

Geoműanyagok

A környezetszennyeződés megakadályozása érdekében a szemétkerakókat környezetük-től hosszú távra el kell szigetelni. Ebben nagy szerepük van a műanyag geomembrá-noknak. Első alkalmazásuk óta kellően hosszú idő telt el, hogy várható élettartamukról és az üzemelés során bekövetkező sérüléseikről tapasztalatok álljanak a szakemberek rendelkezésére.

Tárgyszavak: geoműanyag; geomembrán; georács; polietilén; PET; szemétkerakó; talajéptmény; vizsgálati módszer; élettartam; matematikai modell.

Rövidítés: ELL – electrical leak location = elektromos lyukkereső.

Míg a műanyagok egy részétől, mindenekelőtt a csomagolóeszközöktől csak né-hány hetes vagy hónapos élettartamot várnak el, a földbe fektetett műanyagoknak – csöveknek, fóliáknak, georácsoknak – évtizedekig meg kell felelniük az elvárásoknak. A következőkben a szemétkerakókban képződő folyadék elszivárgását meggátolni hi-vatott polietilénfóliák és a földéptmények (gátak, rézsúk, vasúti pályák stb.) szilárdsá-gát növelő georácsok néhány tulajdonságát és várható élettartamát mutatjuk be.

Szemétkerakók geomembránjainak élettartama

Az utóbbi években a környezet védelmére és a hulladékok kezelésére hozott tör-vények előírják a hulladéklerakók kialakítását olyan módon, hogy az azokból szivárgó folyadék (csurgalék) vagy a keletkező gáz ne juthasson a talajba és különösen a talaj-vízbe. *A korszerű hulladéklerakókat ezért gondosan kibélelik. A legtöbbször többréte-gű bélésrendszer egyik rétege nagyon gyakran egy nagy sűrűségű polietilénből (PE-HD-ből) gyártott fólia, az ún. geomembrán.* Ez a fólia folyadékok számára áthatolha-tatlan, rajta keresztül a diffúzió is elhanyagolható. Záróképessége azonban csak addig áll fenn, amíg teljesen ép, azaz nem lyukad ki (pl. a fektetéskor), az erős mechanikai feszültségtől, agresszív vegyszerektől vagy az előregedés miatt.

Nagy-Britanniában egy kutatócsoport a brit Környezetvédelmi Hivatal közremű-ködésével felmérte, hogy milyen degradációs jelenségek léphetnek fel a polietilén geomembránokban, és hogy milyen gyakoriak a meghibásodások. A felmérések alap-ján becsléseket végeztek az ilyen fóliák közepes és hosszú időtartam alatt várható vi-selkedésére.

A szemétkerakókból származó csurgalék és a lerakott szemétkben lezajló bomlási folyamatok tanulmányozása alapján úgy tűnik, hogy egy lerakó több száz, esetleg több ezer év alatt kerül stabil állapotba, amikor már semmilyen módon nem jelent veszélyt a környezetre.

Egy geomembrán „szolgálati ideje” akkor jár le, amikor elveszíti azt a tulajdonságát, hogy hidraulikus gátként megvédje a környezetet a szemétkben lévő káros anyagoktól. Ez tekinthető tehát a geomembrán élettartamának. Az élettartamot számos tényező befolyásolja:

- a geomembránon lévő lyukak száma és mérete, ahol a csurgalék átjuthat,
- a fóliatípus (összetétel; egy- vagy többrétegű),
- ha a bélésrendszer ún. kompozit, és a fólia ásványi réteggel érintkezik, a határfelület minősége,
- a csurgalék forrása, összetétele, koncentrációja,
- a csurgalékot elvezető nyílás elhelyezése,
- a talajvíz érzékenysége, terhelhetősége.

A geomembránon megengedhető bizonyos számú hiba, folytonossági hiány. Hogy mennyi, az az alatta lévő talajvíz érzékenységétől függ. Ha a talajvíz pl. a környék ivóvízbázisa, már nagyon kevés, ha a talajvíz minősége kevésbé fontos, több lyuk esetén tekinthető a fólia elhasználatnak, azaz „kiszolgált”-nak.

Fizikai sérülések

A legtöbb szakadás a tároló építése közben, a fólia fektetésekor vagy a dréncsövek és a fedőréteg fektetésekor keletkezik. Az utóbbi időben ezért elektromos lyukkere-sővel (electrical leak location, ELL) ellenőrzik a fólia épségét. Ennek mobil változata csak a szemétkerakást megelőzően alkalmazható. Telepített változata bármikor képes ellenőrizni a fólia épségét, akár a szemétkerakó megtelése után is. Kevés adat van arról, hogy hány meghibásodást jeleztek eddig a telepített készülékek. Egy adat szerint a felfedezett hibák mindössze 2%-át észlelték a szemétkerakás megkezdése után. Egy másik, ilyen készülékeket kínáló cég szerint viszont telepített berendezései 17 helyen 800 ezer m² fóliát ellenőriznek, és 6 év alatt a hibák 42%-át a lerakó működése során jelezték. Egy hasonló cég telepített ELL berendezései Kelet-Európában, Belgiumban és Nagy-Britanniában 55 szemétkerakóban 106 ponton kb. 1 millió m²-t tartanak megfigyelés alatt. Ezek 7 év alatt, 1996–2003 között összesen 1460-szor jeleztek hibát; a kijelzések 74%-a az építkezés időszakára, 26%-a a használatbavétel utáni időszakra esett. A leggyakoribb hiba (78%) oka az volt, hogy a nehéz járművek mozgása miatt a talajban lévő éles kövek kiszúrták a fóliát. Egyetlen hiba sem keletkezett a fólia gyenge tartóssága miatt.

Egy 1995-ben épített nagy-britanniai szemétkerakóban ELL berendezések szerint a hibák 27%-a már kész, de még szemétk nélküli állapotban vagy a szemétkhordás megkezdésekor jelent meg. A felfedezett hibák közül mindössze kettőt nem tudtak kijavítani hozzáférhetetlenségük miatt. A hibák között volt tökéletlen hegesztésből származó tűszúrászerű lyuk és növények által okozott széles szakadás is. A szemétkhordás megkezdése utáni sérülésekhez hozzájárult, hogy azt a kelletténél korábban kezdték meg, a

gyakori ellenőrzés azonban lehetővé tette az azonnali kijavítást. A sérülések méretének fokozatos növekedését nem észlelték.

Az USA-ban gyakran alkalmaznak dupla bélésfóliát, és a két réteg között helyeznek el csurgalékérzékelőt. 10 éves időtartam alatt megfigyelték, hogy a csurgalék-képződés sebessége az idő folyamán csökken, ami arra is utal, hogy ez idő alatt a belső fólia sérülései nem nagyobbodtak.

A megfigyelésekből azt a következtetést vonták le, hogy az összes hiba mindössze 30–35%-a keletkezhet a használatbavétel után. Ha a bélést már több méter vastag szemétréteg fedi, újabb szakadások a fólián csak ritkán várhatók.

A fólia tartóssága

A műanyagokra jellemző az idő függvényében kialakuló degradáció, az ún. öregedés. *A talajba fektetett PE-HD fóliát leginkább veszélyeztető degradációs folyamat a termooxidáció.* Ennek meggátlására, ill. lassítására a fólia anyagába ún. antioxidánsokat kevernek, amelyek egyrészt a feldolgozás alatt, másrészt az alkalmazás időtartama alatt hivatottak meggátolni az oxidációs reakciókat.

A polietilének oxidatív degradációjának három fázisát szokták megkülönböztetni. Az első az antioxidáns koncentrációjának csökkenése fizikai veszteség (kioldódás, elpárolgás) és kémiai veszteség (reakciókban való részvétel) miatt. A veszteség következtében a második szakaszban megindul egy nagyon lassú oxidáció, amelynek még nincs érzékelhető hatása a polimer tulajdonságaiban (indukciós periódus). A harmadik szakaszban már nagyon kevés az antioxidáns, az oxidáció felgyorsul, a műanyag tulajdonságai megváltoznak (pl. törékennyé válik).

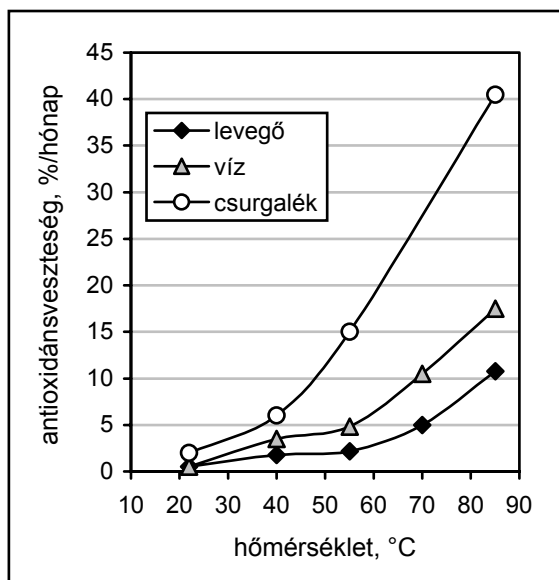
A PE-HD geofólia laboratóriumi körülmények között mért antioxidánsvesztésének sebessége függ a PE-HD típusától és a hozzáadott antioxidánsoktól; a fóliával érintkező közegtől (víz, levegő, talaj, csurgalék); a vizsgálat időtartamától, a környezet oxigénkoncentrációjától és hőmérsékletétől és az antioxidánsvesztés meghatározó folyamat aktiválási energiájától. A hőmérséklet és az érintkező közeg hatását az ASTM D3895 szabvány szerint mért indukciós periódus alapján az *1. ábra* érzékelteti.

A hosszú indukciós periódus nem feltétlenül jelent hosszú időtartamú termooxidatív stabilitást. Bizonyos antioxidánsok erősen növelik alacsony hőmérsékleten az indukciós periódust, de hatástalanok 150 °C közelében; és nem javítják a hosszú időtartamú termooxidatív stabilitást normál hőmérsékleten. A polietilén geomembránok vizsgálatakor ezért célszerű megmérni a kezdeti indukciós periódus mellett ugyanezt magasabb hőmérsékleten végzett öregítés után is.

Különböző kutatók vizsgálatai alapján az antioxidánsvesztés meghatározó folyamat aktiválási energiájából az Arrhenius egyenlet segítségével *megbecsülték azt az időtartamot, amely alatt az antioxidáns teljesen elfogy a szokásos összetételű geomembránból, és ezt az időt tekintették a fólia „tartósság”-ának.* A becslések eredményét az *1. táblázat* tartalmazza. Látható, hogy ezzel a módszerrel is kimutatható, hogy a folyamat erősen függ a hőmérséklettől.

A geomembránok valódi üzemi körülményei

1998-ban közzétett adatok szerint a szemétkerakó fenekén nem mértek 20 °C-nál magasabb hőmérsékletet, ha a csurgalék kifolyója nem volt 1 m-nél magasabban. Minél magasabba tették a kifolyót, annál magasabb volt a hőmérséklet a geomembrán szintjén; 5 m magas kifolyónyílás mellett már elérte a 60 °C-t.



1. ábra
A PE-HD geomembrán laboratóriumi módszerrel mért antioxidánsvesztésének sebessége különböző hőmérsékleten és különböző közegekben

1. táblázat-

PE-HD geomembránok becsült tartóssága laboratóriumi mérések alapján

Átlagos hőmérséklet, °C	Aktiválási energia, kJ/mol	Becsült tartósság, év
20	60	450–650
20	70	900–1300
35	60	140–200
35	70	220–320
35	80	370–530
50	60	46–66
50	70	64–91

Az USA-ban egy szemétkerakó „száraz” cellájában (ebbe nem öntöttek vagy cirkuláltak pótlólagosan folyadékot) és egy „nedves” cellában (bioreaktorban) folyamatosan mérték a geomembrán szintjén a hőmérsékletet. A „száraz” cellában az első 5,5 évben az átlagos hőmérséklet 20 °C volt, de utána hirtelen 30 °C-ra emelkedett, majd lassan tovább nőtt, 8 év alatt 37 °C-ra. A „nedves” cella alsó része 25 °C–28 °C-ról a

szeméthordás megkezdése után 3,5 év alatt 41–46 °C-ra melegedett, és a melegedés ezután sem állt meg.

Nagy-Britanniában 2000 októberében kezdtek egy bioreaktorként üzemeltetett szemétlerakót feltölteni. A geomembrán szintjén a kezdeti hőmérséklet 14–21 °C volt. 2003 májusában 24–30 °C-t, 2004 novemberében 29–37 °C-t mértek, és a kb. 0,4 °C/hónapos növekedés azóta sem látszik csökkenni. Az ilyen lerakók véghőmérsékletét 35–40 °C-ra becsülik, a „száraz” lerakóknál hosszú távon 20 °C körüli átlaghőmérsékletre számítanak, de erről nincsenek még valódi tapasztalatok.

Az EU hulladékkezelésre vonatkozó „direktívája” a lakossági szemét biodegradálható részarányát az 1995-ös szinthez képest 35%-kal kívánja csökkenteni. Ha ez megvalósul, csökkenni fog a szemétlerakók alján a hőmérséklet.

Az oxigén jelenléte feltétlenül szükséges az oxidációs reakciókhoz, de nem szükséges az antioxidáns veszteségéhez. Ha a geomembrán alsó része egy agyagrétegre simul rá, a két réteg között nagyon kicsi az oxigénkoncentráció, és ilyenkor az antioxidánsvesztés is lelassul. Ha a geomembrán felső részét is agyagréteg vagy ún. szintetikus agyag borítja, az sem az oxigént, sem a csurgalékot nem engedi a polietilénfólia közelébe. Ha a fólia homokon fekszik, az oxigén jobban hozzáférhet.

Feszültségrepedezés a geomembránban

A geomembránok ASTM D5397 szabvány szerint végzett feszültségrepedezési vizsgálat alapján felvett idő-feszültség görbéin három szakasz figyelhető meg; az első és második szakasz közötti töréspont a rugalmas törést, a második és harmadik szakasz között a kvázirideg törést jelzi.

Ha a geomembrán feszültség alatt van, és ezalatt oxidáció is bekövetkezik, a degradációs folyamatok sokkal összetettebbek, mint a laboratóriumokban végzett vizsgálatok alatt. Ha az antioxidánstartalmukat már elvesztett polietilénfóliák az oxidáció következtében rideggé válnak, a feszültségrepedezés könnyen okoz törést bennük. Ebben az esetben elvesztik funkciójukat, ami élettartamuk végét jelenti. Ha a környezetükben kevés az oxigén, és emiatt nem oxidálódnak, antioxidáns hiányában is fizikai gátat jelentenek a csurgalék számára, és ha fizikailag nem sérültek, eleget tudnak tenni feladatuknak.

A geomembrán sérülésének hat fokozata

A kutatók a szemétlerakók bélelésére alkalmazott PE-HD geomembránok sérülésének 6 szakaszát írták le. Ez az egyszerűsített modell természetesen nem képes tökéletesen visszatükrözni a valójában nagyon bonyolult folyamatokat és a különböző helyeken nagyon eltérő körülményeket. A hat szakasz a következő:

1. A fektetés, az alagcsövezés és a lefedés során kisebb-nagyobb lyukak keletkeznek a fóliában. ELL rendszer alkalmazásával ezek kiszűrhetők, kijavíthatók. Ilyenkor minimális hibákkal lehet az üzemeltetést megkezdeni.

2. A fektetésnél keletkezett (és ki nem javított) hibák mellett a szemét lerakásának megkezdésekor is keletkezhetnek fizikai sérülések, és a látens hibáknál is kialakulhatnak szakadások. ELL rendszer üzemeltetésekor ezek nagyobb része felfedezhető és közülük jó néhány kijavítható.
3. A feltöltött tárolóban az eddigi tapasztalatok szerint nem keletkeznek újabb sérülések a bélésben. Ez az állapot 10, esetleg 50 évig is fennállhat.
4. Ebben a szakaszban következik be az antioxidáns számottevő vesztesége és kezdődik a fólia oxidációja. A feszültség alatt álló fóliaterületeken megindulhat a feszültségrepedezés, amelynek mértéke a körülményektől függ.
5. Az oxidáció felgyorsul, a fólia törékennyé válik, a feszültségrepedezés fokozódik.
6. A geomembránban újabb sérülések képződése és a meglévő sérülések növekedése lassúvá válik. A szemétreteg alatt állandósul egy némileg sérült, némileg átteresztő, de bizonyos mértékben még zárófunkciót is ellátó réteg.

A 4. szakasz hosszát a fólia „tartóssága” határozza meg. Az 5. szakasz hossza az oxidáció mértékétől függ. Hosszát nem lehet előre megbecsülni, a találgatások 13–740 év között változnak. A 6. szakaszban a fólia legjobb esetben is egy részleges hidraulikus gátként működő réteggé válik. Hogy záróképesége kielégíti-e a követelményeket, az attól függ, hogy mennyire érzékeny a környezet.

Mivel az 5. és 6. szakaszban a fólia degradálódik, kockázatszámításban és tervezéskor a geomembrán élettartamának a 4. szakasz végét kell tekinteni.

Georácsok

Műanyag georácsokat támaszok, ellenfalak, rézsűk, áthidalások megerősítésére, földomlások megelőzésére; utak, vasúti pályák alépítményének megszilárdítására és még sokféle földépítmény stabilizálására alkalmaznak. Ezeknek *a rácsoknak az a feladata, hogy a földépítményre ható húzóerőket felvegyék, és azokat a földdel érintkezve súrlódás és más mechanizmusok révén leépítsék.* A földbe beágyazott georácsokra a rájuk nehezedő földréteg súlyán kívül ránehezedik a föld feletti építmény súlya is, de gyakran dinamikus terhelés is hat rájuk. A dinamikus terhelés lehet periódikus, átmeneti jellegű és impulzusszerű. Ilyen pl. a közlekedés okozta terhelés. Mérésekkel igazolták, hogy míg a közúti terhelés csak kis mélységbe hatol be, egy vonat áthaladása-kor a sebességtől és a felépítmény szerkezetétől függően a függőleges irányú feszültség csak kb. 5 m mélységben hal el. A georácsok ciklikus terhelésének hatását az talaj és a rács között kölcsönhatásra, az ún. lehorgonyzási erőre (Verankerungskraft) eddig csak empirikus megfigyelések alapján tudták megbecsülni vagy előre jelezni.

Németországban a **Clausthali Műszaki Egyetemen** vizsgálóberendezést építettek a georácsok dinamikus terhelésének tanulmányozására. A berendezés vizsgálókamrája 1,5 m hosszú, 0,6 m széles és 0,6 m magas. Ezt töltötték meg a „talajjal” (0–4 mm szemcseméretű kvarchomokkal vagy 2–12 mm átmérőjű kavicskeverékkel). Középen helyezték el a vizsgálandó rácsot. A vizsgálandó mintát vízszintes irányban hidraulikusan (max. 400 kN/m²-rel), függőleges irányban pneumatikusan (max. 300

kN/m²-rel) tudták terhelni szükség szerint sztatikusan és/vagy dinamikusan. A vizsgálatokban a 2. táblázatban bemutatott műanyag georácsokat, összehasonlításként pedig acélrácsot és sima acéllemez használtak. A vizsgálókamra alsó részén a függőleges irányú feszültség változását, a rácsok mentén nyúlásmérőkkel az elmozdulást és a rácsok megnyúlását mérték.

2. táblázat

A kísérletekben felhasznált műanyag georácsok jellemzői

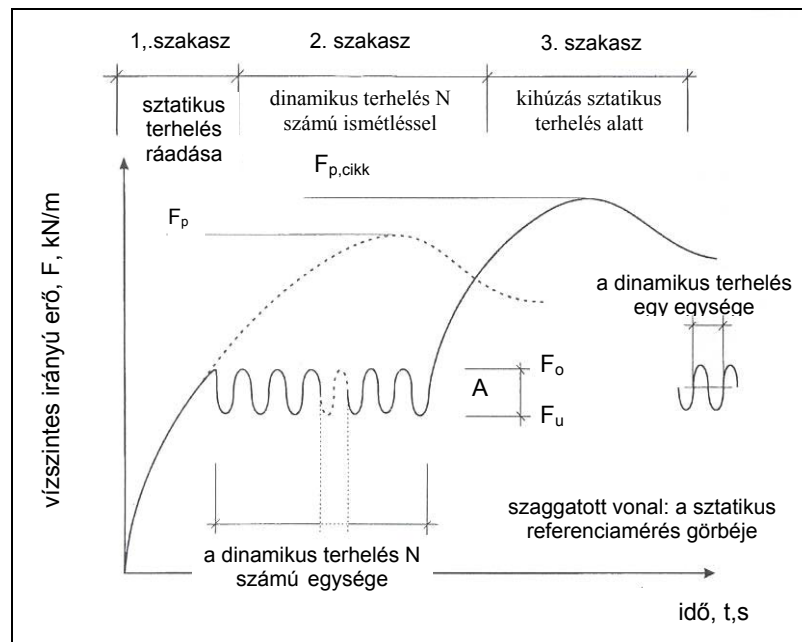
Jellemző	Egység	Szőtt georács, G1	Extrudált rács, G2	Fektetett rács, G3
Rácsnyílás gyártásirányban	mm	20	219	71
Rácsnyílás keresztirányban	mm	26	235	80
Legnagyobb húzóerő gyártásirányban	kN/m	110	136	120
Szakadási nyúlás	%	12,5	11,5	8
Alapanyag	–	PET	PE-HD	PET (átlátszó)

A vizsgálatokban a DIN EN 13738 szabvány elveihez tartották magukat. Az erő(idő)-elmozdulás görbéről leolvasták a rács maximális kihúzóerőhöz (F_p) tartozó elmozdulását (s_p). A sztatikus terheléssel végzett méréseket „referenciavizsgálat”-nak tekintették, ennek eredményeihez viszonyították a dinamikus mérések eredményeit. A dinamikus mérések előtt sztatikus terhelést adtak a mintára. A dinamikus mérésnek három szakasza volt. Az első szakaszban fokozatosan egy előre meghatározott F_0 vízszintes erővel terheltek a mintát. Ezután a 2. szakaszban dinamikus terhelést adtak a rendszerre, amely F_0 (felső érték) és F_u között váltakozott, és ezt a váltakozó terhelést ismételték N-szer (2. ábra). Ha eközben a rács nem csúszott ki, a 3. szakaszban addig növelték a sztatikus terhelést ($F_{p, cikl}$), amíg ki tudták húzni a rácsot.

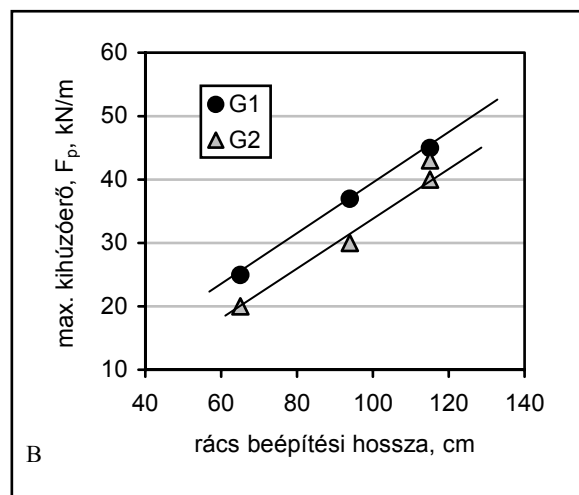
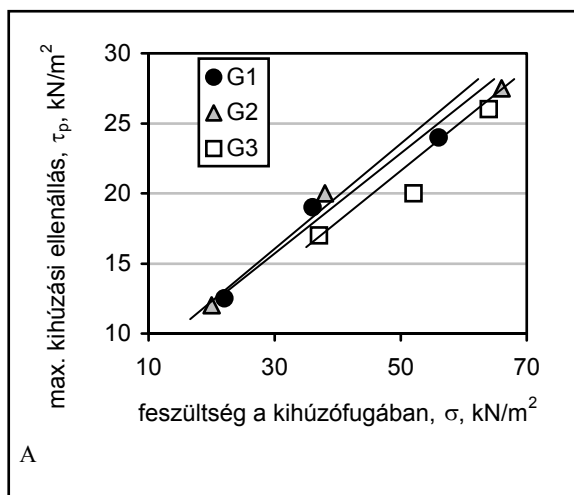
A sztatikus mérések néhány eredményét a 3. ábra mutatja. Látható, hogy a függőleges terhelés következtében kialakuló feszültség és a rács kihúzásával szemben kialakult ellenállás, ill. a rács beágyazásának hossza és a kihúzásához szükséges erő arányos egymással, lineáris változást mutatnak. A beágyazás hossza különösen fontos a felső rétegekben, ahol a talajréteg tömege és súlya még kicsi, a ciklikus-dinamikus igénybevétel viszont nagy lehet.

Sztatikus terhelés alatt a terhelés okozta feszültséget részben a súrlódási ellenállás, részben a talaj passzív ellenállása használja fel. Durva szemcsés talajban ehhez még egy mechanizmus társul, az ún. reteszelés (interlock-hatás), amikor a durva szemcsék részben a rácsnyílásokba, részben a talajba kapaszkodnak, és így gátolják a rács megcsúszását. Ezt a 4. ábra mutatja vázlatosan.

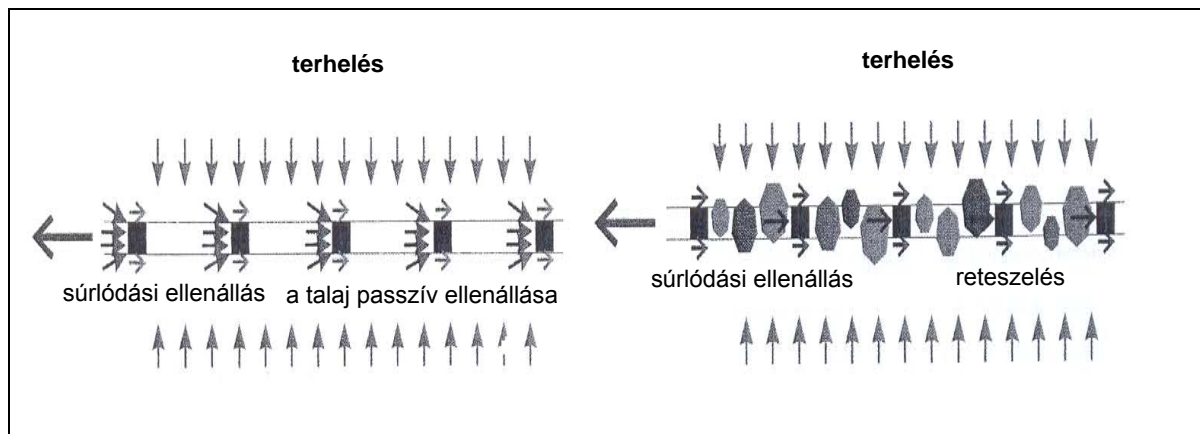
A dinamikusan mérési eredményei közül a homokba ágyazott G2 ráccsal kapott néhány görbét mutat be az 5. ábra. Az A kép a műanyag rács és a fémrács, ill. fémlemez megcsúszását ábrázolja a dinamikusan terhelési egységek számának függvényében. A sima acéllemez teljesen eltérően viselkedett, mint a rácsok. Hosszú ideig egyáltalán nem mozdult el, 3200–3300 N után között viszont minden átmenet után tökéletesen elvesztette tapadását a talajban. A rácsok elmozdulása N függvényében exponenciálisan nőtt. B kép a G2 rács megcsúszását N és a dinamikusan terhelés amplitúdójának függvényében ábrázolja.



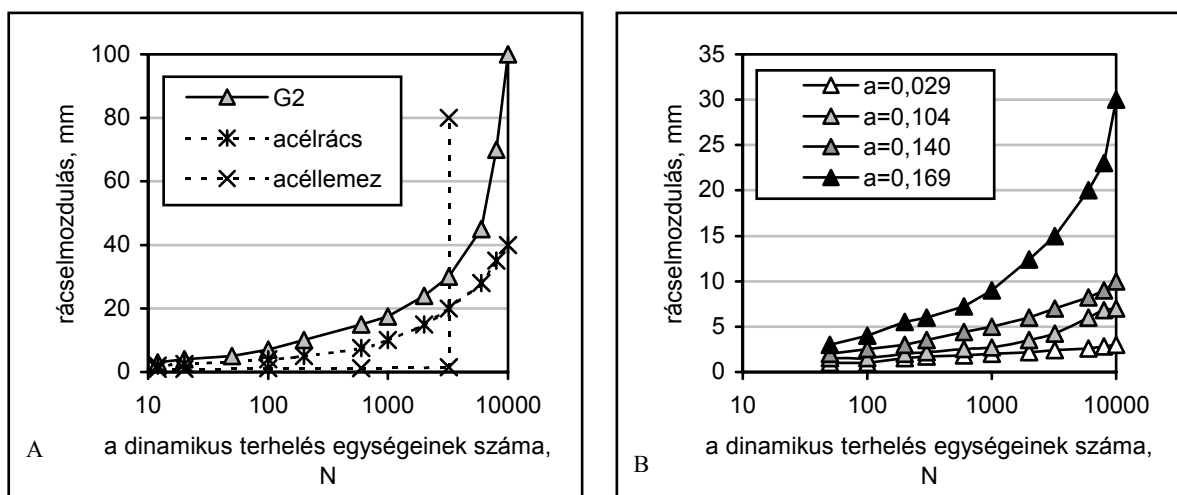
2. ábra A dinamikusan terhelés három szakasza



3. ábra Homokba ágyazott műanyag georácsokkal mért jellemzők sztatikus terhelés alatt



4. ábra A terhelés okozta feszültség leépülése különböző mechanizmusok szerint nem kötött talajokban sztatikus terhelés alatt



5. ábra Homokba ágyazott rácsok elmozdulása dinamikus terhelés hatására [A kép: a dinamikus terhelés időtartamának (az egységek számának) hatása a G2 műanyagrácsra és kétféle acélerősítésre; B kép: a G2 műanyagrács elmozdulása a dinamikus terhelés időtartamának és amplitúdójának (a) függvényében]

Ciklikus terhelés alatt a feszültség leépülésének mechanizmusai kiegészülnek egy dinamikus jelentkező jelenséggel. Itt a rács lökészerű elmozdulásakor a talaj kis dombocskát alkotva feltorlódik a rács nyílásaiban. Ismételt mozgáskor viszont a dombocska szemcséi „szétrobbannak”, szétszóródnak, majd más szemcsékből ismét feltorlódik a talaj.

A megfigyelt jelenségek és a mért értékek alapján a kutatók matematikai modellt állítottak fel a georácsok terhelés alatti várható viselkedéséről. Ennek alapján megbe-

*csülhető, hogy milyen körülmények között valószínű a rács stabilizáló funkciójának a megszűnése. Kiszámítható az optimális beépítési hossz. Valószínűsíthető, hogy hogyan befolyásolja egy georács a talajra ható dinamikus terhelés eloszlását. A kutatók tervei szerint módszerük az „Ajánlások a geoműanyagokkal végzett talajerősítéshez” (Empfehlungen für Bewehrungen aus Geokunststoffen, *EBGEO*) című kiadvány legújabb változatában már szerepelni fog.*

Összeállította: Dr. Pál Károlyné

Needham, A. D.; Smith, J. W. N.; Gallagher, E. M. G.: The service life of polyethylene geomembrane barriers. = *Engineering Geology*, 85. k. 1–2. sz. 2006. máj. p. 82–90.

Nernheim, A.; Meyer, N.: Interaktionen von Geokunststoff und Boden unter statischen und zyklischen Beanspruchung. = *Bautechnik*, 83. k. 4. sz. 2006. p. 261–270.