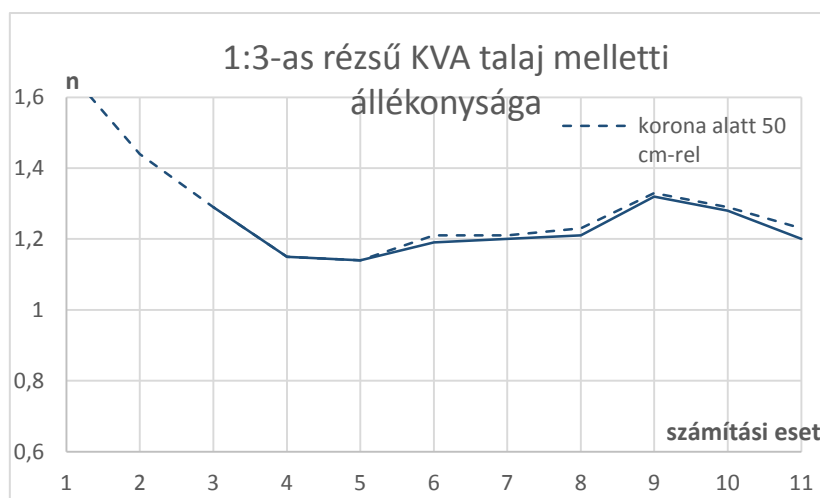
A kövér agyag talajoknál a meghatározó ellenálló hatást a kohézió képviseli, mely csak áttételesen (a tömörségen keresztül) függ a csúszólaphra ható normál erőktől.

A 3. táblázat szerinti számítási eredmények némileg meglepőek, hiszen az 1,0 m magas vízszintes bordához társuló felfuttatott bordák vagy közömbös, vagy minimális mértékű állékonyság javító hatást váltanak ki. A 2,0 m magas vízszintes borda esetében már egyértelmű állékonyságcsökkentést okoz a terhelés teljes rézsűfelületen való végigfuttatása. Emiatt az erősen kötött talajú töltések esetében kifejezetten ellenjavallt a bordák felfuttatása.

A töltéskoronával egyező vízszint esetében az előzőnél kissé alacsonyabb, de jellegében teljesen azonosnak tekinthető eredmények születtek. A két vizsgálati eredmény sor grafikonja szinte párhuzamos egymással.



7. ábra: a sovány agyag talajú, 1:3-as töltés állékonysági grafikonja



8. ábra: a kövér agyag talajú, 1:3-as töltés állékonysági grafikonja

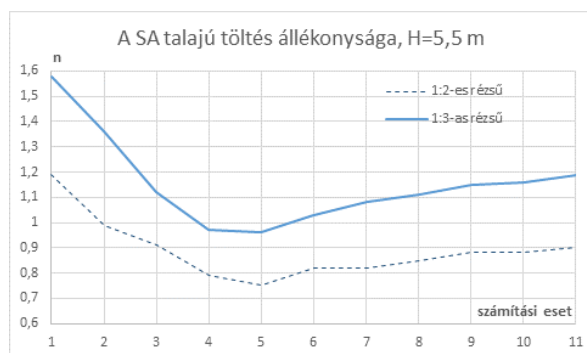
A grafikon vonalainak átlagos távolsága sovány agyagnál $D_n = 0,03$, míg kövér agyagnál csupán $D_n = 0,01$.

A vizsgált esetek mindegyikénél dokumentálásra került a kritikus csúszólap alsó kimetsződésének helye is (lsd. 1. sz. melléklet).

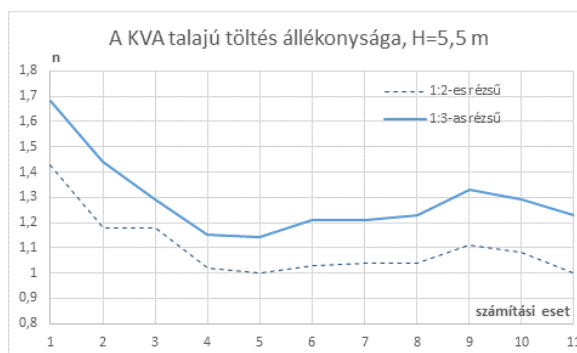
A vizsgált esetekből az a következtetés vonható le, hogy a megtámasztás nélküli rézsú kritikus csúszólapja a töltéslábtól $1,0 \div 5,0$ m-re metszi a mentett oldali vízszintes térszint, ami azt jelenti, hogy ha a megtámasztó bordák töltéslábtól mért hossza cca. $6,0$ m, akkor a bordák $4 \div 5,0$ m magas töltések esetében nagy biztonsággal lefedik a csúszólap alját.

5.2. Az 1:2-es rézsűre elvégzett számítások eredményei

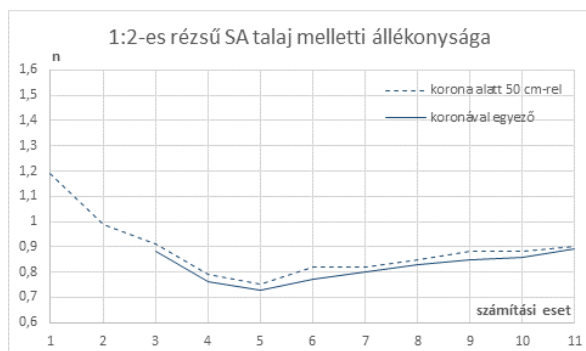
A meredekebb rézsűjű töltésre elvégzett számítások tendenciájukat tekintve hasonló eredményeket szolgáltatottak, mint az 1:3-as rézsűnél, azzal a különbséggel, hogy alacsonyabb biztonságot adódtak.



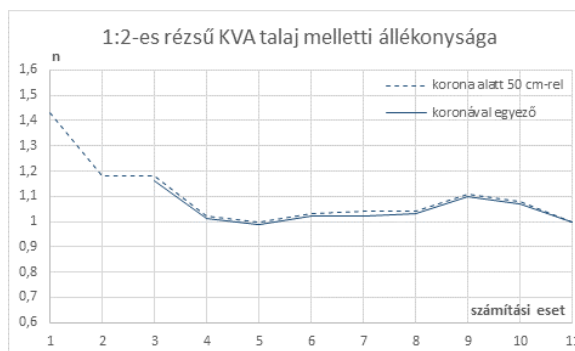
9. ábra: a sovány agyag talajú, töltés összehasonlító grafikonja, $H_{\text{viz}} = 5,5$ m



10. ábra: a kövér agyag talajú, töltés összehasonlító grafikonja, $H_{\text{viz}} = 5,5$ m



11. ábra: a sovány agyag talajú, 1:2-es töltés állékonysági grafikonja, $H_{\text{víz}}=6,0$ m



12. ábra: a kövér agyag talajú, 1:2-es töltés állékonysági grafikonja, $H_{\text{víz}}=6,0$ m

A bordás megtámasztások hatásának vizsgálati eredményei hasonló tendenciákat mutatnak, mint az 1:3-as rézsűnél. Sovány agyagú töltések esetében a rézsűn végigfuttatott terhelés (borda) minden esetben állékonyságjavulást okozott.

Kövér agyag talajú töltések esetében közömbös vagy állékonyságcsökkentő hatással járt a mentett oldali rézsű megterhelése.

Az 1:3-as rézsűre kapott számítási eredményekkel összehasonlítva megállapítható, hogy a állékonyságváltozások mértéke talajtól és terhelési esettől függetlenül a meredekebb, 1:2-es rézsű esetében szerényebb mértékű, más szóval a meredekebb rézsű kevésbé reagál a mentett oldali terhelésekre.

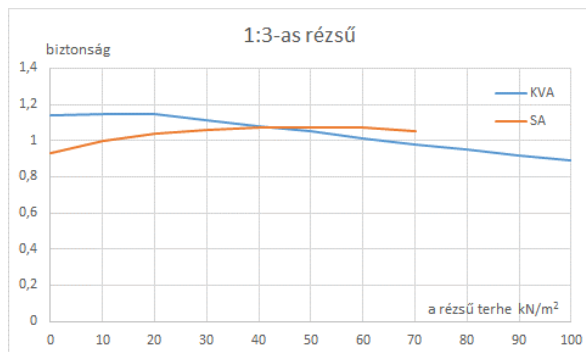
Rézsűhajlás Talaj Hvíz=	1:2			
	SA		KVA	
	5,5 m	6,0m	5,5 m	6,0m
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel	0,75	0,73	1	0,99
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel, 1,0m magas bordás leterheléssel	0,82	0,77	1,03	1,02
az 1,0 m-es bordából 0,5 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	0,82	0,8	1,04	1,02
az 1,0 m-es bordából 1,0 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	0,85	0,83	1,04	1,03
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel, 2,0m magas bordás leterheléssel	0,88	0,85	1,11	1,1
a 2,0 m-es bordából 0,5 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	0,88	0,86	1,08	1,07
a 2,0 m-es bordából 2,0 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	0,9	0,89	1	1

4. táblázat: bordás megtámasztások modellezési eredményei, 1:2-es rézsű

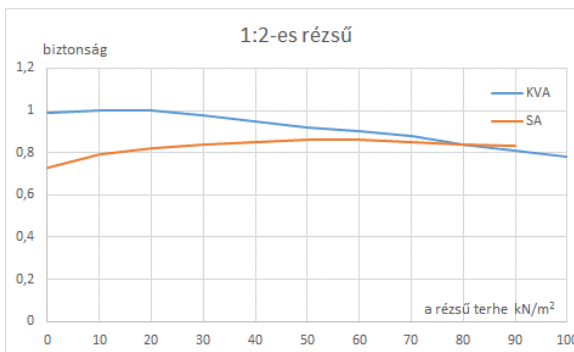
5.3. A mentett oldali rézsű teljes hosszban való leterhelésének részletesebb hatásvizsgálata

A vizsgálandó kérdés nem más, mint az, hogy amennyiben a töltés terhelése mértékadó állapotban van (azaz: töltéskoronával egyező árvízszint, telített talaj, visszaduzzasztott keresztzivárgás és védelmi anyagok nagy teherautós/kamionos szállítása a koronán), akkor

adott mértékű terhet felvéve, milyen hatással bír a rézsún végigfuttatott borda? Az egyszerűség kedvéért a vízszintes borda nélkül történtek a futtatások. A terhelések 0-100 kN/m² között, 10,0 kN/m² lépcsőkben lettek felvéve. A számítások 1:3 és 1:2-es rézsúre, KVA és SA talajokra kerültek elvégzésre. A részletes eredménykort a 3. sz. melléklet, tartalmazza.



13. ábra: a leterhelt rézsű biztonsága, 1:3-as rézsű, $H_{\text{víz}}=6,0$ m



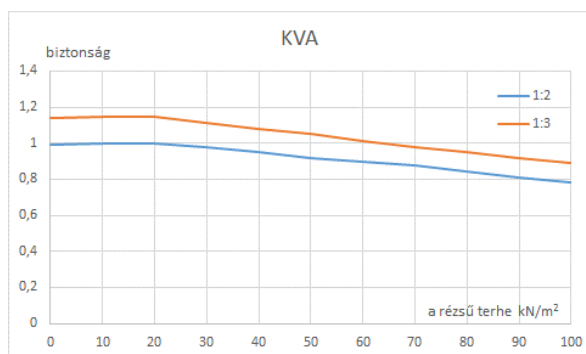
14. ábra: a leterhelt rézsű biztonsága, 1:2-es rézsű, $H_{\text{víz}}=6,0$ m

Mindegyik vizsgált esetre igaz, hogy a rézsű leterhelése egy bizonyos határig szigorúan véve erősíti a töltést, majd szélsőértékét elérve a terhelés növekedésével csökkenni kezd az állékonyság (ld. 13. és 14. ábra).

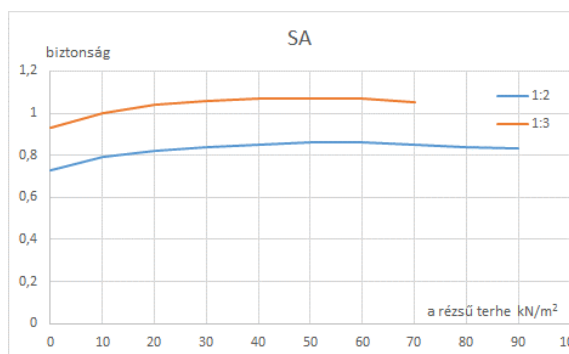
A „szigorúan véve” kifejezés azt takarja, hogy a KVA talajú töltés esetében a $p=0$ és a $p=20$ kN/m² terhelés között mindössze $D_n=0,01$ mértékű állékonyságnövekedés következik be, majd a további terhelés növekedés következtében monoton csökkenés mutatkozik az állékonysági biztonság terén, vagyis kövér agyag talaj esetében gyakorlatilag nem lehet beszélni a leterhelés pozitív hatásáról, hiszen a kimutatott érték a kerekítési hiba kategóriába tartozik. Az 1:2-es rézsű esetében szintén igaz, hogy gyakorlatilag nincs pozitív hozadéka a leterhelésnek. A szigorúan vett állékonysági maximum ekkor is – az 1:3-as rézsűre kapott eredményekkel egybevágóan – a $p=10\div 20$ kN/m² tartományt fedi le, a $p=20$ kN/m² terheléshez viszonyított növekmény szintén mindössze $D_n=0,01$ mértékű.

Sovány agyag talajú töltésnél már más a helyzet. Az 1:3-as rézsűnél a $p=40\div 60$ kN/m² tartományban a két tizedesre kerekített értékeket tekintve konstans a biztonság maximuma, majd elkezd csökkenni. A $p=0$ és $p=60$ kN/m² terhelés közötti biztonsági növekmény nem túl jelentős, $D_n=0,14$ (+15%).

Az 1:2-es rézsű esetében a szélsőértéket illetően mindössze annyi változás tapasztalható, hogy annak helye a $p=50\div 60$ kN/m² között van. A null terhelés és a szélsőérték biztonsági tényezője közötti eltérés $D_n=0,13$ (+18%).



15. ábra: a leterhelt rézsű biztonsága, 1:3-as



16. ábra: a leterhelt rézsű biztonsága, 1:2-es

részű, $H_{\text{víz}}=6,0$ m

részű, $H_{\text{víz}}=6,0$ m

A 15. és 16. ábrák azt szemléltetik, hogy adott anyagú, méretű és terhelési elrendezésű töltés esetében –eltérő rézsűhajlások mellett- hogyan változnak az állékonyságok.

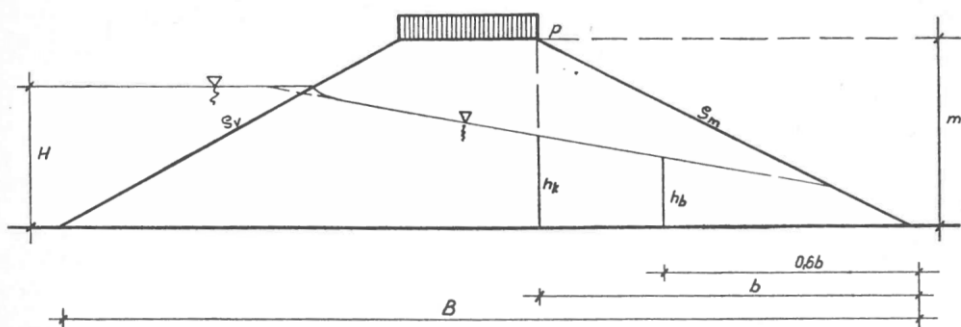
A számítási eredmények szerint:

- az állékonysági tényező-részű teher grafikonok vonalai közel párhuzamosak;
- az állékonyság szélsőértékének helye, tartománya nem a részűtől, hanem a talajtól függ;
- a kevésbé kötött talajú töltés esetében a rézsűhajlás csökkenése nagyobb mértékű állékonyságsökkenéssel jár, mint a kötöttebb talajnál;
- a kevésbé kötött talajú töltés egy viszonylag nagy terhelésig –rézsűhajlástól függetlenül- pozitívan reagál a leterhelésre, állékonysága növekszik;

6. Összehasonlító számítások

A szoftveres állékonyságszámítás általános hozzáférhetőségét megelőzően csupán jóval egyszerűbb, „kockás papíron is elvégezhető” számítási eljárások álltak rendelkezésre.

A vízügyi szakmában az MI-10-422-85 műszaki irányelv szerinti számítási rendszer használata szokásos. Az irányelv számos, kifejezetten vízügyi vonatkozású műszaki problémára ad választ, ugyanakkor kényszerű elhanyagolásai miatt több ponton támadható. Az alábbiakban bemutatásra kerül néhány, a fentiekben figyelembe vett terhelési esetre az MI-10-422-85 szerint elvégzett számítás eredménye. Az eredmények összehasonlítása révén képet lehet nyerni arról, hogy milyen mértékű és értelmű eltérés van az erősen leegyszerűsített és az egzakthoz jóval közelebb álló számítási rendszer alkalmazása révén adódó állékonysági biztonságok között.



$$n_R = \frac{0,5b \left[(0,6m_T \gamma_T - h_b \gamma_{\text{víz}}) \operatorname{tg} \varphi + C \right] + 2m_T C_T \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\varphi_T}{2} \right)}{\left(\frac{m_T^2}{2} \gamma_a + \rho \right) \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi_T}{2} \right) + \frac{h_k^2 \gamma_{\text{víz}}}{2}}$$

A számítást kétszer kell elvégezni, φ és c érték helyébe φ_a , C_a illetve φ_T , C_T helyettesítendő, s a két eredmény közül a kisebbet kell figyelembe venni.

17. ábra: az MI-10-422 szerinti eljárás

A két számítási metódus többek közt abban is különbözik egymástól, hogy amíg a bordás leterhelést a Bishop módszer pusztán (a töltés hossz-tengelye mentén végtelen kiterjedésűnek tekintett) megoszló erőként, addig az MI vízszintes erőként megnyilvánuló súrlódó tömeg formájában veszi tekintetbe. Emiatt a Bishop módszernél csak annyiban érdekes a borda hossza, hogy teljes hatékonyságához legalább a megtámasztás nélküli esetre adódott kritikus

csúszólap terepi kimetsződéséig kell terjednie. Az MI-nél már korántsem közömbös sem a borda szélessége, sem a borda hossza, hiszen a súrlódó erőt a súrlódó tömeg súlyereje eredményezi. A Bishop módszer 1,0 fm széles földtömeg egyensúlyát vizsgálja, míg az MI-vel tulajdonképpen tetszőleges szélesség vizsgálható.

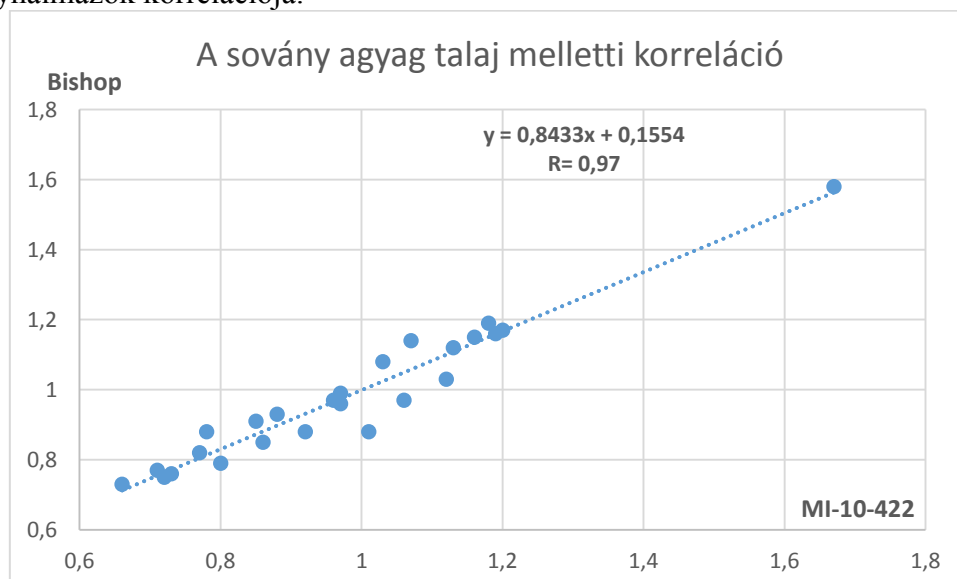
Mivel az MI szerinti számításoknál a borda súrlódó tömegként kerül modellezésre, ezért szükség van a homokzsák-homokzsák, illetve a homokzsák-nedves gyp közötti súrlódási együtthatóra. Konkrét értéket nem sikerült fellelni, ezért mérnöki becslésként a –talán- némi biztonságot is magában hordozó $n=0,2$ súrlódási tényező felvételével készültek az állékonyságvizsgálatok.

Az MI és a pontosabb módszert alkalmazó GEO5 szerinti számítási eredmények egymás mellé rendezett formában a 2. számú mellékletben található.

Minden adatpárhoz megadásra került a pontosabb eredményhez képest adódott eltérés. A pozitív eltérés azt jelenti, hogy az MI nagyobb, a negatív pedig azt, hogy kisebb biztonságot szolgáltatott, mint a GEO5.

Sovány agyag (azaz jelentős belső súrlódással és mérsékelt kohézióval bíró) talajkörnyezetben viszonylag jól egyeztek az eredmények, illetve a nagyobb eltérések zöme a biztonság javára történt, azaz az MI szerinti számítás általában alacsonyabb biztonságot mutatott ki. Az eltérések abszolút értéke 0,8 és 14,8% közötti, az abszolút értékek átlaga 5,1%, ami messze alatta marad a talajfizikai paraméterek becslési bizonytalanságának.

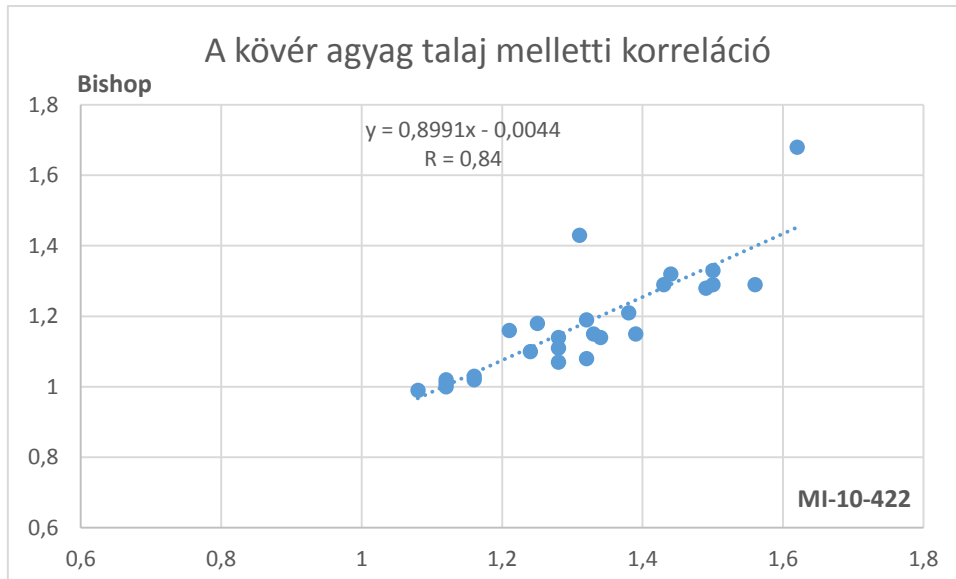
A 26 vizsgált állékonysági eset kapcsán vizsgálatra került a két számítás szerinti eredményhalmazok korrelációja.



18. ábra: MI-10-422 - Bishop módszer korrelációja sovány agyag töltésre

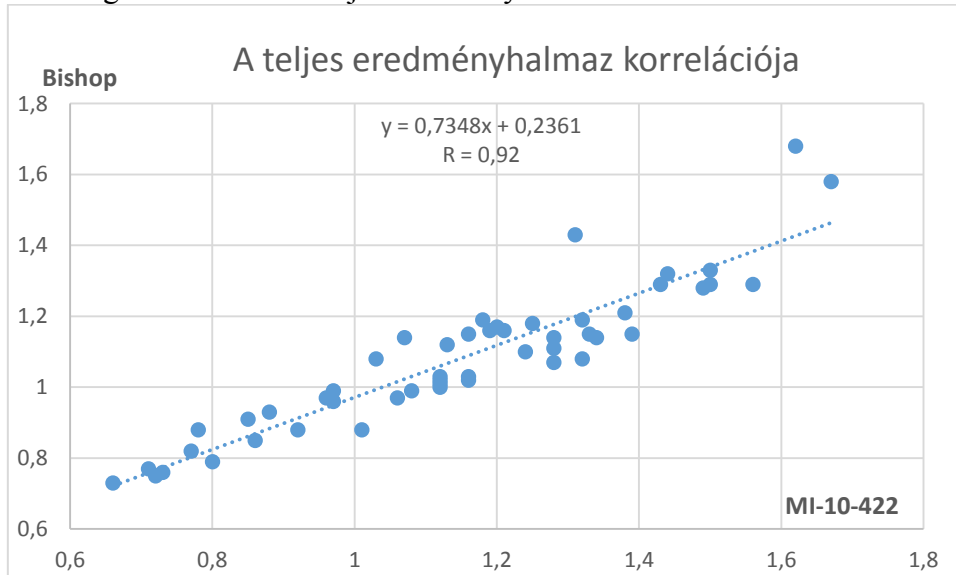
Kövér agyag (azaz jelentős kohézióval és mérsékelt belső súrlódással bíró) talajkörnyezetben már viszonylag nagy különbségek mutatkoztak a két módszer által szolgáltatott eredmények között. Ebben az esetben már kevésbé jól egyeztek az eredmények, illetve az eltérések szinte kivétel nélkül a biztonság kárára adódtak, azaz az MI szerinti számítás általában magasabb biztonságot mutatott ki. Az eltérések abszolút értéke 3,6 és 22,2% közötti, az abszolút értékek átlaga 13%, ami ugyan magas érték, ám még mindig alatta marad a talajfizikai paraméterek becslési bizonytalanságának.

A 26 vizsgált állékonysági eset kapcsán most is vizsgálatra került a két számítás szerinti eredményhalmazok korrelációja.



19. ábra: MI-10-422 - Bishop módszer korrelációja kövér agyag töltésre

A korreláció vizsgálat elkészült a teljes eredményhalmazra is.



20. ábra: MI-10-422 - Bishop módszer korrelációja a teljes adathalmazra

A vizsgálatok eredményeként kijelenthető, hogy a két számítás szerinti eredmények erősen korreláltak. Ha bárki a hagyományosnak tekinthető MI-10-422 szerinti számítások mellett dönt, a grafikonokon feltüntetett összefüggések felhasználásával javíthatja a kapott eredményt.

Azt mindenképpen meg kell jegyezni, hogy bár a két számítás többé-kevésbé eltérő eredményt szolgáltat, de az eltérések nem olyan mértékűek, hogy meghaladnák a talajmechanikai paraméterek becslésének hibáját vagy, hogy karakteresen különböző döntési helyzetet alapoznának meg. Mind ezek tükrében a korrelációanalízis inkább mérnöki játék a számokkal, inkább csak a természetes emberi kíváncsiság egyféle megnyilvánulása.

7. Összefoglalás

A rézsúállékonyság megítélése sarkalatos kérdésként merül fel a földművek ellenőrzése, tervezése során. A kritikus csúszólap kiválasztása és annak állékonysága megítélése rendkívül

nagy számítási igénnyel jár. Napjainkban több szoftver is forgalomban van, melyek rendkívül hatékony támogatást nyújtanak a felhasználóknak.

A számítások eredményeinek megbízhatósága nagyban függ az alapadatok megbízhatóságától és a helyes terhelési viszonyok felvételétől. Árvízvédelmi töltések esetében mindenkor a talajok telített állapotát kell feltételezni, amiből következik, hogy a szilárdsági paramétereket is a telített állapothoz rendelt értékekkel kell számításba vonni.

A talajmechanikai szakvélemények általában a feltárt állapotú mintára vonatkozó paraméterek becsült értékeit közlik. Emiatt különleges figyelmet kell fordítani az alapadatok előzetes vizsgálatára, adott esetben az állékonyságvizsgálatot végző személyre hárul a telített állapothoz tartozó alapadathalmaz előállítás, annak minden felelősségével.

A vízügyi ágazatban a GEO5 programcsomag rézsúállékonyság modulja került beszerzésre. A GEO5 viszonylag egyszerűen használható, rendkívül gyors, a legtöbb problémát kezelni képes, számos szabványt és számítási metódust ismerő és tekintetbe venni tudó szoftver.

A GEO szoftver segítségével, hús terhelési eset felvételével sovány, illetve kövér agyag talajú, 1:3, illetve 1:2 hajlású rézsúval kialakított homogén töltések állékonyságvizsgálata valósult meg.

A modellezett töltés 6,0 m magas és 6,0 m koronaszélességű, szimmetrikus geometriájú volt. A számítások a Bishop eljárás felhasználásával kerültek végrehajtásra.

A számítások alapján levonható főbb következtetések:

- egy nem végtelenen laza, terheletlen töltés 1:3-as rézsú mellett telített állapotban is kifogástalan állékonysággal bír;
- amennyiben jelentős terhet (pl. rakott kamion) kap a töltés, ráadásul úgy, hogy mindez szélsőséges teherállást valósít meg, akkor karakteres állékonyságcsökkenés mutatható ki;
- az árvíz hatására létrejövő keresztzivargás megjelenése még az előzőnél is karakteresebb állékonyságcsökkenést eredményez;
- érdemi biztonságnövekedéshez az adott töltés és vízterhelés mérettartományban legalább 2,0 m magas bordás megtámasztás kell;
- az adott töltés mérettartományban a bordák a töltéslábtól minimum 6,0 m távolsáig épüljenek meg;
- az adott töltés és vízterhelés mérettartományban 0,5 m vízterhelés növekmény hatása elenyésző;
- az 1:3-as és 1:2-es rézsújú szimmetrikus töltésekre, azonos terhelésekre vonatkozóan kapott állékonysági mutatók grafikonjai közel párhuzamos futásúak;
- a mentett oldali rézsún végig futtatott borda, mint többletterhelés:
 - jelentős belső súrlódással bíró talajú töltés esetében korlátozott keretek között állékonyságnövekedést;
 - mérsékelt belső súrlódással bíró talajú töltés esetében állékonyságcsökkenést okoz.
- a mentett oldali rézsún végig futtatott borda, mint többletterhelés esetleg kimutatható állékonyságnövelő hatása a teherintenzitás függvényében szélsőértékkel bír, vagyis egy maximumot elérve a terhelés további növelésével a szélsőértékhez képest egyre csökken a rézsúállékonyság;

- az állékonyság szélsőértékének helye, tartománya nem a rézsűtől, hanem a talajtól függ.

Mivel a számítógépi munkavégzés körülményei és lehetőségei nem minden esetben adóttak, emellett a napi gyakorlatban még ismert a korábbi, MI-10-422-85 műszaki irányelv, összehasonlító vizsgálatok készültek a műszaki irányelv használhatóságának értékelése céljából. A Bishop módszert quasi pontos eljárásnak lehet tekinteni, bár az is tartalmaz néhány egyszerűsítő elhanyagolást.

Az ugyanazon számítási esetekre vonatkozóan végrehajtott „hagyományos” számítással kapott és a Bishop módszer szerinti eredmények felhasználásával korreláció analízis történt, melynek eredményei az alábbiak:

- sovány agyag (azaz jelentős belső súrlódással és mérsékelt kohézióval bíró) talajkörnyezetben viszonylag jól egyeztek az eredmények (a korrelációs tényező $R=0,97$), illetve a nagyobb eltérések zöme a biztonság javára történt, azaz az MI szerinti számítás általában alacsonyabb biztonságot mutatott ki;
- az eltérések abszolút értékének átlaga 5,1%, ami messze alatta marad a talajfizikai paraméterek becslési bizonytalanságának;
- kövér agyag (azaz jelentős kohézióval és mérsékelt belső súrlódással bíró) talajkörnyezetben már viszonylag nagy különbségek mutatkoztak a két módszer által szolgáltatott eredmények között, de még mindig erősen korreláltak (a korrelációs tényező $R=0,84$);
- az eltérések abszolút értékének átlaga 13%, ami ugyan magas érték, ám még mindig alatta marad a talajfizikai paraméterek becslési bizonytalanságának;
- a teljes adathalmaz (a sovány, és a kövér agyagra kapott eredmények együttese) korrelációs tényezője $R=0,92$;
- a kapott regressziós összefüggések felhasználásával javíthatók az MI-10-422 szerint kapott eredmények. Ugyanakkor az is igaz, hogy a két módszer által szolgáltatott rézsűállékonysági mutatók közötti eltérés nem jelentős mértékű, nem alapoz meg eltérő biztonsági megítélést;
- az MI-10-422 irányelv ugyan számos szempontból bírálható, ám mégiscsak alkalmas a földművek tervezésére, ellenőrzésére. Egyszerűsége folytán akár „kockás papíron” is elvégezhető számítási rendszert ír le.

Gyula, 2018.06.01.

Kisházi Péter Konrád
KÖVÍZIG

Mellékletek

1. számú melléklet

1.1 Az 1:3-as rézsűjű töltés állékonysága SA talajkörnyezetben

1.1.1 Terhelő vízszint a töltéskorona alatt 50 cm-rel

vizsgált eset	a csúszólap aljának helye	biztonsági tényező
szivárgás és jármű nélkül	talpponttól 60 cm-rel kijebb	1,58
szivárgás nélkül, járművel	talpponti	1,36
szivárgással, jármű nélkül	talpponttól 2,0m-rel kijebb	1,12
szivárgással, járművel	talpponttól 1,4m-rel kijebb	0,97
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel	talpponttól 0,35m-rel kijebb	0,96
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel, 1,0m magas bordás leterheléssel	rézsűn	1,03
az 1,0 m-es bordából 0,5 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	talpponti	1,08
az 1,0 m-es bordából 1,0 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	talpponti	1,11
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel, 2,0m magas bordás leterheléssel	rézsűn	1,15
a 2,0 m-es bordából 0,5 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	talpponti	1,16
a 2,0 m-es bordából 2,0 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	talpponti	1,19

1.1.2 Terhelő vízszint a töltéskoronával egyezően

vizsgált eset	a csúszólap aljának helye	biztonsági tényező
szivárgással, jármű nélkül	talpponttól 1,6 m-rel kijebb	1,08
szivárgással, járművel	talpponttól 1,8 m-rel kijebb	0,97
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel	talpponti	0,93
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel, 1,0m magas bordás leterheléssel	rézsűn	0,99
az 1,0 m-es bordából 0,5 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	talpponti	1,06
az 1,0 m-es bordából 1,0 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	talpponti	1,09
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel, 2,0m magas, bordás leterheléssel	rézsűn	1,09
a 2,0 m-es bordából 0,5 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	rézsűn	1,14

vizsgált eset	a csúszólap aljának helye	biztonsági tényező
a 2,0 m-es bordából 2,0 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	talpponti	1,17

1.2 Az 1:3-as rézsűjú töltés állékonysága KVA talajkörnyezetben

1.2.1 Terhelő vízszint a töltéskorona alatt 50 cm-rel

vizsgált eset	a csúszólap aljának helye	biztonsági tényező
szivárgás és jármű nélkül	talpponttól 2,2 m-rel kijebb	1,68
szivárgás nélkül, járművel	talpponttól 2,2 m-rel kijebb	1,44
szivárgással, jármű nélkül	talpponttól 4,4 m-rel kijebb	1,29
szivárgással, járművel	talpponttól 0,75 m-rel kijebb	1,15
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel	talpponttól 2,4 m-rel kijebb	1,14
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel, 1,0m magas bordás leterheléssel	talppont	1,21
az 1,0 m-es bordából 0,5 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	talpponti	1,21
az 1,0 m-es bordából 1,0 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	talpponti	1,23
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel, 2,0m magas bordás leterheléssel	talppont	1,33
a 2,0 m-es bordából 0,5 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	talpponti	1,29
a 2,0 m-es bordából 2,0 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	talpponttól 0,6 m-rel kijebb	1,23

1.2.2 Terhelő vízszint a töltéskoronával egyezően

vizsgált eset	a csúszólap aljának helye	biztonsági tényező
szivárgással, jármű nélkül	talpponttól 5,0 m-rel kijebb	1,29
szivárgással, járművel	talpponttól 3,0 m-rel kijebb	1,15
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel	talpponttól 2,0 m-rel kijebb	1,14
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel, 1,0m magas bordás leterheléssel	talpponti	1,19
az 1,0 m-es bordából 0,5 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	talpponti	1,20
az 1,0 m-es bordából 1,0 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	talpponttól 1,0 m-rel kijebb	1,21
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel, 2,0m magas, bordás leterheléssel	rézsűn (~talpponti)	1,32
a 2,0 m-es bordából 0,5 m vastagon végigfuttatott	talpponti	1,28

vizsgált eset	a csúszólap aljának helye	biztonsági tényező
borda melletti biztonság		
a 2,0 m-es bordából 2,0 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	talpponti	1,20

1.3 Az 1:2-es rézsűjú töltés állékonysága SA talajkörnyezetben

1.3.1 Terhelő vízszint a töltéskorona alatt 50 cm-rel

vizsgált eset	a csúszólap aljának helye	biztonsági tényező
szivárgás és jármű nélkül	talpponti	1,19
szivárgás nélkül, járművel	talpponti	0,99
szivárgással, jármű nélkül	talpponttól 1,5 m-rel kijebb	0,91
szivárgással, járművel	talpponttól 1,5 m-rel kijebb	0,79
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel	talpponttól 1,3 m-rel kijebb	0,75
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel, 1,0m magas bordás leterheléssel	talpponti	0,82
az 1,0 m-es bordából 0,5 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	talpponti	0,82
az 1,0 m-es bordából 1,0 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	talpponti	0,85
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel, 2,0m magas bordás leterheléssel	rézsűn	0,88
a 2,0 m-es bordából 0,5 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	talpponti	0,88
a 2,0 m-es bordából 2,0 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	talpponti	0,90

1.3.2 Terhelő vízszint a töltéskoronával egyezően

vizsgált eset	a csúszólap aljának helye	biztonsági tényező
szivárgással, jármű nélkül	talpponttól 1,2 m-rel kijebb	0,88
szivárgással, járművel	talpponttól 1,0 m-rel kijebb	0,76
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel	talpponttól 1,2 m-rel kijebb	0,73
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel, 1,0m magas bordás leterheléssel	talpponti	0,77
az 1,0 m-es bordából 0,5 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	talpponti	0,80
az 1,0 m-es bordából 1,0 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	talpponti	0,83

vizsgált eset	a csúszólap aljának helye	biztonsági tényező
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel, 2,0m magas, bordás leterheléssel	rézsűn	0,85
a 2,0 m-es bordából 0,5 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	talpponti	0,86
a 2,0 m-es bordából 2,0 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	talpponti	0,89

1.4 Az 1:2-es rézsűjű töltés állékonysága KVA talajkörnyezetben

1.4.1 Terhelő vízszint a töltéskorona alatt 50 cm-rel

vizsgált eset	a csúszólap aljának helye	biztonsági tényező
szivárgás és jármű nélkül	talpponttól 1,5 m-rel kijebb	1,43
szivárgás nélkül, járművel	talpponttól 0,4 m-rel kijebb	1,18
szivárgással, jármű nélkül	talpponttól 3,5 m-rel kijebb	1,18
szivárgással, járművel	talpponttól 1,9 m-rel kijebb	1,02
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel	talpponttól 1,8 m-rel kijebb	1,00
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel, 1,0m magas bordás leterheléssel	talpponti	1,03
az 1,0 m-es bordából 0,5 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	talpponti	1,04
az 1,0 m-es bordából 1,0 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	talpponti	1,04
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel, 2,0m magas bordás leterheléssel	talpponti	1,11
a 2,0 m-es bordából 0,5 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	talpponti	1,08
a 2,0 m-es bordából 2,0 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	talpponttól 0,6 m-rel kijebb	1,00

1.4.2 Terhelő vízszint a töltéskoronával egyezően

vizsgált eset	a csúszólap aljának helye	biztonsági tényező
szivárgással, jármű nélkül	talpponttól 5,0 m-rel kijebb	1,16
szivárgással, járművel	talpponttól 2,0 m-rel kijebb	1,01
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel	talpponttól 2,0 m-rel kijebb	0,99
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel, 1,0m magas bordás leterheléssel	talpponti	1,02
az 1,0 m-es bordából 0,5 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	talpponti	1,02
az 1,0 m-es bordából 1,0 m vastagon	talpponti	1,03

vizsgált eset	a csúszólap aljának helye	biztonsági tényező
végigfuttatott borda melletti biztonság		
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel, 2,0m magas, bordás leterheléssel	talpponti	1,10
a 2,0 m-es bordából 0,5 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	talpponti	1,07
a 2,0 m-es bordából 2,0 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	talpponti	1,00

2. számú melléklet

Összehasonlító számítások

2.1 Számítások SA talajkörnyezetben

vizsgált eset	biztonsági tényező		eltérés [%]
	MI-10-422-85	GEO5	
1:3-as rézsú, terhelő vízszint a töltéskorona alatt 50 cm-rel			
szivárgás és jármű nélkül	1,67	1,58	5,7
szivárgással, jármű nélkül	1,13	1,12	0,9
szivárgással, járművel (az MI-nél megoszló teherként véve)	1,06	0,97	9,3
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel	0,97	0,96	1,0
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel, 1,0m magas bordás leterheléssel	1,12	1,03	8,7
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel, 2,0m magas bordás leterheléssel	1,16	1,15	0,9
a 2,0 m-es bordából 0,5 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	1,19	1,16	2,6
1:3-as rézsú, terhelő vízszint a töltéskoronával egyezően			
szivárgással, jármű nélkül	1,03	1,08	-4,6
szivárgással, járművel (az MI-nél megoszló teherként véve)	0,96	0,97	-1,0
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel	0,88	0,93	-5,4
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel, 1,0m magas bordás leterheléssel	0,97	0,99	-2,0
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel, 2,0m magas bordás leterheléssel	1,07	1,14	-6,1
a 2,0 m-es bordából 0,5 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	1,20	1,17	2,6
1:2-es rézsú, terhelő vízszint a töltéskorona alatt 50 cm-rel			
szivárgás és jármű nélkül	1,18	1,19	-0,8
szivárgással, jármű nélkül	0,85	0,91	-6,6
szivárgással, járművel (az MI-nél megoszló teherként véve)	0,80	0,79	1,3
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel	0,72	0,75	-4,0
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel, 1,0m magas bordás leterheléssel	0,77	0,82	-6,1
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel, 2,0m magas bordás leterheléssel	0,92	0,88	4,5
a 2,0 m-es bordából 0,5 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	1,01	0,88	14,8
1:2-es rézsú, terhelő vízszint a töltéskoronával egyezően			
szivárgással, jármű nélkül	0,78	0,88	-11,4
szivárgással, járművel (az MI-nél megoszló teherként véve)	0,73	0,76	-3,9
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel	0,66	0,73	-9,6
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással,	0,71	0,77	-7,8

vizsgált eset	biztonsági tényező		eltérés [%]
	MI-10-422-85	GEO5	
járművel, 1,0m magas bordás leterheléssel			
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel, 2,0m magas bordás leterheléssel	0,86	0,85	1,2
a 2,0 m-es bordából 0,5 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	0,95	0,86	10,5

2.2 Számítások KVA talajkörnyezetben

vizsgált eset	biztonsági tényező		eltérés [%]
	MI-10-422-85	GEO5	
1:3-as rézsű, terhelő vízszint a töltéskorona alatt 50 cm-rel			
szivárgás és jármű nélkül	1,62	1,68	-3,6
szivárgással, jármű nélkül	1,50	1,29	16,3
szivárgással, járművel (az MI-nél megoszló teherként véve)	1,39	1,15	20,9
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel	1,34	1,14	17,5
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel, 1,0m magas bordás leterheléssel	1,38	1,21	14,0
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel, 2,0m magas bordás leterheléssel	1,50	1,33	12,8
a 2,0 m-es bordából 0,5 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	1,56	1,29	20,9
1:3-as rézsű, terhelő vízszint a töltéskoronával egyezően			
szivárgással, jármű nélkül	1,43	1,29	10,9
szivárgással, járművel (az MI-nél megoszló teherként véve)	1,33	1,15	15,7
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel	1,28	1,14	12,3
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel, 1,0m magas bordás leterheléssel	1,32	1,19	10,9
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel, 2,0m magas bordás leterheléssel	1,44	1,32	9,1
a 2,0 m-es bordából 0,5 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	1,49	1,28	16,4
1:2-es rézsű, terhelő vízszint a töltéskorona alatt 50 cm-rel			
szivárgás és jármű nélkül	1,31	1,43	-8,4
szivárgással, jármű nélkül	1,25	1,18	5,9
szivárgással, járművel (az MI-nél megoszló teherként véve)	1,16	1,02	13,7
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel	1,12	1,00	12,0
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel, 1,0m magas bordás leterheléssel	1,16	1,03	12,6
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel, 2,0m magas bordás leterheléssel	1,28	1,11	15,3
a 2,0 m-es bordából 0,5 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	1,32	1,08	22,2
1:2-es rézsű, terhelő vízszint a töltéskoronával egyezően			
szivárgással, jármű nélkül	1,21	1,16	4,3

vizsgált eset	biztonsági tényező		eltérés [%]
	MI-10-422-85	GEO5	
szivárgással, járművel (az MI-nél megoszló teherként véve)	1,12	1,01	10,9
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel	1,08	0,99	9,1
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel, 1,0m magas bordás leterheléssel	1,12	1,02	9,8
gyeptakaró által +1,0 m-rel visszaduzzasztott szivárgással, járművel, 2,0m magas bordás leterheléssel	1,24	1,10	12,7
a 2,0 m-es bordából 0,5 m vastagon végigfuttatott borda melletti biztonság	1,28	1,07	19,6

3. számú melléklet

A mentett oldali rézsű teljes hosszban való leterhelésének hatása

a rézsű terhe kN/m ²	1:3		1:2	
	KVA	SA	KVA	SA
0	1,14	0,93	0,99	0,73
10	1,15	1	1	0,79
20	1,15	1,04	1	0,82
30	1,11	1,06	0,98	0,84
40	1,08	1,07	0,95	0,85
50	1,05	1,07	0,92	0,86
60	1,01	1,07	0,9	0,86
70	0,98	1,05	0,88	0,85
80	0,95		0,84	0,84
90	0,92		0,81	0,83
100	0,89		0,78	