



Az üveghab-granulátum útépítésben való alkalmazásának vizsgálata

Szendefy János^{1,2}, Bán Zoltán^{1,2}, Lődör Kristóf^{1,2}
Waleed S. Mustafa¹

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Geotechnikai és Mérnökgeológia Tanszék

² EFERTE Mérnöki Tanácsadó és Szolgáltató Kft.

E-mail: szendefy.janos@epito.bme.hu; ban.zoltan@eferte.hu; lodor.kristof@eferte.hu; waleed.mustafa@epito.bme.hu

DOI: [10.36246/UL.2020.2.06](https://doi.org/10.36246/UL.2020.2.06)

KIVONAT

Az üveghab granulátum hazánkban még kevésbé ismert anyag, amit üveghulladékból állítanak elő. Az üveghabot táblásított formában hőszigetelő anyagként használják, azonban granulátum formában földműanyagként is alkalmazható. A skandináv országokban utak alatti átfagyás elleni hőszigetelésre használják, hazánkban eddig épületek padlója alatti hőszigetelő ágyazatként került alkalmazásra. A hazai útépítési földműveknél alapvetően alacsony halmazsűrűsége miatt lehetne előnyösen használni. Az üveghab granulátum földművek tervezéséhez, építéséhez szükséges mechanikai tulajdonságai kerültek meghatározásra, amikkel különböző útépítési földművek építése került modellezésre végeselemes programokkal. A számítógépes vizsgálatok alapján az üveghab granulátum kis halmazsűrűségét kihasználva hatékonyan csökkenthető a töltések alatti altalaj süllyedés és minimalizálható az ehhez szükséges konszolidációs idő. Az üveghabot háttöltés anyagként felhasználva számottevően csökkenthető a hídfőkre háruló vízszintes földnyomás értéke, ami miatt kisebb nyomatékok és nyíróerők adódnak a hídfőben és az alapozásként szolgáló cölöpökben. A cikk a kutatás során meghatározott mechanikai jellemzőket és azok segítségével végzett útépítési mintaszámításokat mutatja be.

Kulcsszavak: üveghab, földmű, könnyű anyagú feltöltés, háttöltés, hídfő

ABSTRACT

Foamglass aggregate is not known material in Hungary, which are produced from glass waste. Foamglass tables is basically used as a thermal insulation material, but its aggregate form can be used as earthwork material. In the Scandinavian countries it is used for thermal insulation against freezing under roads, in Hungary it has been used as a thermal insulation bedding layer under the floors of buildings. It could be used advantageously in Hungarian road earthworks mainly due to its low bulk density. The mechanical properties of the foamglass aggregate were determined in a researching project, and various road construction earthworks was modelled with finite element programs. Based on computer studies, the low bulk density of foamglass aggregate can be used to effectively reduce settlements under embankments and minimize the consolidation time. By using foamglass as a backfill material in bridge abutments the horizontal ground pressure on the abutments can be significantly reduced, resulting in lower bedding moment and shear forces in the abutment and the foundation piles. The article presents the mechanical characteristics determined during the research and the road construction sample calculations performed with their help.

Keywords: foamglass, earthwork, light fill material, backfill, bridge aboutment

Dr. Szendefy János

A BME Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszékének adjunktusa, valamint az EFERTE KFT tulajdonos-ügyvezetője. A fő kutatási területe a földművek és az ágyazati anyagok mechanikai tulajdonságainak, valamint a talajjavítási módszereknek a vizsgálata.

Bán Zoltán

A BME Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszékének doktor jelöltje, valamint az EFERTE KFT munkatársa. A fő kutatási területe a talajok megfolyósodásának laboratóriumi és helyszíni vizsgálata, valamint a megfolyósodással szembeni biztonság meghatározása.

Lődör Kristóf

A BME Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszékének PhD hallgatója, valamint az EFERTE KFT munkatársa. A fő kutatási területe a talaj és szerkezet kölcsönhatásának vége-selemes modellezése, rigid-inclusion alapozási módszer tervezési eljárásának kidolgozása.

Waleed S. Mustafa

A BME Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszékének PhD hallgatója. A fő kutatási területe az üveghab granulátum mechanikai tulajdonságainak vizsgálata, amin belül első sorban az anyag statikus és ciklikus terheléssel szembeni teherbírásának meghatározása.

1. BEVEZETÉS

Földünk egyik legnagyobb kihívása a fenntartható életmód megteremtése. A föld egyre gyarapodó népessége és életszínvonalának jelentős emelkedése felpörgette a mezőgazdasági és ipari tevékenységet, aminek következtében nagy mértékben nőtt a hulladéktermelés is. A megnövekedett termelésnek kettős negatív hatása van környezetünkre, egyik a nyersanyagkészletek kimerülése, míg a másik a hulladék mennyiségének jelentős növekedése. A probléma felismerése tettekre sarkallta a világot, ezért a negatív folyamatok mérséklésére és a környezetünk jövőbeni védelmére az elmúlt évtizedekben nagy erőfeszítéseket tettek az államok, a kutatók, az ipari szereplők és természetesen a lakosság is. Ennek egyik kiemelt eredménye a szelektív hulladékgyűjtés, aminek segítségével a még későbbiekben felhasználható hulladékot különválogatva tárolják, esetleg újrahasznosítják, csökkentve ezzel a nyersanyagok felhasználását és a szemétmennyiség képződését.

Az üveghulladék újrahasznosításának egyik módja az üveghab gyártás, amely hazánkban eddig kevéssé volt ismert. Az üveghabot alapvetően hőszigetelő anyagként alkalmazták, épületek, vegyi üzemek hőszigetelésénél, amelyek között néhány hazai példát is találhatunk. Azonban az elmúlt évtizedekben, amióta granulátum formát is gyártanak, -az USA-ban, Nyugat- és Észak Európában- használata elterjedt az út és csarnoképítésben is. Felhasználása több rétegű, van, ahol könnyű fajsúlya miatt alkalmazzák a töltésepítések során, más esetekben hőszigetelő képességét is kihasználva csökkentik a fagybehatolás mélységét az utak alatt vagy csarnoképületek padlója alatti hőszigetelő ágyazatot építenek belőle.

Az üveghab gyártás bonyolult folyamatának hazai kifejlesztését egy debreceni cég tűzte ki céljául 2014-ben, amit meg is tudott valósítani 2017-re. Az elkészült termék építőmérnöki tulajdonságainak vizsgálatát a BME és az EFERTE Kft. végezte 2018-ban laboratóriumi és nagymodell vizsgálatok segítségével. A paraméterek további vizsgálatát és az üveghab-granulátum felhasználási területeken való alkalmazhatóságát a gyártó céggel közösen a BME-n diplomázók és PhD hallgatók jelenleg is végzik. Az elsődleges hazai felhasználás az ipari padlók alatti hőszigetelő ágyazat volt, amelynek tervezési metódusát 2018-ban egy kutatási program keretében meghatároztuk (Szendefy-Huszák, 2018). Az ipari padlóknál való felhasználása azóta valósággá vált, több tíz beruháznál került beépítésre, ahol a helyszíni beépítéseket nyomonkövethettük és back-analíziseket végeztünk. A magasépítésben is megismerkedtek az anyaggal, így könnyű feltöltésként került alkalmazásra budapesti mélygarázsok felett, amikre parkok, kültéri burkolatok épültek meg.

A nemzetközi gyakorlatban már látott útépitésben való felhasználás meghonosítása érdekében hazai úttervező és kivitelező cégekkel konzultáltunk és számba vettük a felhasználási lehetőségeket. Ezen lehetőségek közül néhányra számításokat végeztünk különböző aktuális útépitési projekteknél. A számítások során a korábban meghatározott anyagjellemzőket használtuk, az eredmények értékelésekor pedig a jelenleg használatos földműépítési gyakorlatban használt anyagok számításaival végeztünk összehasonlítást.

2. AZ ÜVEGHAB ANYAG ISMERTETÉSE

Habosított üveget az 1930-as évek óta alkalmaznak hőszigetelő anyagként táblásított formában. Nem sokkal a kifejlesztését követően, már 1935-ben szabadalmaztatták az USA-ban a technológiát. Habár rengeteg pozitív tulajdonsága miatt már kifejlesztésekor a jövő hőszigetelő anyagának tulajdonították lakossági alkalmazása a mai napig nem mondható elterjedtnek. Az ipari szereplők azonban hamar felismerték az üveghab számos előnyét és gyorsan elterjedt ipari épületek esetében a táblás üveghab hőszigetelő anyag használata. Elsősorban az olaj- és gáziparban terjedt el a táblásított üveghab használata köszönhetően inert tulajdonságainak.

Az üveghabot elsősorban hulladéküvegből gyártják (sík- és öblösüvegből egyaránt), azonban előállítható kifejezetten üveghab gyártásához előállított üvegből is. Az üveget először liszt finomságúra őrlik, majd habosító anyagot (szénpor, mészpor) hozzáadva sütik ki. A legegyszerűbb esetben, amikor táblás formában állítják elő, alagútkemencében sütik ki az üveghabból és habosító anyagból álló port. A sütés során a hőmérséklet nem olyan magas, hogy az üveg teljesen folyékonnyá váljon, csupán 700 – 900 °C. A sütés során az üveg kissé megolvad és a hozzáadott habosító anyag pedig gázt képez benne, így létrehozva a belső pórusszerkezetet. A kapott táblás üveghabot – szemben az üveghab-granulátummal – több lépésben hűtik le, hogy ne keletkezzenek benne belső feszültségek.

A táblás üveghab gyorsan elterjedt olyan területeken, ahol előnyös fizikai és kémiai tulajdonságai, elsősorban a tűzállósága és inert kémiai viselkedés elsődleges fontosságú. Az alapanyagául szolgáló üveg egyáltalán nem éghető, nem savas, sem pedig bázikus vegyszerekkel nem lép reakcióba és érzéketlen az UV (UV-A, UV-B, UV-C) sugárzásra is. Így felhasználható volt valamennyi olyan iparágban és területen, ahol erős kémiai hatásoknak volt kitéve vagy magas a tűzveszély kockázata. További előnyös tulajdonsága a mérettartása. Mivel nem öregszik, így mind fizikai mind kémiai tulajdonságait tekintve évekkel beépítése után is azonosan viselkedik a beépítéskori állapotával. Ezek az inert tulajdonságok a mélyépítésben, az útépitésben is fontosak, hiszen a beépítése során a talajjal, talajvízzel nem lép reakcióba, napsugárzás és egyéb környezeti hatásokra nem érzékeny, nem bomlik, így tartós földműanyagként tud szolgálni. További előnyös tulajdonsága – igaz ez csak a XXI. században lett fontos szempont -, hogy környezetbarát. Alacsony energiabefektetéssel gyártható hulladék alapanyagból és szinte végtelenül újrahasznosítható.

Egészen az 1980-90-es évekig csak táblás formában gyártották és alkalmazták ipari hőszigetelő anyagként, ezt követően kezdődtek meg a kísérletek granulátum formájú üveghabbal. Az első kísérletek során Svájcban könnyű feltöltésként alkalmazták, majd később Norvégiában folytattak átfogó kutatásokat az üveghab mechanikai – elsősorban hőszigetelő - tulajdonságára vonatkozóan. Az üveghab alapanyagául szolgáló üvegliszt szemcsesűrűsége 2300 kg/m³, míg a kész üveghabé csupán 150 – 250 kg/m³, vagyis az üveghab több mint 90% pórusokból áll, a vázszerkezet a térfogatának csupán 5-10%-a. Az üveghab-granulátum gyártása hasonlóan történik, mint a táblásított üveghab esetében, azzal a lényegi különbséggel, hogy az anyagot hirtelen hűtik le, így abban belső feszültségek keletkeznek. Ezeknek a belső feszültségeknek köszönhetően törik össze többé-kevésbé szabályos, azonos méretű szemcsékre a gyártási folyamat végén. Az üveghab-granulátum szemcséi nagyon ridegek, és részben a porózus szerkezet miatt, hajlamosak az aprózódásra rakodás, terítés, bedolgozás során. Nem jellemző, hogy az üveghab-granulátumot rostálják – részben aprózódásra való hajlama miatt -, hanem a gyártás során előállított szemcsemérettel szállítják. Alacsony sűrűségének köszönhetően nagy mennyiségben is könnyen szállítható, akár 90-120 m³ is egy szállítmánnyal.



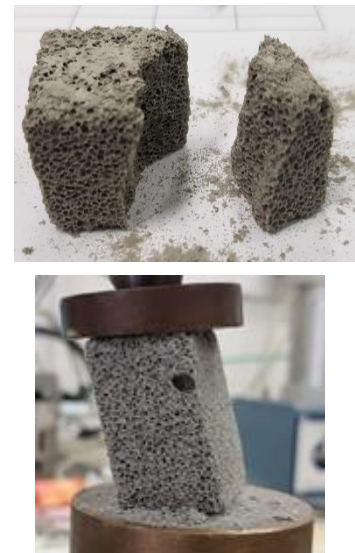
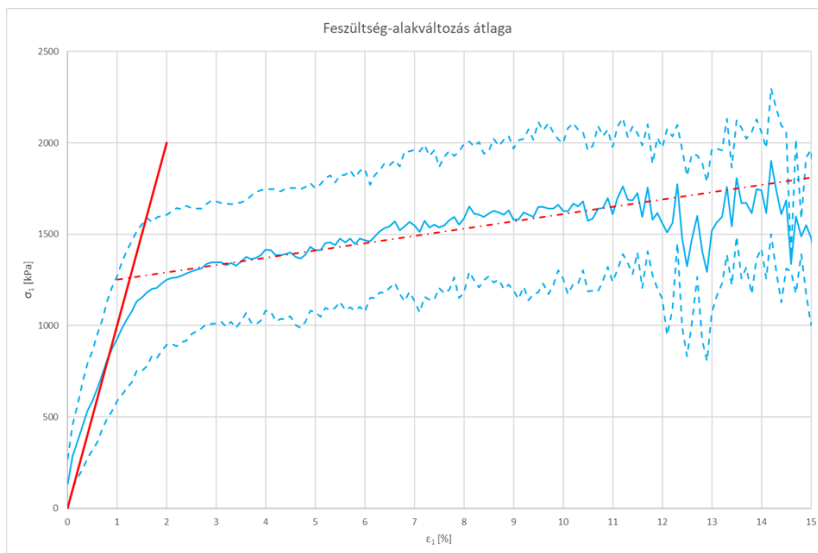
1. ábra: Üveghab-granulátum és üveghab szemcse.

3. AZ ÜVEGHAB ANYAG MECHANIKAI TULAJDONSÁGAI

Az anyag építőipari alkalmazhatóságának első feltétele, hogy meghatározzuk a mérnöki szerkezetek tervezéséhez szükséges mechanikai paramétereket. A gyártó elsődlegesen iparipadlók alatti hőszigetelő ágyazati anyagként kívánta hasznosítani, ezért a fő cél az alakváltozási paraméterek meghatározása volt. A termék alapvetően szemcsékből álló halmaz, így tulajdonságait a halmaz tulajdonságai fogják meghatározni, azonban jelentősen eltér a talajoktól, így a talajmechanika általános elméleteiben feltételezettéktől is oly módon, hogy a szemcsék nem kellően szilárdak ahhoz, hogy terhelés hatására ne törjenek össze.

3.1. SZILÁRDSÁG VIZSGÁLAT

A szakirodalomban döntően az anyag összetevőkre és a gyártási folyamatokra található adatok, illetve a táblás üveghab szigetelések szilárdságára vonatkozóan. Mivel a granulátum gyártási folyamata a hűtési folyamat során eltér a táblásított anyagétól, ezért a laboratóriumi vizsgálatokat az üveghab szemcse nyomószilárdságának meghatározásával kezdtük. A vizsgálathoz összesen 12 db próbatestet faragtunk ki a szemcsékből és végeztünk rajta egyirányú nyomóvizsgálatot. A próbatestek előállítása során némi műszaki kompromisszumot kellett elfogadnunk, hiszen a szemcsék miatt a minták mérete igen kicsi és változatos volt (3-6cm oldalhosszúság) és az 1: 1,5 magasság-szélesség arány sem volt minden mintánál megoldható. De ezeket a kompromisszumokat szükségesnek tartottuk, hogy a valódi anyagot vizsgálhassuk, hiszen lassabb hűtési folyamat mellett létrehozott nagyobb szemcséjű anyagban mások lehetnek a belső feszültségek. A vizsgálat során a minták döntően húzási tönkremenetelt szenvedtek és hosszában repedtek el, míg egyes mintáknál külpontosság miatti alakváltozás vezetett a törési feltétel kielégítéséhez. A nagy számú vizsgálat eredményeinek értékelése alapján jól kirajzolódik a rugalmas és képlékeny állapot határa, ami $\sigma_{ny} \sim 1250 \text{ kPa}$ nyomófeszültség körül definiálható (2. ábra). Ehhez a nyomófeszültséghez még viszonylag kis alakváltozás tartozik $\varepsilon \sim 1,25\%$, így a rugalmas szakasz $E_{\text{rugalmas}} = 100 \text{ MPa}$ rugalmassági modulussal jellemezhető. Az anyag dinamikus terhelésre való tönkremenetelét, például lágyulás vagy megfolyósodás bekövetkezését ciklikus terheléssel vizsgáltuk. Az alkalmazott 10.000 db ciklus hatására szilárdság csökkentést vagy tönkremenetelt nem tapasztaltunk.

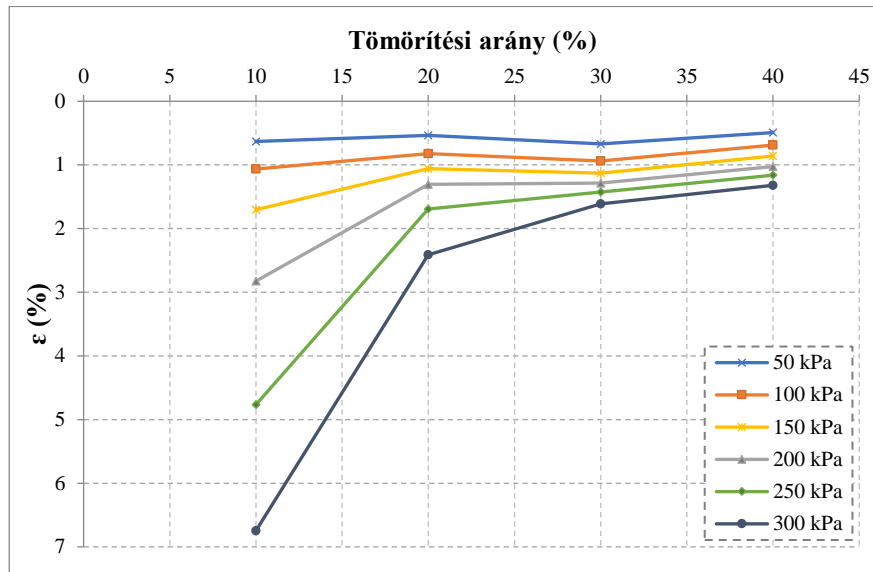


2. ábra: Elemi hasábok átlagos és szórással számított alsó-felső határoló görbéje, illetve néhány vizsgálat során készült fénykép (Szendefy-Huszák 2018).

3.2. KOMPRESSZIÓ VIZSGÁLAT

A halmazvizsgálat során az összenyomódási modulus (E_s) meghatározása volt a cél. A vizsgálatok különböző tömörségek mellett kerültek elvégzésre annak érdekében, hogy meghatározásra kerüljön milyen tömörítési arányt célszerű a beépítés során alkalmazni. A tömörítési arányok az alábbiak voltak: 1:1,1; 1:1,2; 1:1,3 és 1:1,4, ahol a számok a tömörített rétegvastagság és a lazán elterített rétegvastagságot mutatják. Az üveghab-granulátum általánosan 30-60mm szemmagysággal jellemezhető, így a talajmechanikában megszokott 20mm magas kompressziós gyűrűben nem lehetséges a halmaz vizsgálata. A vizsgálat elvégzése érdekében ezért egy egyedi, 300mm átmérőjű hengeres edényt készítettünk a vizsgálatokhoz, hogy kellően nagy számú szemcse legyen beépíthető, amivel már megfelelően modellezhetővé válik a valódi szemcsehalmaz és az abban végbemenő folyamatok. A méretválasztás során szintén fontos szempont volt a szakirodalom által javasolt 5D szemcseátmérő biztosítása. Az edény magassága 250 mm volt. Az 1:1,1 és 1:1,2 arányú minták egy rétegben kerültek bedolgozásra, tehát 22cm és 24cm vastagságban került az anyag az edénybe beszórásra, majd egy döngölőlappal kézi erővel 20cm vastagságúra lett tömörítve. Az 1:1,3 és 1:1,4 tömörítési arányok esetében már nem lehetett az anyagot egy rétegben betömöríteni, ezért két rétegben került sor a tömörítésre. A vizsgálatok során a talajmechanikában járatos 50kPa-os terhelési lépcsőket alkalmaztuk egészen 300 kPa feszültségig. A vizsgálatok során mindegyik tömörítési arányhoz 5-5 db vizsgálat készült a mérési bizonytalanságok mértékének megfigyelése érdekében.

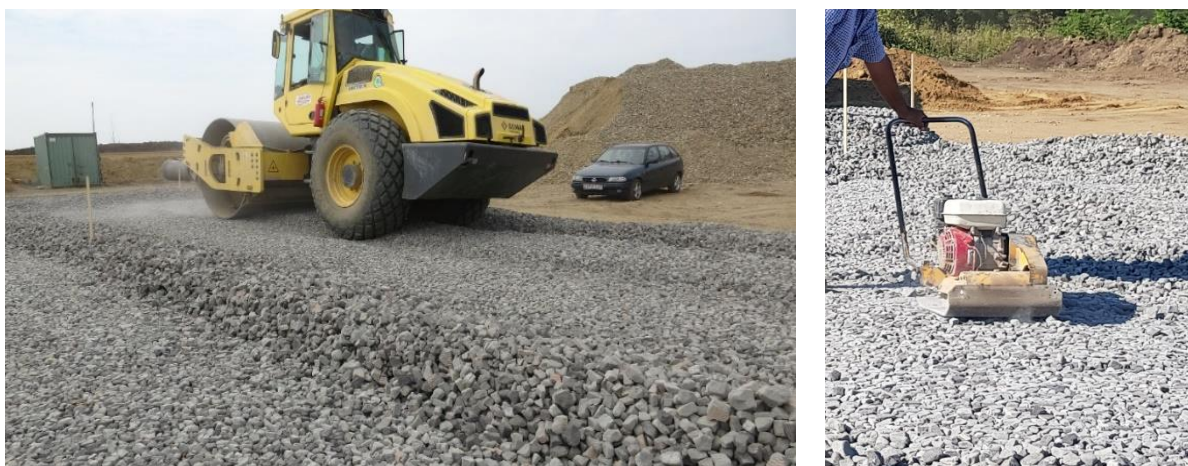
A vizsgálati eredmények alapján az E_s értéke 4-20MPa között változott, ahol az alacsonyabb értékek az 1:1,1 tömörítési aránynál (10%), míg a magasabb értékek a magasabb 1,1:4 tömörítési aránynál (40%) adódtak. A 3. ábra mutatja a tömörítési arányoknál mért fajlagos alakváltozási értéket a különböző terhelési lépcsőknél. Az ábra arra mutat rá, hogy az 1:1,1 és 1:1,2 tömörítési arányoknál rendkívül kompresszibilis az üveghab-granulátum halmaz, az összenyomódási modulusok puha, közepesen jó talajokhoz hasonlíthatók. Ebből kifolyólag ilyen alacsony tömörségi aránynál való bedolgozást nem javasolunk, esetleg csak olyan helyeken tartjuk alkalmazhatónak, ahol nem kerül rá számottevő teher és burkolat, az esetleges utólagos süllyedések nem okoznak sem szerkezeti, sem pedig használhatósági problémát. Az 1:1,3 és 1:1,4 tömörségi arányok lényegesen merevebb, jó állapotú talajokra (pl.: homok, kavicsos homok) jellemző E_s értéket mutattak, ami alapján az üveghab-granulátumot megfelelő feltöltő anyagnak véljük utak, kültéri burkolatok és ipari padlók alá. Az üveghab szemcséhez hasonlóan megvizsgáltuk a halmaznak is a dinamikus terheléssel szembeni viselkedését. Felpuhulás vagy megfolyósodás nem történt a halmazban 10.000 db ciklust követően sem, így dinamikus terhekkel szemben megfelelően ellenálló az anyag.



3. ábra: Halmaz kompresszió vizsgálat eredményei különböző tömörítési arányok alkalmazásával.

3.3. TEHERBÍRÁS (E_2) MÉRÉS

Az útépitési földmunkáknál és az ipari padlók ágyazatánál az egyik legfontosabb mérőszám az E_2 teherbírás értéke. A földművek, javítórétegek és ágyazatok teherbírás méretezéséhez elengedhetetlen az anyag teherbírásai sajátmodulus értékének (E_{2d}) a meghatározása. Az üveghab-granulátum E_{2d} értéke nagy modell vizsgálattal, próbaszakasz beépítésével került meghatározásra. A próbaszakasz készítése egyben azt a célt is szolgálta, hogy megvizsgálásra kerüljön az üveghab beépítés metodikája, az alkalmazható építőgépek fajtái. A próbaszakaszok építése során a nagytömegű földmunka és az ipari padlók ágyazatépítése 12t vibrohengerrel, míg a kisebb feltöltések és családi házak alatti tömörítések kivitelezési munkái padkahengerrel és lapvibrátorral kerültek modellezésre. A próbaszakaszok építésekor különböző hengerjáratszámok kerültek alkalmazásra, amikkel eltérő tömörségi arányokat hoztunk létre. Az E_{2d} érték meghatározása céljából 1m vastagságú üveghab feltöltés készült, hogy az altalajnak már ne legyen hatása a feltöltés tetején mért teherbírás értékekre. A nagytömegű henger esetében 50cm vastag, míg a kisebb tömörítőeszközöknél 30cm vastagságban történt az üveghab elterítése. Az anyag helyszínrészállítását nyerges vontatók, az elterítést forgófelsővázak kotró végezte. Az anyagkiszállítás során az üveghab kis súlya miatt egy szállítmány 90m³, ami normál talajoknál tízszer hatékonyabb és környezetkímélőbb szállítást eredményez.



4. ábra: Tömörítés a nagytömegű kombihengerrel és a kisebb lapvibrátorral.

A tömörítési arányokat a hengerezést követően szintezőműszerrel 5 pontban mérve határoztuk meg a rétegek beépítését követően. A hengerjáratok számával arányosan növekedtek a tömörítési arányok, aminek eredményeképpen 1:1,2, a külföldi ajánlásokban olvasható 1:1,4 és egy kvázi túltömörített 1:1,6 állapotot hoztunk létre. A teherbírás értékek a vártak megfelelően tendenciózusan növekedtek a tömörítés mértékével, így a legkisebb teherbírás a leglazább, míg a legnagyobb teherbírás a legtömörebb állapothoz adódott.

A betömörített üveghabon 1db statikus tárcsás (E_2) teherbírást mérést és 5 db könnyűejtősúlyos teherbírást mérést (E_{vd}) végeztünk. Az ejtősúlyos vizsgálatból azért készült több, mert ezzel kívántunk a teherbírás szórását ellenőrizni, valamint a statikus és dinamikus mérés korrelációját vizsgálni. Az ejtősúlyos mérések viszonylag kis szórást mutattak, így a statikus tárcsás teherbírást mérés eredményeit elfogadhatónak tartottuk. A 12t vibrohengerrel végzett próbaszakasz mérési eredményeit az 1. táblázat mutatja be, ahol az E_{vd} az ejtősúlyos mérések átlagértéke került feltüntetésre. A külföldi ajánlásoknak megfelelő tömörítési arány (1:1,4) mérési eredményei alapján az üveghab teherbírási sajátmodulusát $E_{2d}=50\text{MPa}$ értékben határoztuk meg. Ezt az értéket a megépült csarnok épületek ágyazatépítése során végzett minősítő teherbírási mérések során végzett ellenőrző számításaink is visszaigazolták. Az E_2/E_{vd} aránya ~ 2 -re adódott, ami jó egyezést mutatott a szakirodalomban a talajokra vonatkozó teherbírási arányokra (Tompai, 2008).

Járatszámok	1 db s + 2db oda v és vissza s	1 db s + 4db oda v és vissza s	1 db s + 6db oda v és vissza s
Tömörítési arány	1,20	1,40	1,60
Teherbírás-E_{2d} (MPa)	32	47	73
Teherbírás-E_{vd} (MPa)	15,3	23,0	25,4

v=vibro, s=sima

1. táblázat: Teherbírás értéke a 12t-ás kobihengerrel tömörített próbaszakasz esetében.

A padkahengerrel tömörített szakaszok teherbírása szintén 5-5db ejtősúlyos teherbírást mérésrel lett vizsgálva. A mérési eredmények alapján a hasonló tömörségi arányra betömörített üveghab teherbírása a nagy hengerrel betömörített anyagével volt egyenlő (2. táblázat). Ami alapján a kisebb felületeken végzett kis méretű tömörítőeszközzel is létrehozható az a tömörség és teherbírás, ami a nagytömegű földmunkához használt munkagépekkel.

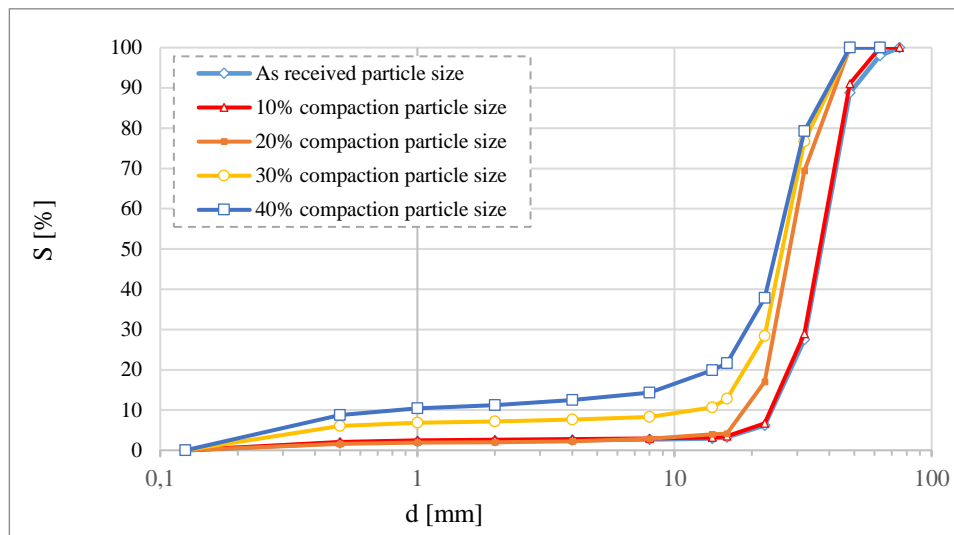
Járatszámok	4 sima	4 vibro	2 sima + 2 vibro
Tömörítési arány	1,20	1,49	1,38
Teherbírás - E_{vd} (MPa)	18,4	27,5	21,5

2. táblázat: Teherbírás értéke a 2,8t-ás padkahengerrel tömörített próbaszakasz esetében.

3.4. SZEMELOSZLÁS, APRÓZÓDÁS VIZSGÁLAT

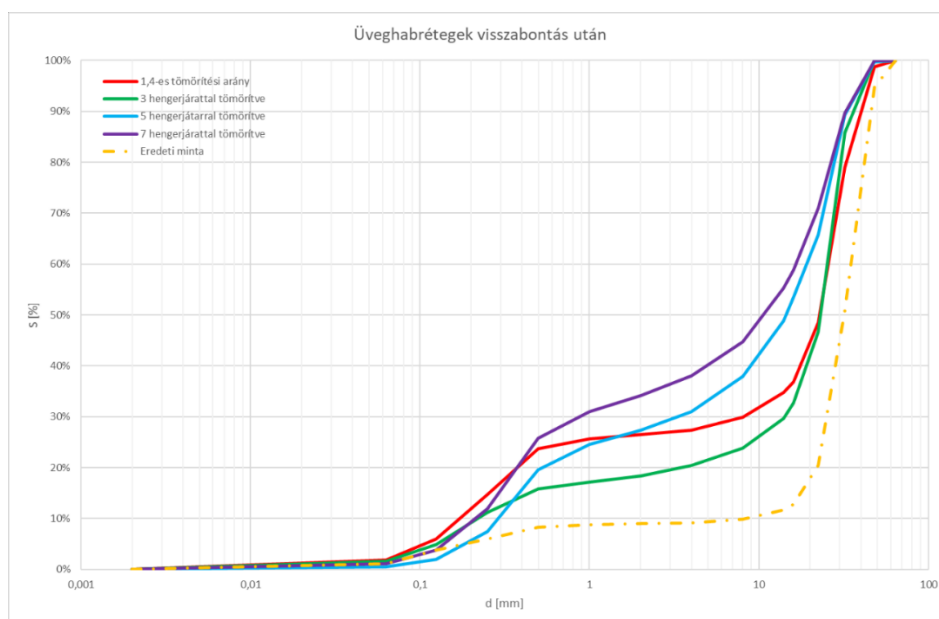
A felhasználókban és bennünk is felmerült a kérdés, hogy vajon milyen mértékben aprózódik az üveghab. Ennek vizsgálata céljából szemeloszlás vizsgálatok készültek a laboratóriumi halmaz kompresszió vizsgálat és a helyszíni nagymodell kísérletet követően is.

A laboratóriumi vizsgálatok során végzett döngölés során az 1:1,1 arányú betömörítés gyakorlatilag nem okozott aprózódást, míg az egyre nagyobb tömörítési arány eléréséhez szükséges döngölés egyre nagyobb aprózódást eredményezett. A szemeloszlás görbék lefutása alapján a legjelentősebb változás a 20-40mm tartományban következett be, ami arra utal, hogy a szemcsék kb. 15-20%-a kettő vagy három részre törött szét.



5. ábra: A laboratóriumi tömörítés hatására bekövetkező szemcseaprózódás.

A nagymodellvizsgálat során a 12t-ás kombihengerrel tömörített rétegekből vett minták szemeloszlás vizsgálatai hasonlóságot mutattak a laboratóriumi vizsgálat során mért aprózódással. Az 1:1,4-es tömörségi arányhoz tartozó próbafelület aprózódása közel megegyező volt a 20-40mm közötti tartományban, azonban a 0,3-10mm közötti tartományba eső szemcsék száma nagyobb lett. Így a nagyobb tömörítőeszköz alatt nem csak néhány darabra törtek szét a szemcsék, hanem további kisebb darabokra is aprózódtak. A finomszemcsék aránya ($S_{>0,063}$) még az aprózódást követően elenyésző (1-2%) volt, így az üveghab-granulátum durvaszemcsés anyagként jellemezhető.



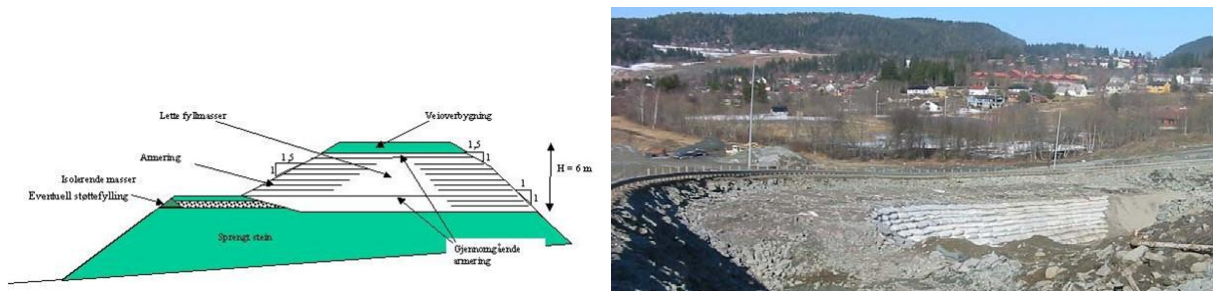
6. ábra: A 12t-án hengerrel tömörített szakaszok építése során bekövetkező szemcseaprózódás.

4. AZ ÜVEGHAB ÚTÉPÍTÉSI FELHASZNÁLÁSI LEHETŐSÉGEI

Az üveghab-granulátummal Svédországban, Norvégiában és Finnországban kezdenek el a 1990-es években kísérletezni. Kihasználták az üveghab hőszigetelő tulajdonságát, hogy a talaj átfagyását csökkentsék, ezáltal is enyhítve a fagykárokat az útszerkezetekben. Norvégiában az 1950-es és '60-as évek óta kísérleteznek könnyű feltöltésekkel puha altalajon. Eleinte faipari melléktermékeket alkalmaztak, majd könnyű agyag aggregátummal (LWA) folytatták a kísérleteket. Az 1970-es évektől

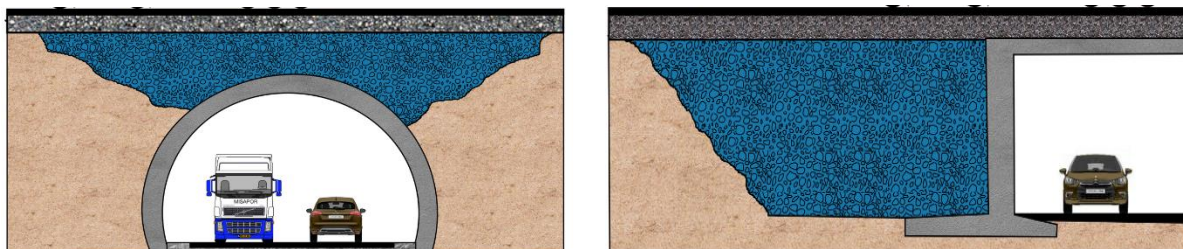
pedig a széles körben elterjedt polisztirol habot építettek be a földművekbe. Az 1998-2004 között építettek be üveghabot kísérleti jelleggel mellékutak pályaszerkezetébe a hőszigetelő tulajdonsága miatt.

Az útpályaszerkezetekbe jellemzően kis mennyiségben, vékonyabb rétegekben építették be, hogy XPS habbal tudják összevetni a hőszigetelő képességét. Emellett épült néhány helyen nagytömegű feltöltés is üveghabból, többek között mintegy 6 m magasságú ideiglenes autópálya-töltés. Ott dózerrel végezték mind a terítést, mind pedig a tömörítést (3 dózerjáráttal), a mintegy 1 m vastagságú rétegekben terített üveghabon. Az alacsony terhelésből nem keletkeztek számottevő kúszási alakváltozások.



7. ábra: Autópálya feltöltés részben üveghabból kialakítva (Állami Közútkezelő Norvégia 2007).

A norvég kísérletsorozathoz hasonló vizsgálatokat végeztek el Finnországban is, ahol pernyével együtt vizsgálták az üveghabot mint másodlagos nyersanyagot. Ezen vizsgálatoknál nem egyetlen paraméter (hőszigetelőképeség) vizsgálata volt a cél, hanem az, hogy az építőipar által felhasznált elsődleges nyersanyagokat (kő, kavics) helyettesítsék másodlagos nyersanyagokkal. A kísérletek során háttöltésben, töltésben és ágyazati rétegben egyaránt beépítették az üveghabot és vizsgálták mechanikai tulajdonságait. Vizsgálataik alapján az üveghab belső súrlódási szöge 36-45°, halmazsűrűsége pedig 220-280 kg/m³.



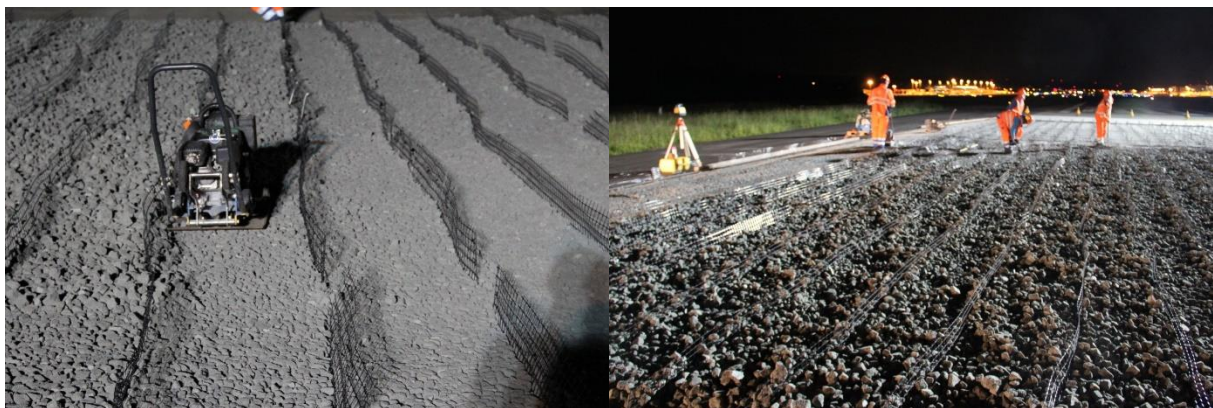
8. ábra: üveghab alkalmazása alagút feletti visszatöltésben és hídfő háttöltésben.

Amellett, hogy nagy tömegben földmunkában vagy ágyazati rétegeként építik be az üveghabot, alacsony sűrűsége miatt alkalmazzák kisebb tömegben is közműárkok visszatöltésére vagy közművek (pl.: távhővezeték) hőszigetelésére. De lehetséges alkalmazási területe még a zajvédő vagy kerítésként funkcionáló gabion falak kitöltő anyaga. Gabion támfalak esetében nem alkalmas a gabion háló kitöltésére, mivel a gabion támfalak súlytámfalként működnek, az üveghab alacsony fajsúlya pedig nem biztosítja a szükséges állékonyságot.



9. ábra: Zajvédő fal üveghab kitöltéssel.

Nagyon különleges felhasználási területe a repülőterek kifutópályáján a túlfutó területek borítása. Ezek olyan területek a kifutópálya két végén, ami a túlfutó repülőgépek kontrollált lelassítását szolgálja. A Zürichi reptéren épült speciális, georáccsal erősített túlfutó terület.



10. ábra: Reptéri kifutópálya túlfutó területe üveghabból.

4.1. HÍDHÁTTÖLTÉS VIZSGÁLATA

A külföldi példák alapján számításokat végeztünk hazai útépítési beruházásoknál az üveghab felhasználási lehetőségére. A hidak esetében a hídfők kialakítása műszakilag rendkívül összetett feladat. A hídfőkre jelentős függőleges teher adódik a hídszerkezetből, ezen kívül a hídra felvezető töltés földnyomásából adódó vízszintes földnyomást is fel kell tudja venni. A jelentős vízszintes erő hajlítást okoz a hídfő cölöpálozolásában is. A cölöpözött hídfők süllyedése igen csekély, csupán néhány centiméter, míg a mögötte megépülő töltés akár 60-120cm-t is süllyedhet. A jelentősen eltérő

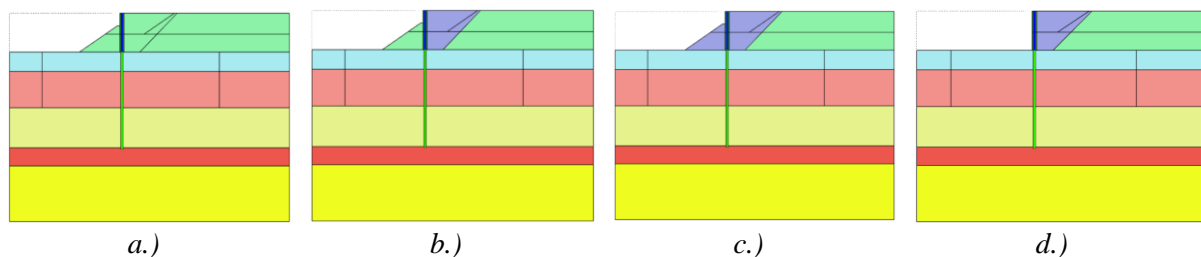
süllyedések mértéke és azok időbeli lefutása mind műszaki, mind pedig építéstechnológiai nehézségeket, problémákat generál.

Az egyik számítási példánk egy alföldi autópálya lehajtó hídjához készültek, ahol a konszolidációs idő csökkentése volt a cél. A számításokat kiterjesztettük a hídfőre ható erők és igénybevételek vizsgálatára is.

A számításokhoz Plaxis 2D geotechnikai végeeselemes szoftvert használtunk, amely lehetőséget biztosít az altalaj és a szerkezet együtt modellezésére, így a modellfuttatásoknál síkbeli modellgeometriát definiáltunk a hídfő keresztmetszetében. A vizsgálatok során 4 különböző esetet vizsgáltunk, amelyek az alábbiak voltak:

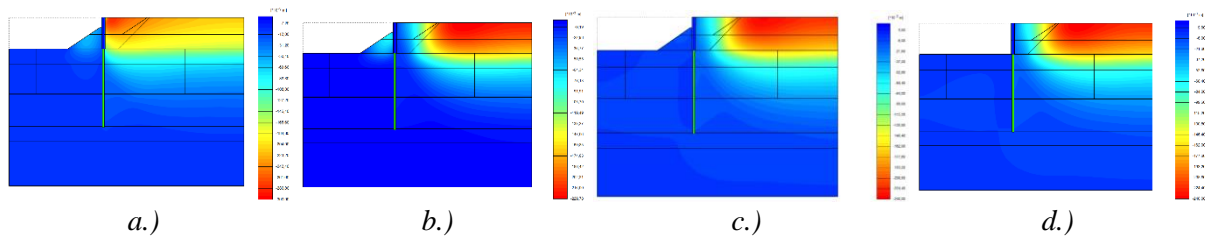
- Referencia modell: Mind az előtöltés, mind a háttöltés hagyományos útépitésben használt földműanyagból (M-1/M-2) készült.
- 1. eset: Az előtöltés hagyományos földműanyagból, míg a háttöltés Energocell üveghab-granulátumból készült
- 2. eset: Az előtöltés és a háttöltés is Energocell üveghab-granulátumból készült.
- 3. eset: Előtöltés nincs, a háttöltés Energocell üveghaból készült (esetleges útpályaszélesítés szimulációja).

A számítások során elsősorban az építési folyamatok utáni állapotban elemeztük a hídfő környezetének deformációs viselkedését, továbbá a szerkezeti elemekben ébredő igénybevételek alakulását a különféle lehetséges geometriai kialakítások során. Jelen eredmények bemutatásánál az építési hatásokra fókuszáltunk, azonban vizsgáltuk a folyótöltés felső síkján működő megoszló terhelés (forgalmi teher) hatását is, továbbá a hídfő felső részén ható fékezőerőből keletkező többlet igénybevételeket és mozgásokat. A vázolt 4 eset felépített modellgeometriája az 11. ábrán látható, ahol az üveghab feltöltést a szürke szín jelöli.

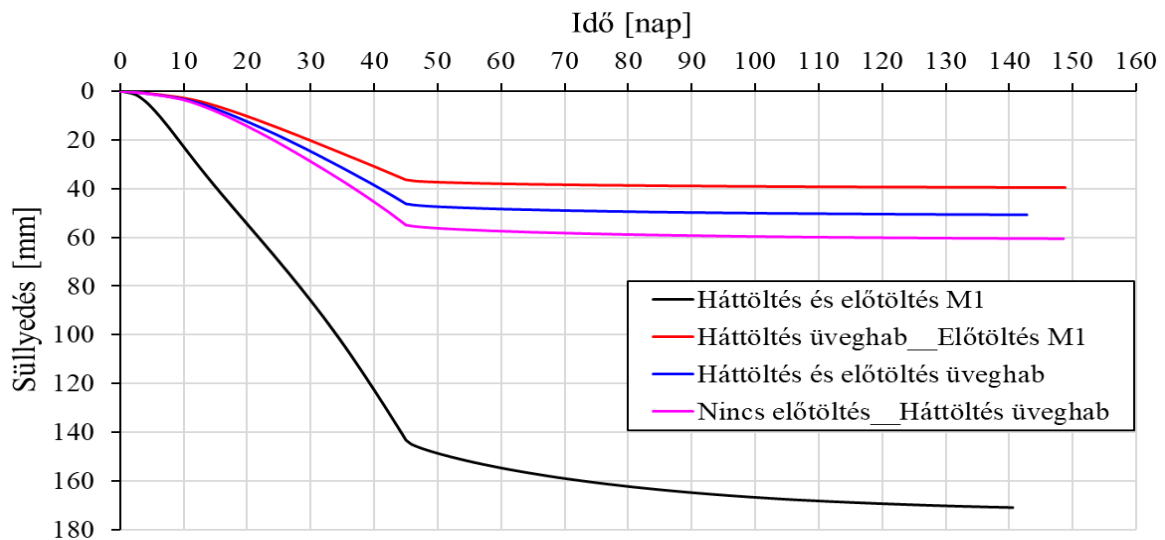


11. ábra: Modellgeometria - Referencia modell (a.); 1. eset (b.); 2. eset (c.); 3. eset (d.).

Az építési állapot utáni konszolidációs folyamatok hatására bekövetkező végleges elmozdulásokat 12. ábrán, míg a konszolidációs süllyedések időbeni alakulását 13. ábrán szemléltettük. Az építési időre a modellfuttatások során 45 napot definiáltunk, majd az építési fázis után egy konszolidációs számítást iktattunk be, ami addig fut, amíg a süllyedés el nem éri a 90%-os konszolidációs fokhoz tartozó alakváltozási értéket. A konszolidációs görbéken látható, hogy a süllyedések jelentős része már a 45 napos építési idő után lejátszódik, azonban hagyományos útépitésben használt földműanyagból készült elő- és háttöltés esetében további 3,00-3,50cm-es alakváltozások várhatóak az építés után megközelítőleg 3-3,5 hónapig, ezzel szemben üveghab-granulátum alkalmazásával asüllyedés véglegesnek tekinthető a földmunkák elkészítését követően. Ez a tendencia az üveghab alacsony önsúlyából ered, aminek köszönhetően nincs jelentős mértékű konszolidáció, valamint öntömörödés. Megfigyelhető, hogy az üveghab-granulátum alkalmazásával a maximális süllyedés közel az $1/4 \div 1/3$ -ra csökken, ami a konszolidációs idő felgyorsulására is hatással van.

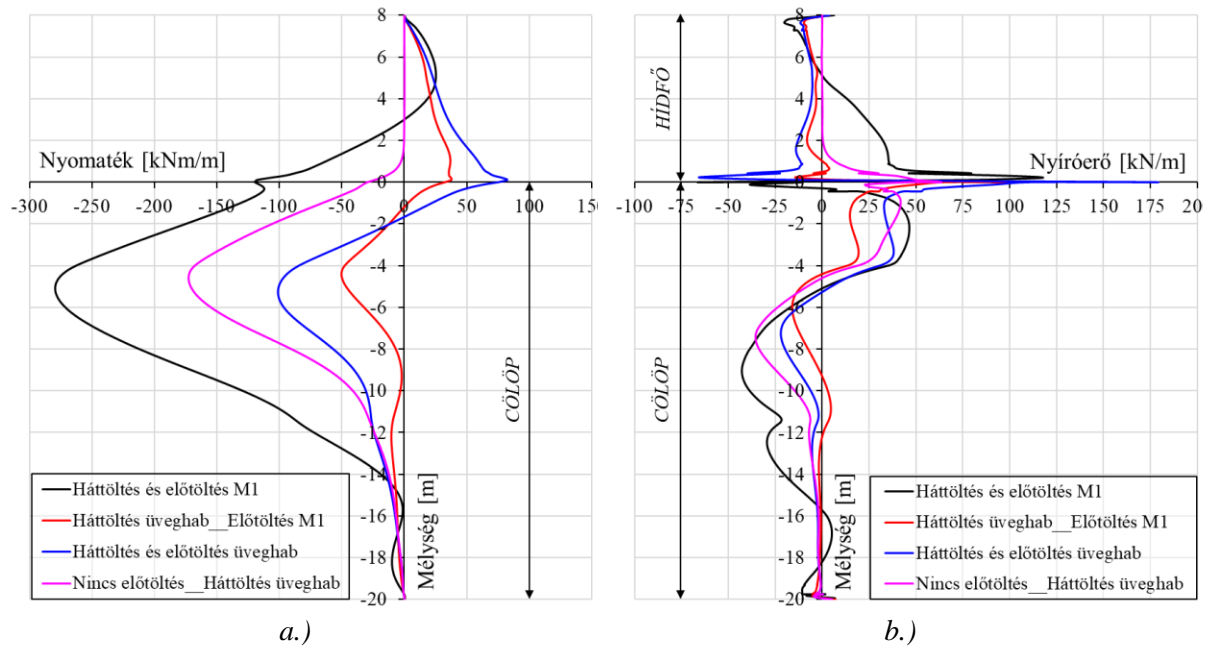


12. ábra: Alakváltozási ábra - Referencia modell (a.); 1. eset (b.); 2. eset (c.); 3. eset (d.).



13. ábra: Konszolidációs görbék.

A 14. ábrán a hídfőben és a cölöpökben ébredő igénybevételek alakulását ábrázoltuk a különböző elő- és háttöltés anyagok és geometriák hatására. Látható, hogy üveghab alkalmazása a háttöltés anyagaként kedvező hatással van a szerkezeti elemekben ébredő igénybevételekre is, nem csak az általaj alakváltozásaira. Az alacsony önsúly és a magas belső súrlódási szög miatt a hídfőfalra ható földnyomások mértéke jelentősen lecsökken, így az igénybevételek is. Mind alakváltozási, mind szerkezeti igénybevétel szempontjából optimálisabb esetnek bizonyul, ha a háttöltés üveghab-granulátumból, míg az előtöltés hagyományos útépítésben használatos földműanyagból készül, ugyanis az előtöltés ebben az esetben nagy mértékben stabilizálja a hídfőfal oldalirányú alakváltozásait magas önsúlyából adódóan. Ha az előtöltés üveghabból készülne, vagy teljes mértékben elhagyásra kerülne, úgy az igénybevételek és a mozgások is nagyobbak lennének, azonban még így is jelentősen kedvezőbb eredmény érhető el, mint hagyományos M-1/M-2 minőségű földműanyagból készülő háttöltések esetén.



14. ábra: Szerkezeti elemek igénybevételei – Nyomaték (a.); Nyíróerő (b.).

A konszolidáció gyorsítására, illetve előterhelés alkalmazására vonatkozó mennyiségeket, költségeket a tervezés során gyakran nem veszik figyelembe, holott ezek jelentős tételek is lehetnek, ami üveghab alkalmazásával szintén kiküszöbölhető.

Kedvezőtlen általajú területen (és gyakran még jó általajon is) a süllyedések mérséklése miatt alapozzák cölöpökre a hidakat, holott talajtörés elleni biztonságra gyakran már a cölöpösszefogó méretével azonos síkalap is megfelelő lenne. Azonban a süllyedések egy jelentős része a csatlakozó töltés miatt kialakuló süllyedési teknő miatt van. A könnyű háttöltésanyag alkalmazásával mind a háttöltés süllyedése, mind a konszolidációs idő jelentősen lecsökken, így már a hídfő is esetleg alapozható lenne síkalappal. Ezzel elmaradhat a cölöpözés, illetve a konszolidációs idő miatti szervezési problémák, többletköltségek.

Az egyes autópályák kapacitásbővítése során a főpálya szélesítéséhez, esetleg új csomóponti ágak építéséhez oldalirányban helyre van szükség, ami az előtöltés elbontásával oldható meg úgy, hogy a főpálya felett átívelő, meglévő hidakat meg lehessen tartani és ne legyen szükség azok elbontására, átépítésére. A vizsgálati eredmények alapján ebben az esetben is kedvezően alkalmazható üveghab-granulátum a háttöltés anyagaként, ugyanis az alacsony önsúlyának, illetve kedvező szilárdsági és alakváltozási paramétereinek köszönhetően megfelelően képes korlátozni a hídfőfalra ható földnyomások mértékét, valamint a pályaszerkezet alakváltozásait.

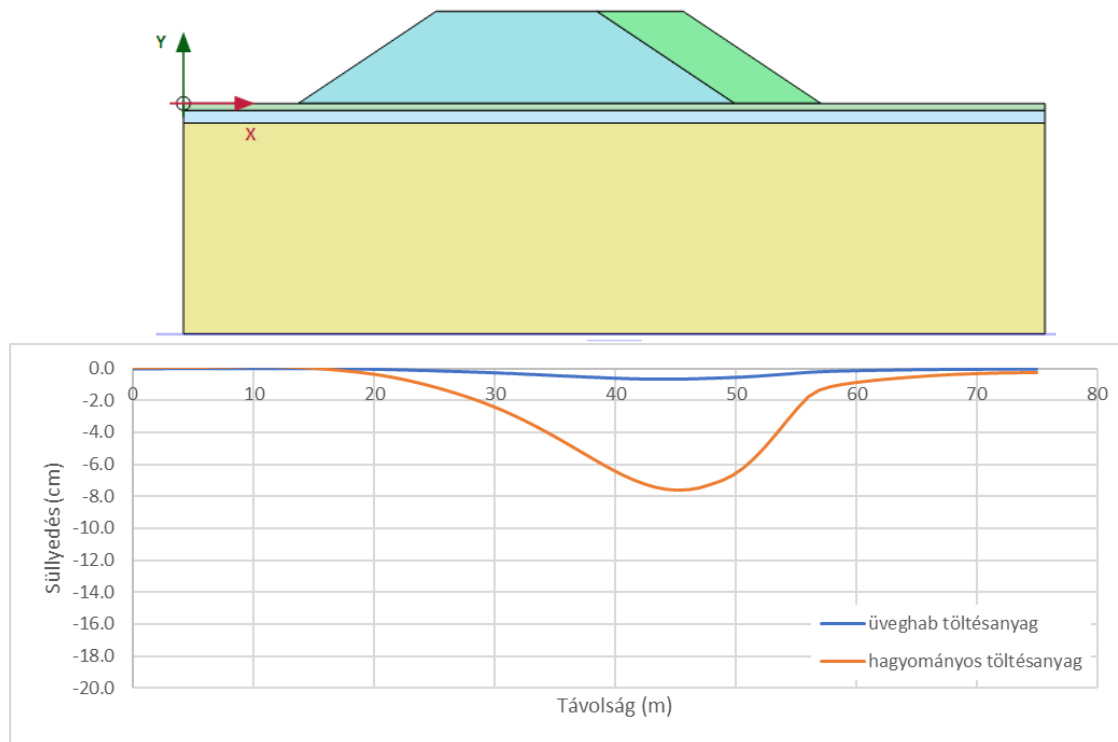
4.2. ÚTPÁLYA SZÉLESÍTÉS VIZSGÁLATA

Utak és autópályák szélesítésénél sokszor gondot okoz, hogy a töltéstest szélesítése többletsüllyedést generál a meglévő töltésrész alatt is, melynek hatására a meglévő burkolat megrepedezhet és károsodhat. Az ehhez hasonló süllyedések és károsodások elkerülése érdekében szintén célszerű lehet az üveghab töltésanyagként való alkalmazása, melynek térfogatsúlya egy nagyságrenddel kisebb a hagyományos földműanyagokénál, így a kialakuló süllyedések is jóval kisebbek lesznek. Az üveghab alkalmazásának lehetőségét egy Észak-Magyarországon található 2 sávú út négy nyomúsításának tervezéséhez készítettük.

Az út egy szakaszán egy 8 méter magas, 14 m koronaszélességű, 1:1,5-es rézsűjű útpálya töltés szélesítését vizsgáltuk, melynek keretében a koronaszélesség a megnövekedett forgalmi igények fogadása érdekében 22 m-re növekszik. Az általajt változó plaszticitású, de döntően közepes és kövér agyagok alkotják, melyben a konszolidáció igen lassan megy végbe. Az eredeti töltést hagyományos

töltésépítési anyagokból lett kialakítva, melynek hatására kialakuló süllyedések és alakváltozások az építés óta eltelt évtizedek során már lejátszódtak.

A töltésszélesítés hatására bekövetkező süllyedés meghatározására szintén a Plaxis 2D geotechnikai végeleemes szoftvert használtunk. A vizsgálat során két scenáriót elemeztünk: egyrészt azt az esetet, melynek során hagyományos, M-1/M-2 kategóriájú földműanyagból készül a szélesítés; míg a másik scenárióban üveghabból készül, melynek térfogatsúlya a szokványos töltésanyag 10%-a. A modellgeometriát és a kapott süllyedésprofilokat a 15. ábrán mutatjuk be.



15. ábra: Végeleemes modell és a számítás eredményeként kapott süllyedésprofil.

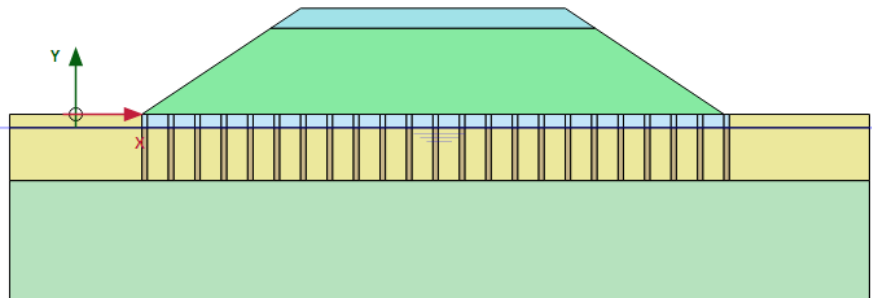
Ahogy azt a süllyedésprofilok is mutatják, üveghab alkalmazásával jelentős mértékben csökkenthetők a kialakuló süllyedések. Hagyományos kavicsos homokból készülő töltéstest esetén a várható süllyedés 8 cm körüli, míg üveghab alkalmazása esetén ez 7 mm-re csökkenthető. A süllyedések csökkentése nem csak a káros deformációk elkerülése szempontjából fontos, hanem a konszolidációs idő lerövidítése is jótékony hatással van a beruházás idő és költség keretére, ugyanis ezzel elkerülhető a konszolidációs folyamat kivárása, mely akár több hónapot hozzáadhat a kivitelezési ütemtervhez, illetve szintén elkerülhetők a többletköltséggel járó konszolidáció gyorsító beavatkozások (túltöltés, szalagdrének alkalmazása stb.).

4.3. PUHA, SZERVES TALAJON VEZETETT ÚT VIZSGÁLATA

A korábbiakhoz hasonlóan a vizsgált eset most is aktuális útépitéshez kapcsolódik, ahol az autópálya egy tőzeges szakaszon halad át. A tervezéshez készült talajmechanikai feltárások alapján a felső 5 m-es talajzónában nagyon puha tőzeg található, melynek összenyomódási modulusa az 1 MPa-t sem éri el.

A tervezett útpálya azon a szakaszon, ahol jelentős vastagságú tőzeget keresztez, két szakaszra lett felosztva: az első szakaszon a töltés 4,5 m magasságú, míg a második szakaszon egy hídra való felvezetés miatt 8 m magasságot ér el. A töltéstest felső 1,5 m vastag zónáját a pályaszerkezeti követelmények miatt hagyományos anyagokból, tehát a pályaszerkezetet aszfalt és Ckt anyagból, valamint az alatta lévő földmű felső 100cm vastag javító-védő rétegét M-1/M-2 anyagból vettük figyelembe a modellezés során. Az altalaj felső 1 m vastag zónájában talajcserét alkalmaztunk annak érdekében, hogy a töltés megépíthető legyen a puha tőzeges talajkörnyezetben. A süllyedések

csökkentése és a konszolidáció gyorsítása érdekében 5 m hosszúságú kavicscölöpök is betervezésre kerültek a töltés alá $D=60$ cm átmérővel és 2,0 m-es raszter kiosztással (16. ábra), melyek a mélyebben elhelyezkedő merev iszap rétegre támaszkodnak rá.



16. ábra: Végeselemes modell.

A süllyedések modellezését ebben az esetben is a Plaxis 2D geotechnikai végeselemes szoftverrel végeztük el. A számítások során vizsgáltuk a kialakuló süllyedéseket kavicscölöp nélküli kialakítás esetén is mind hagyományos, mind pedig üveghab töltésanyag esetére. A számításokat a mozgásokat legjobban modellező HSsmall talajmodell segítségével végeztük el, mely a talaj merevségét a feszültségviszonyok alapján veszi fel, így a süllyedések nagysága sokkal realisztikusabbra adódik, mint egyszerűbb anyagmodellek alkalmazásával. Az egyes kialakításokkal kapott süllyedéseket a 3. táblázatban összegeztük.

Töltés magassága	4,5 m	8 m
Hagyományos töltésanyag	59 cm	talajtörés
Hagyományos töltésanyag + kavicscölöp	29 cm	49 cm
Üveghab töltésanyag	23 cm	25 cm
Üveghab töltésanyag + kavicscölöp	10 cm	15 cm

3. táblázat: Végeselemes modellezés során kapott töltéssüllyedések különböző töltésmagasság és kialakítások esetén.

Amint azt a táblázat is mutatja, üveghab töltésanyag és kavicscölöp alkalmazásával az eredetileg több tíz centiméter nagyságrendű süllyedések 10 cm környékre szoríthatók le. Süllyedés korlátozás szempontjából az üveghab alkalmazása hatékonyabb megoldásnak tűnik a pusztán kavicscölöppel történő alátámasztásnál, mivel előbbi esetében a süllyedések 30-50cm nagyságrendet adnak, míg utóbbi esetében a süllyedések ~25cm körül maradnak.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A hulladékok újrahasznosítása segíti a fenntartható világ megteremtését. A hulladékból előállított termékek használatával elősegíthetjük a hulladék újrahasznosítást és csökkenthetjük a nyersanyagkészletek felhasználását. Az üveghab-granulátum üveghulladékból készülő, külsősgben és talajfizikai jellemzőkben a szemcsés talajokhoz hasonlító anyag.

A megszilárdult hab anyag, zárt pórusrendszerrel rendelkezik, aminek köszönhetően jó hőszigetelő képessége van, vizet nem vesz fel és a térfogatsűrűsége 1/10-e a talajénak. Durvaszemcsés anyagként jó vízvezető, a halmaz nyírószilárdsági paramétere a zúzottkőhöz hasonló a törtfelületű szemcsék miatt. Bár a szemcsék szilárdsága a talajszemcséknél jóval kisebb, azonban az útépitési földművekben adódó feszültségeknek biztonsággal ellenállnak. Az anyag tulajdonságai nagyon hasonlóak a szemcsés talajokéhoz, összenyomódási modulusa és E_{2d} teherbírási sajátmodulusa a homok talajokéhoz hasonlítható. Szemcsés tulajdonsága miatt jól tömöríthető, a hazai gyakorlatban használt építőgépekkel elvégezhető a bedolgozása. Az üveghab-granulátum inert anyag, így a talajjal és a talajvízzel nem lép

kémiai reakcióba, nem bomlik és nem szennyezi a környezetét, ezen tulajdonsága elengedhetetlen a mélyépítésben való felhasználásnál.

A talajoknál jóval kisebb önsúlya miatt az üveghab-granulátum az útépítésben számos műszaki problémára megfelelő megoldást tud adni. Az alacsony önsúly miatt rendkívül kis terhelést ad át az altalajra. Ennek köszönhetően az üveghab-granulátumból épített töltések esetében a süllyedések mértéke elhanyagolhatóan kicsi lesz, amik nagyon gyorsan le is zajlanak. A kis süllyedések és a konszolidációs problémák elkerülése megoldást jelenthet a híd háttöltések és a hídszerkezet közötti süllyedéskülönbségből eredő problémák hatékony kezelésére. Az elhúzódó konszolidáció miatt a hídépítés szervezési nehézségein is hatékonyan tud segíteni. Az alacsony önsúly miatti kis függőleges feszültségek elhanyagolható vízszintes földnyomást okoznak a hídfőn, így annak hídszerkezete és alapozása a hagyományosan alkalmazottakhoz képest átgondolható, optimalizálható lenne.

A puha, kompresszibilis altalajokon vezetett töltések esetében a talajtörés megakadályozását és a süllyedések csökkentését szolgáló töltésalapozások elhagyhatóak vagy csökkenthetőek lennének. Ezt kihasználva a kedvezőtlen területeken épülő töltések építése felgyorsítható lenne és vélhetően még a költségek is optimalizálhatóak lennének.

A munkánk során az üveghab talajmechanikai tulajdonságainak meghatározását és a vizsgálati eredményeket mutattuk be, amely paraméterekkel numerikus modellezéseket végeztünk különböző útépitési feladatok esetére. A számításaink szerint az üveghab-granulátumból készülő feltöltések készítésével az útépítésben tapasztalt műszaki problémák egy része hatékonyan megoldható lenne. Úgy véljük célszerű lenne az üveghab-granulátum útépítésben való felhasználhatóságát és előnyeit kihasználni, valamint további vizsgálatokat végezni az anyag további tulajdonságainak megismerése és a felhasználási kör bővítése érdekében.

6. IRODALOMJEGYZÉK

- Állami Közútkezelő Norvégia 2007: 2445. sz. Technológiai beszámoló
- Arulrajah, Arul et al. 2015: Engineering and Environmental Properties of Foamed Recycled Glass as a Lightweight Engineering Material. *Journal of Cleaner Production* 94: 369–75. <https://doi.org/10.1061/9780784480151.002>
- Bernardo, E., R. Cedro, M. Florean & S. Hreglich. 2007: Reutilization and Stabilization of Wastes by the Production of Glass Foams. *Ceram. Int.* 33(6): 963–68. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2006.02.010>
- Chindapasirt, P., & Ubolluk, R. 2011: Shrinkage Behavior of Structural Foam Lightweight Concrete Containing Glycol Compounds and Fly Ash. *Materials and Design* 32(2): 723–27. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.07.036>
- Guo, H. W., Wang, X. F., Gong, Y. X., Liu, X. N., Gao, D. N. 2010: Improved Mechanical Property of Foam Glass Composites Toughened by Glass Fiber. *Materials Letters* 64(24): 2725–27. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2010.09.012>
- Huszák, T., Papp, T. B., Szendefy, J., Mustafa, W., S. 2019: Az üveghab granulátum alakváltozási paramétereinek vizsgálata statikus terhelés hatására In: Huszák, Tamás (szerk.) 5. Kézdi Konferencia Pécs, Magyarország : Magyar Geotechnikai Egyesület, pp. 317-329. , 13 p.
- Horpibulsuk, S., Wijtchot, A., Nerimitknornburee, A., Shen, S. L. & Suksiripattanapong, C. 2014: Factors Influencing Unit Weight and Strength of Lightweight Cemented Clay. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 47(1): 101–9. <https://doi.org/10.1144/qjegh2012-069>
- Lu, J., Onitsuka, K., 2004: Construction Utilization of Foamed Waste Glass. *J. Environ. Sci.* 16(2): 302–7.
- Méar, F., P. Yot, M. Cambon, & M. Ribes 2006: The Characterization of Waste Cathode-Ray Tube Glass. *Waste Management* 26(12): 1468–76. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.11.017>
- Midha, S., Kim, T. B., Wouter van den B., Lee, P. D., Jones, J. R., Mitchell, C. A. 2013: Preconditioned 70S30C Bioactive Glass Foams Promote Osteogenesis in Vivo *Acta Biomaterialia* 9(11): 9169–82. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2013.07.014>

Qian, M., Q. Wang, L. Luo, and Ch. Fan 2018: Preparation of High Strength and Low-Cost Glass Ceramic Foams with Extremely High Coal Fly Ash Content *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 397(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/397/1/012071>

Sasmal, N., M. Garai, & B. Karmakar 2015: Preparation and Characterization of Novel Foamed Porous Glass-Ceramics *Materials Characterization* 103: 90–100. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2015.03.007>

Scheffler, M., Colombo, P. 2005: Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications. *Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim*: 669. <https://doi.org/10.1002/3527606696>

Szendefy J., Huszák T. 2018: Üveghab hőszigetelő ágyazati anyag mechanikai tulajdonságai *Geotechnika 2018 Konferencia, Velence, Magyarország*

Szendefy, J., Huszák, T. 2019: Geotechnical characterization of foamglass aggregate ECSMGE 2019 Reykjavik

Tompai, Z. 2008: Földművek és kötőanyag nélküli alaprétegek teherbírásának és tömörségének ellenőrzése könnyű ejtősúlyos módszerekkel *PhD értekezés BME Építőmérnöki Kar*

Tompai, Z. 2005: Tapasztalati határértékek - A statikus és dinamikus teherbírás modulus átszámíthatóságáról, *Mélyépítés*, 2005. július-szeptember, pp. 22-25.

Wang, Y. W., & Bai, X. T. 2012: Experimental Study of the Foam Agent in Lightweight Aggregate Concrete. *Applied Mechanics and Materials* 226–228: 1776–79. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.226-228.1776>

Yot, P. G., & F. O. Méar. 2009: Lead Extraction from Waste Funnel Cathode-Ray Tubes Glasses by Reaction with Silicon Carbide and Titanium Nitride. *Journal of Hazardous Materials* 172(1): 117–23. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.06.137>