



# Habosított bitumen aszfaltkeverékek kötőanyagaként

**Ali Saleh<sup>1</sup>, Gáspár László<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Széchenyi István Egyetem, 9026 Győr, Egyetem tér 1.

<sup>2</sup> KTI Nonprofit Kft., 1119 Budapest, Than Károly u. 3-5.

E-mail: [ali.b.saleh.090@gmail.com](mailto:ali.b.saleh.090@gmail.com), [gaspar.laszlo@kti.hu](mailto:gaspar.laszlo@kti.hu)

DOI: [10.36246/UL.2022.1.01](https://doi.org/10.36246/UL.2022.1.01)

## KIVONAT

Világszerte törekszenek az energiafelhasználás csökkentésére, ez alól az útépités sem kivétel. Ezt a célt, egyebek mellett, mérsékelten meleg aszfalt (WMA) gyártásával lehet elérni. Ez utóbbi kötőanyaga a habosított bitumen (foamed bitumen) lehet. Ekkor a keverési és a beépítési hőmérséklet a hagyományos aszfaltkeverékénél 20-40 °C-kal alacsonyabbnak választható. A bitumenhabosítás lényege, hogy a nyomás alatt levő, forró bitument vízzel együtt permetezik a keverőtérbe, ahol a bitumen felhabosodik, az adalékanyag szemcséihez a hagyományos aszfaltkeverékekénél tapasztaltnál hatékonyabban tapad. A cikk ennek a környezetkímélő aszfalgyártási eljárásnak egyes tervezési, technológiai, teljesítményi és ökológiai kérdéseit érinti, amelyeket egy folyó PhD-kutatás során tártak fel.

*Kulcsszavak:* bitumenhabosítás, habosított bitumen, mérsékelten meleg aszfalt, aszfaltlaboratóriumi vizsgálatok, környezetvédelem

## ABSTRACT

Efforts are being made to reduce energy consumption worldwide, and road construction is no exception. This goal can be achieved, among other things, by producing warm mix asphalt (WMA). The binder of the latter may be foamed bitumen. The mixing and laying temperatures can then be selected to be lower by 20-40 °C than those of the conventional asphalt mix. The idea of bitumen foaming is that the hot bitumen under pressure is sprayed together with water into the mixing chamber, where the bitumen foams, adhering to the aggregate grains more efficiently than in conventional asphalt mixtures. The article addresses some of the design, technological, performance, and ecological issues of this environmentally friendly asphalt manufacturing process that have been revealed in an ongoing PhD research.

*Keywords:* bitumen foaming, foamed bitumen, warm mix asphalt, asphalt laboratory tests, environmental protection

### **Ali Saleh**

*Okl. építőmérnök, diplomáját 2015-ben szerezte a Thisreen Egyetemen (Szíria), habosított bitumen témában; Latakia kikötőben különböző mérnöki feladatokat hajtott végre; 2020 szeptembere óta a Széchenyi István Egyetemen, Győrben, Stipendium Hungaricum ösztöndíjas, PhD-hallgató, 6 publikáció szerzője.*

### **dr. Gáspár László**

*PhD, DSc, okl. mérnök, okl. gazdasági mérnök, 1971 óta a KTI Nonprofit Kft. alkalmazottja, jelenleg kutató professzor, 1999 óta a Széchenyi István Egyetemen, Győr dolgozik, most professzor emeritus, 459 publikáció szerzője, amelyekre 730 független hivatkozás ismert, 621 szakmai előadást tartott.*

## 1. BEVEZETÉS

Az utóbbi évtizedekben számos kutató foglalkozott környezetbarát útépitési, -felújítási és -fenntartási technológiák kifejlesztésével. A leglényegesebbnek tekinthető újdonság a mérsékelt meleg aszfalt (WMA, Warm Mix Asphalt) technológiájának kidolgozása volt, amelynek három kategóriája a következő [1]:

- szerves adalékszerek alkalmazása,
- kémiai adalékszerek alkalmazása,
- habosított bitumen használata.

A világszerte elterjedt technológiák közel 60%-a habosított bitumen kötőanyagot választott. A bitumen mintegy 15-szörös térfogatnövekedéssel járó habosítása azzal az előnnyel jár, hogy aszfaltkeverék készítésekor a kötőanyag – időlegesen elért – kisebb viszkozitása és nagyobb fajlagos felülete lehetővé teszi annak az adalékanyagvázbán való hatékonyabb eloszlását.

A bitumenhabosítási paraméterekre vonatkozó – a víztartalom és a keverési hőmérséklet által befolyásolt – szabványos követelmények a következők:

- expanzió (térfogatbővülés): a habosítás előtti bitumentérfogatra vonatkoztatva,
- felezési idő: az az időtartam, ameddig a bitumenhab térfogata a habosítás után felére csökken [2],
- habindex: a bitumenhab összehúzóási görbéje alatti, meghatározott határok közötti terület, amely a bitumen habosíthatóságának jellemzője, adott habosítási vízmennyiség adagolása mellett [3],
- a félig stabil buborékok „összeomlási” aránya (k-érték): a habosított bitumen felületének előírt időnként készült fényképfelvételek alapján végzett elemzése, amelyből az összeomlás folyamatáról és a buborékméret eloszlásáról lehet tájékozódni, 1 %-nyi víz adagolása mellett [4].

## 2. BITUMENES HABOSÍTÁSI TECHNIKÁK

A Csanyi által 1959-ben szabadalmaztatott [5], habosított bitumen gyártási folyamatának lényege, hogy speciális gépekben, forró bitumenbe, előírt nyomáson, hideg vizet fecskendeznek be. Különböző technológiákat alkalmaznak, amelyekben a bitumen tömege 1-3%-nyi, a bitumen hőmérséklete 140-200 °C-os és a légnyomás 100-1000 kPa-t tesz ki. A habosítási folyamat során, a kötőanyagban levő vízgőzt kisebb-nagyobb vízbuborék formájában bitumennel bevonják.

A habosított bitument közutakon az 1950-es évek közepén hasznosították először, a gőzzel habosított forró folyékony bitument talajok és burkolat- alap szilárdítására alkalmazták. 1968-ban a Mobil Oil Australia gőzbefecskendezéssel javította a kezdeti habosítási technikát, amely lehetővé tette a víz hozzáadását a tágulási kamrában [6]. A habosított bitument számos anyag stabilizálására használták, beleértve a bontott aszfaltot (RAP, Reclaimed Asphalt Pavement Material) hidegen való újra hasznosítását. A habosított bitumen bevonó képességének és bedolgozhatóságának javítása érdekében, a kötőanyagot különböző hőmérsékletre előmelegített adalékanyagokkal keverték össze.

Az 1990-es években a habosított bitumen speciális berendezésgyártója, a Wirtgen GmbH folytatta a habosított bitumen gyártási folyamatának fejlesztését olyan adagolórendszer előállításával, amely víznek légnyomás melletti befecskendezését alkalmazza [7].

Ezt a rendszert számos, jelenleg használt habosított bitumen hideg újra hasznosító berendezésben alkalmazzák, amelyben az anyag átmeneti alacsony viszkozitású állapotát tudják előállítani, amikor is az, a térfogat növekedése mellett, folyékonyból gőz halmazállapotúvá válik.

A bitumenbuborékok adalékanyaggal való súrlódás során történő aprózódása következtében keletkező „törmelék” az adalékanyag finom részecskéihez tapadnak. Nyomás alatt, pedig olyan bitumenmasztixszá válnak, amely az addig bevonatlan adalékanyag szemcséket képes megkötni [8].

A legújabb habosítási technológiák zeolitok, azaz a belső szerkezetükben mintegy 18-20 m%-nyi vizet tartalmazó fémadalékok beépítésén alapulnak; a zeolit adagolási aránya az aszfalt teljes kötőanyagára vonatkoztatva 5%-os [9]. A zeolitok – a belső szerkezetükben tárolt víz fokozatos felszabadulásának köszönhetően – a bitumen habosodását lehetővé teszik. A zeolitos víz kibocsátása a kristályos szerkezetből hosszú távú folyamat. Ezért lehetséges – a gyártás, az építés és a tömörítés során – a mérsékelt meleg aszfaltkeverék (WMA) megmunkálhatóságának javítása [10].

### 3. A HABOSÍTOTT BITUMEN ALKALMAZÁSA, ELŐNYÖKKEL ÉS KORLÁTOKKAL

A habosított bitumennel történő stabilizálás megnövekedett nyírószilárdságra, kohéziós szilárdságra, nagyobb hajlítószilárdságra és nedvességállóságra vezet [11].

A habosított bitumenkeverékek megfelelősége főként az adalékanyag-szemcsék egymásba kapcsolódási (interlocking) erőtől függ, míg a meleg aszfaltkeverékek mechanikai teljesítményét azok maszti-kohéziójának és az adalékanyagok egymásba kapcsolódási erőinek kombinációja határozza meg [12].

A habosított bitumennek nagyon sok granulált anyaggal szemben tapasztalt kompatibilitása következtében, jelentős mértékben hozzájárul az útépitések fenntarthatóságához; szükség esetében, adalékszer-kombinációk is hozzáadhatók [13].

Az aszfaltkeverék tervezésekor az egyik legfontosabb kritérium a habosított bitumen kötőanyag szükséges mennyisége. Nagy kötőanyag-tartalom esetében, a hatékony bitumenes kötőhatás eléréséhez, viszonylag sok finom ásványi anyagra van szükség. Az irányelvek azt javasolják, hogy az optimális habosított bitumenes kötőanyag-mennyiséget a közvetett húzószilárdság (ITS) és a habosított bitumentartalom közötti kapcsolat alapján kell kiválasztani [14]. Egyes kutatók azt ajánlják, hogy az optimális kötőanyagtartalmat a merevségi modulus értéke alapján határozzák meg.

A habosított bitumen világszerte az útépitésben meglehetősen sok alkalmazási területre talál. Ezek között a legelterjedtebbek a hidegaszfalt rétegek, a helyszíni talajstabilizálás és a régi aszfaltburkolatok újra hasznosítása. Előnyének tekintik, hogy a bitumenemulzióéhoz képest, rövidebb a kötési ideje.

Kedvező körülmény, hogy a habosított bitumen kötőanyagú aszfaltkeverék bitumen-lefolyás vagy kioldódás nélkül tárolható. Tekintettel arra, hogy ez az aszfalttípus a szokásosnál hosszabb ideig bedolgozható marad, a tömörítéssel és a felületképzéssel kapcsolatos időbeli korlátok érdemlegesen kitolódnak. Az is egyértelműen előnyös tulajdonsága, hogy a habosított bitumennel készült aszfaltkeverékek kedvezőtlen időjárási körülmények között is beépíthetők anélkül, hogy annak jó minőségét veszélyeztetnénk.

Az elmúlt években számos, a habosított bitumennel kapcsolatos kutatási munka az anyag teljesítményének értékelésére és leromlási folyamatának nyomon követésére irányult. A tanulmányok kimutatták, hogy a habosított bitumenes kötőanyagú aszfaltkeverékek öregedési (leromlási) sebessége a magasabb hőmérséklettel és a bitumenhabosítás során alkalmazott víztartalom mennyiségével közvetlen kapcsolatba hozható. További lényeges kutatási irány az éghajlatváltozás veszélyeivel és a jó minőségű, elsődleges, útépitési alapanyagokkal való takarékoskodással összefüggő, döntési lehetőségek feltárása. Ebbe a sorba tartozik olyan aszfaltkeverékek gyártása, valamint stabilizációs technológiák alkalmazása, amelyek habosított bitument és újra hasznosított adalékanyagokat is tartalmaznak [16]. Ezeket az anyagokat különböző forgalmi terhelésű útpályaszerkezetek egyes rétegeiben hasznosítják.

### 4. A HABOSÍTOTT BITUMEN MINŐSÉGI PARAMÉTEREI ÉS AZOK OPTIMALIZÁLÁSA

A habosított bitumen minősége elsősorban a következő paraméterektől függ [4]:

- a bitumen típusa és eredete,
- a bitumen hőmérséklete a habosítás során,
- a habosított bitumen permetezési aránya,
- habot stabilizáló adalékok alkalmazása,
- a habosítási eljárás során használt víz mennyisége,
- a felhasznált víz hőmérséklete,

- a felhasznált levegő mennyisége.

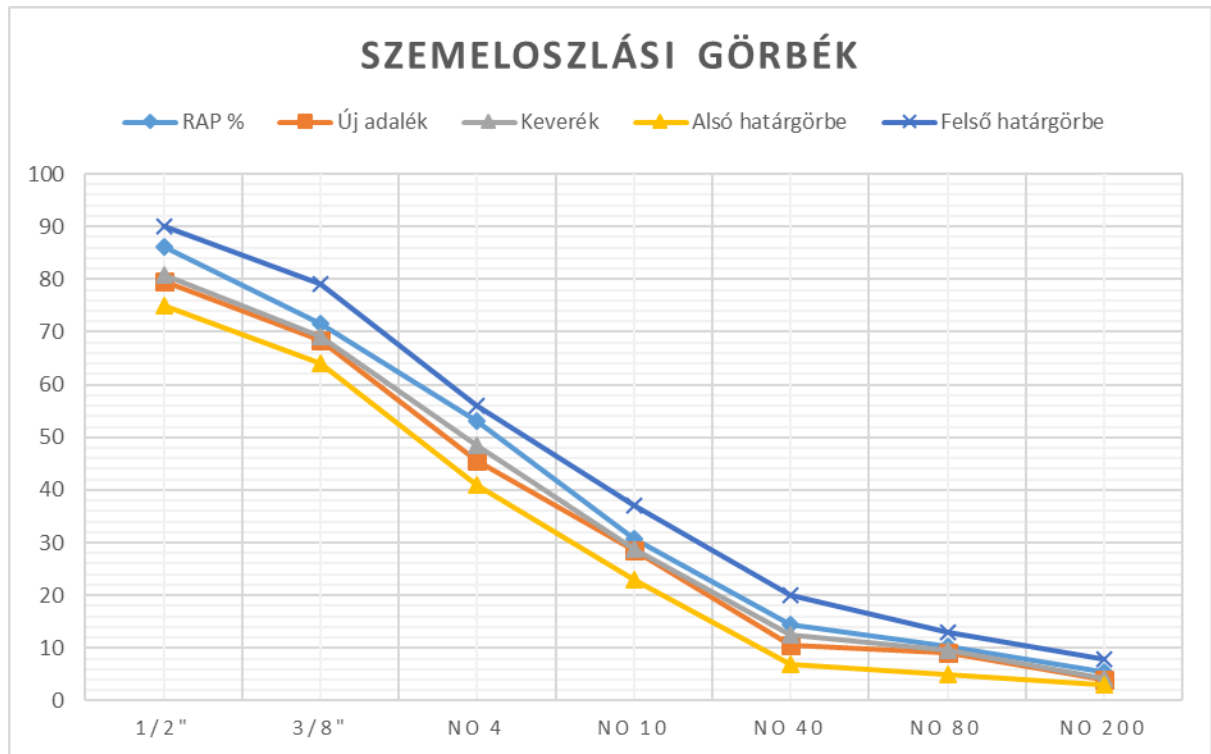
A szilárdulás (curing) az a folyamat, amelynek során a habosított bitumenkeverékek (FBM), a víz térfogatnövekedése során, szilárdabbá vagy merevebbé válnak. A folyamat meglehetősen bonyolult, mivel a víz a habosított bitumenkeverék tervezésének egyes szakaszaiban különböző szerepet játszik. A habosított bitumenkeverékek szilárdulását befolyásoló tényezők a következők:

- hőmérséklet,
- páratartalom,
- szél,
- az adalékanyag szemeloszlása és más jellemzői,
- rétegvastagság,
- a víz kezdeti mennyisége,
- kötőanyag,
- cement- vagy adalékszer-tartalom,
- a legfelső pályaszerkezeti réteg,
- a vízelvezetési rendszer állapota,
- forgalmi terhelés.

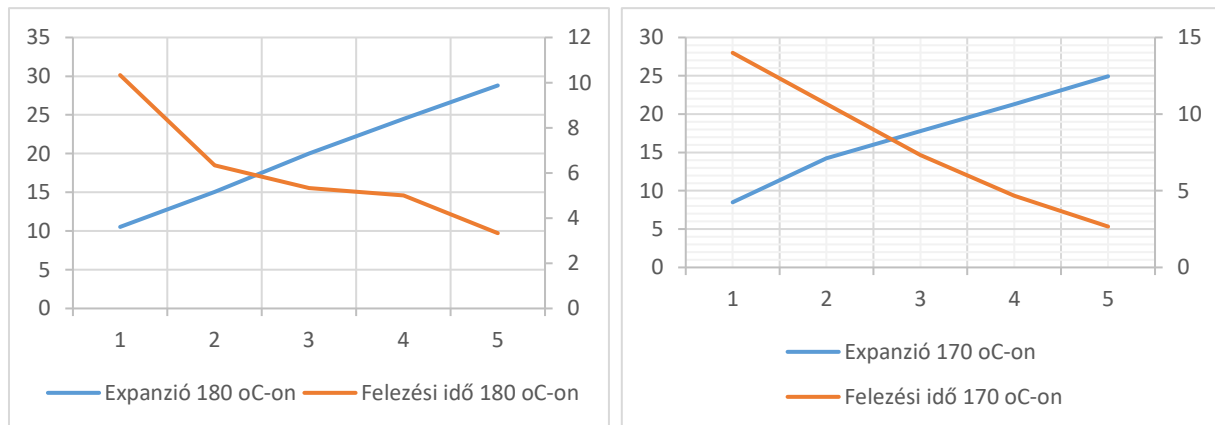
A hagyományos aszfaltkeverékek gyártásánál a lényeges kötőanyagjellemzők a penetráció, a lágyuláspont és a viszkozitás; a habosított bitumennél azonban ezek a jellemzők nem elegendők. A legnagyobb térfogatnövekedési arány és a felezési idő is a kötőanyag típusának jellemzésére szolgál. A legnagyobb térfogatnövekedési arány – a habosítási eljárás utáni bitumentérfogat és a kezdeti térfogat aránya – a maximális tágulási arány pedig közvetlenül az ismert térfogatú edénybe történő permetezés után határozható meg. Ez a paraméter a habosított bitumen viszkozitását jellemezi, és a habosított bitumen nedvesítő képességével és a gyártott aszfaltkeverék bedolgozhatóságával is kapcsolatban van. A felezési idő az az időtartam, amely azon időpontok között telik el, amikor a habosított bitumen eléri maximális térfogatát, majd pedig ennek az értéknek a felét. A felezési idő a habosított bitumen stabilitásának mértéke, és arányos az aszfaltkeverék előállításához rendelkezésre álló idővel.

Egy közelmúltbeli szíriai kutatás az aszfaltkeverékekre összpontosított, amelyeket részben újrahasznosított aszfaltból (RAP) származó adalékanyaggal állítottak elő. A bitumenes habosítási paramétereknek a habosított bitumen minőségére és a habosított bitumenes kötőanyaggal készült aszfaltkeverékek Marshall-stabilitására gyakorolt hatását mérték fel [15, 16]. Az adalékanyag-keveréknek 50%-át „szűz” és 50%-át bontott aszfalt képezte, gyakorlatilag ugyanolyan szemeloszlással (1. ábra). Ez utóbbi kötőanyaga PG 76-28 típusú volt. (A PG – Performance Grade – jelzés az amerikai Superpave (SUPERior PERforming Asphalt PAVements, Különlegesen Kedvező Teljesítményű Aszfaltburkolatok) szabályozás szerint, olyan kötőanyagokra vonatkozik, amelyek magas burkolati hőmérsékleten a nyomvályú-képződésnek és alacsony burkolati hőmérsékleten a termikus repedésnek ellen tudnak állni [17]). A kutatás során, a habosított bitument 1-2-3-4%-os víztartalommal, valamint 160, 170 és 180 °C-os bitumen hőmérséklettel tervezték, háromféle bitumenhez (50-70-es, 70-100-as és 60-70-es penetrációjú szortékhoz). Az előállított különféle habosított bitumen-változatok minőségét az elterjedt mutatókkal (térfogatváltozási arány és a felezési idő) jellemezték (1-3. ábra) [18].

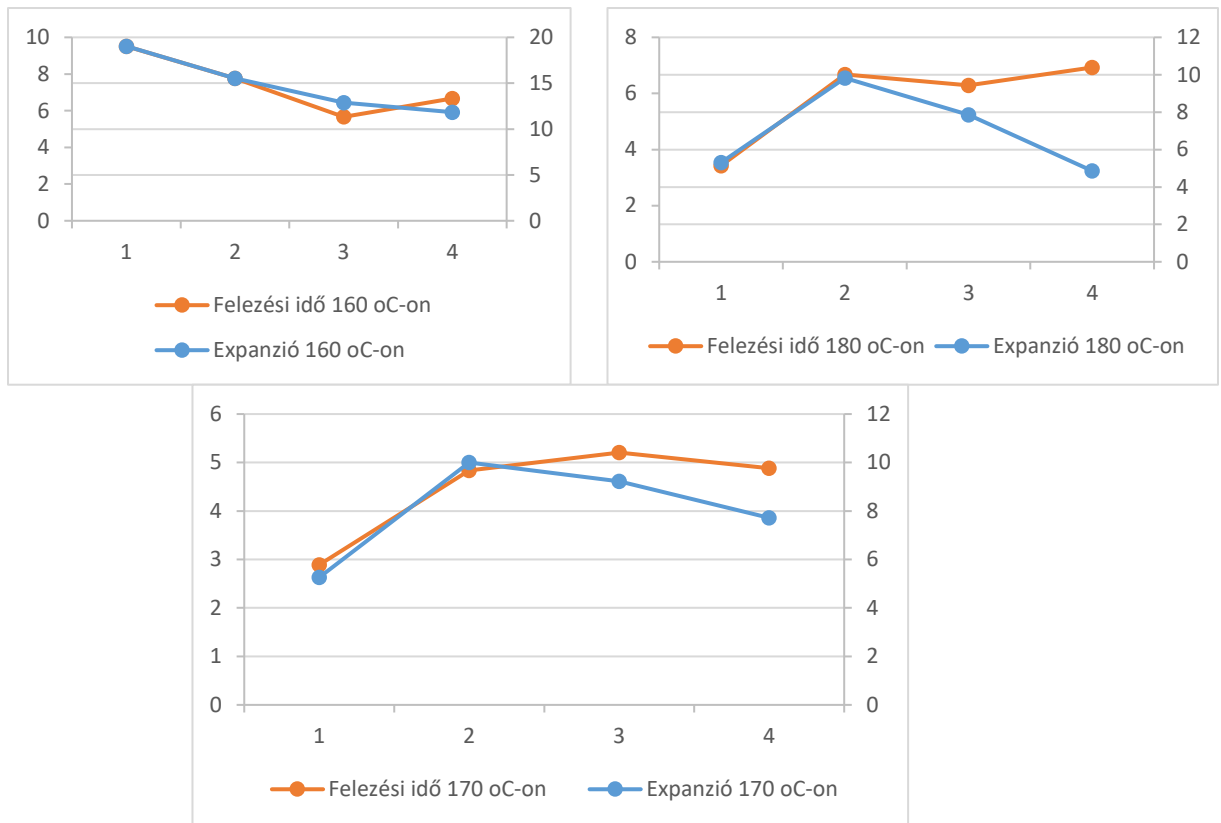
Az optimalizáló vizsgálat eredményeként, a 3. ábrán látható, hogy habosított bitumen esetében, 160°C-os hőmérsékleten az optimális víztartalom 2,5%-nyinak adódott.



1. ábra. (a): Az ásványi anyagkeverék és egyes elemeinek szemeloszlása.



2. ábra. A 60-70-as penetrációjú bitumen habosítási paramétereit.

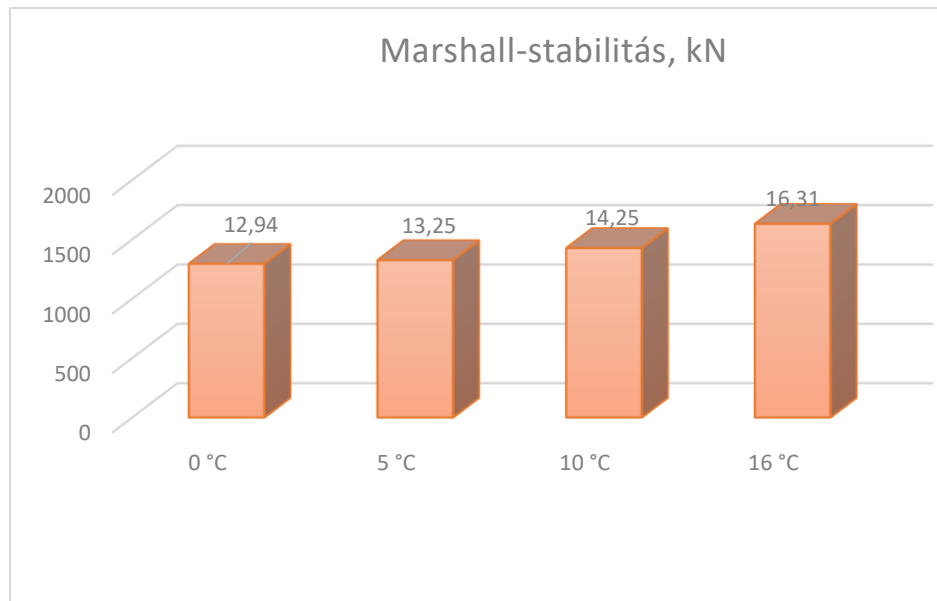


3. ábra. A 70-100-as penetrációjú bitumen habosítási paramétereit.

Az elővizsgálat során optimálisnak bizonyult technikával előállított, habosított bitumént kötőanyagként választott aszfaltkeverékeket laboratóriumban, 0, 5, 10 és 16 °C-os léghőmérsékleten vizsgálták. Annak megállapítására törekedtek, hogy az expanzió és a felezési idő kombinálásával kapott ún. Habindex (Foam Index) mekkora víztartalom mellett bizonyul a legkedvezőbbnek. A 2,5 %-nyi habosított bitumen kötőanyagú aszfaltkeveréket mechanikus laboratóriumi keverőberendezésben gyártották. A keveréktervezéshez 2x75 ütéssel készült Marshall-próbatestek minőségjellemzőit vették alapul. Az 5. ábra azt szemlélteti, hogy a habosított kötőanyagú aszfaltkeverékek Marshall-stabilitása (kN) a léghőmérséklet függvényében hogyan változik. Látható, hogy a csökkenő hőmérséklet hatására némileg kisebb Marshall-stabilitás mérhető. Ennek okát az aszfalt próbatestekben levő nedvesség „aktiválódásában” és az anyag keménységének változásában lehet megtalálni. A bitumencseppek hőmérséklete hirtelen csökken, és viszkozitása megnövekszik, amikor a hideg adalékanyagokkal kapcsolatba kerülnek. Ebből adódóan, a kisebb mértékű adhézió gyengébb keverékminőséghez vezet, mivel nem mindenhol tud az ásványi anyag szemcséi körül homogén mátrix kialakulni.

Megállapították, hogy a habosított bitumen kötőanyagú aszfaltkeverékek az alacsony hőmérsékletre kevésbé érzékenyek, mint a hagyományos összetételűek.

Annak érdekében, hogy a habosított kötőanyagú aszfaltkeverékek hosszú távú teljesítményét (állapotváltozását) reálisan fel lehessen mérni, a következő, időjárási szélsőségeken tapasztalható minőségjellemzők jövőbeni meghatározására lesz szükség: fáradással szembeni ellenállás, keréknyomvályú-képződéssel szembeni ellenállás, törési energia.



4. ábra. A habosított kötőanyagú aszfaltkeverékek különböző hőmérsékleteken mért Marshall-stabilitása (kN).

## 5. NÉHÁNY KÖRNYEZETVÉDELMI SZEMPONT

A mérsékelt meleg keverékek Útügyi Műszaki Előírásai [19] szerint, azok gyárthatók a hagyományos aszfaltok maximális hőmérsékletén is (180 °C), ám ezzel energiaszükséglet nem takarítható meg. Amennyiben csak a HMA által megengedett legkisebb, 140 °C-os gyártási hőmérséklethez tartozó energiafelhasználás értékeit vizsgálják, ahhoz képest a bitumenhabosításos technológiával gyártott keverékek előállításakor, jelentősen alacsonyabb energiaigény érhető el [20], 185 MJ/t helyett 155 MJ/t, mintegy 16%-os csökkenéssel. Ha az egyes aszfaltkeveréktípusoknak azok átlagos gyártási hőmérsékletén kapott eredményeit veszik vizsgálat alá, akkor a hagyományos aszfaltkeverékekre 204 MJ/t, bitumenhabosításon alapuló technológiával készült keverékekre pedig 175 MJ/t kapható, ami mintegy 14%-os csökkenésnek felel meg.

A két aszfaltkeveréktípus előállításakor keletkezett CO<sub>2</sub>-emisszió nagyságát, kg/t mértékegységben, összehasonlították. A szimuláció eredményei azt mutatták, hogy mind a fűtőolaj, mind pedig a nagyobb fűtőértékű gáz fűtőanyag alkalmazása esetében, a bitumenhabosításos technológia alkalmazásával átlagosan 17%-os csökkenés érhető el, (Megjegyzendő, hogy ha a habosított bitumen kötőanyagú aszfaltkeveréket a technológiai szempontból még megengedett legalacsonyabb hőmérsékleten gyártanák, a CO<sub>2</sub>-emisszió mértékében elért megtakarítás a 19 %-ot is elérné.)

Ennek a cikknek a szerzői, másik publikációjukban [21] rámutattak arra, hogy az előbbieken felvázolt környezetvédelmi előnyöket jelentősen meghaladó mértékű csökkenés érhető el az energiafelhasználás és a káros anyag kibocsátás tekintetében, ha a habosított bitumen kötőanyag mellett, az adalékanyag érdemleges részét bontott aszfalt képezi [22].

## 6. ÖSSZEFOGLALÓ MEGJEGYZÉSEK

Az új aszfaltkeverékek készítése és beépítése, közismerten, nagy mennyiségű üvegházhatású gáz kibocsátásával jár. A habosított bitumen mérsékelt meleg aszfaltkeverékben, helyszíni és telepi talajstabilizációs technológiákban, valamint bontott aszfaltok újra hasznosítási eljárásaiban való alkalmazása az említett probléma jelentős mértékű csökkentését teheti lehetővé.

A habosított bitumen (foamed bitumen) keverési és beépítési hőmérséklete a hagyományos aszfaltkeverékénél 20-40 °C-kal alacsonyabbnak választható. Ezzel jelentős mennyiségű megtakarítás érhető el az energiafelhasználásban és az üvegházhatású gázok mennyiségében.

A cikk olyan laboratóriumi vizsgálatokról is beszámol, amely egyrészt a bitumenhabosítási eljárás optimalizálását tűzte ki céljául, másrészt pedig a habosított kötőanyagú aszfaltkeverék Marshall-

stabilitásának hőmérséklettől való függéséről szolgáltat információt. Emellett ennek a környezetkímélő aszfalgyártási eljárásnak olyan tervezési, technológiai, teljesítményi és környezetvédelmi kérdéseit is érinti, amelyeket egy folyó PhD-kutatás során tártak fel.

## 7. IRODALOMJEGYZÉK

- [1]: Zaumanis, M. 2014: Warm mix asphalt. In *Climate Change, Energy, Sustainability and Pavements* (pp. 309-334). Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-44719-2\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-662-44719-2_10).
- [2]: Balázs J. 2014: Hideg remix eljárások hazai alkalmazása a külföldi gyakorlat tükrében. BME Infrastruktúra-építőmérnök MSc diplomamunka, 105 p.
- [3]: Newcomb, D.E., Arambula, E., Yin, F., Zhang, J., Bhasin, A., Li, W., Arega, Z. 2015: Properties of Foamed Asphalt for Warm Mix Asphalt Applications. Washington DC, NCHRP Report 807 Transportation Research Board, 126 p..
- [4]: Bairgi. B.K., Tarefder, R.A. 2017: A Synthesis of Asphalt Foaming Parameters and Their Association in Foamed Binder and Mixture Characteristics. ASCE Proceedings, T&DI Pavement Conference, PA, USA, pp. 256-267, <https://doi.org/10.1061/9780784480939.023>.
- [5]: Csanyi, L. 1957: Foamed asphalt in bituminous paving mixtures. Highway Research Board Bulletin 160, pp. 108-122.
- [6]: Adams, T. 2022: Foamed Bitumen – from an Australian perspective. GRT Product Finder In Industry Articles, pp. 3, <https://globalroadtechnology.com/foamed-bitumen-from-an-australian-perspective/>.
- [7]: Wirtgen, 2012: Wirtgen cold recycling technology. Wirtgen GmbH Windhagen, Germany, 370 p.
- [8]: Sabita, 2020: Technical guideline: Bitumen stabilised materials. A guide for the design and construction of bitumen emulsion and foamed bitumen stabilised materials, Southern African Bitumen Association, pp. 221.
- [9]: PQ Corporation 2012: Production, testing and compaction details. Advera WMA. Warm mix asphalt, 38 p.
- [10]: Pitawala, S., Sountharajah, A., Grenfell, J. 2019: Experimental characterisation of fatigue damage in foamed bitumen stabilised materials using dissipated energy approach. *Constr. Build. Mater.*, 216, pp. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.267>
- [11]: Zaumanis, M., Cavalli, C., Poulidakos, L. D. 2020: Effect of rejuvenator addition location in plant on mechanical and chemical properties of RAP binder. *Int. J of Pave. Eng.* (21) (4) pp. 507–515. <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1492133>.
- [12]: He, G., Wong, W. 2007: Laboratory study on permanent deformation of foamed asphalt mix incorporating reclaimed asphalt pavement materials, *Constr. Build. Mater.*, 21 (8), pp. 1809–1819, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.024>.
- [13]: Fu, P., Jones, D., Harvey, J. T., Halles, F. A. 2010: Investigation of the Curing Mechanism of Foamed Asphalt Mixes Based on Micromechanics Principles. *J. Mater. Civ. Eng.*, 22 (1), pp. 29–38, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000009](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000009).
- [14]: Saleh, A., Gáspár, L. 2021: Advantages and limitations of using foamed bitumen. *Acta Technica Jaurinensis* Vol. 14, No. 3, 10 p., <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.00587>
- [15]: Huan, Y., Jitsangiam, P., Nikraz, H., R. Grant 2012: Mechanical Characteristics of Foamed Bitumen Mixtures in Western Australia. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Inter Conf on Transp Geotech, Sapporo, Japan, pp. 309-314.
- [16]: Saleh, A., Gáspár, L. 2021: Performance of foamed bitumen bound asphalt mixtures under various mixing and compaction temperatures. *World Wide Journal of Multidisciplinary Research and Development*, Volume 7, Issue 12, pp. 15-21. <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/NRCMB>
- [17]: Martin Asphalt Company 2016: Performance Graded Asphalts – Product Data Sheet. MARTIN Asphalt Company, 1 p.



[18]: Jenkins, K. J., van de Ven, J. L., de Groot, A. 1999: Characterisation of Foamed Bitumen 7th Conference on Asphalt Pavements M. F. C. for Southern Africa, 18 p.

[19]: e-UT 05.02.11. 2018: Útpályaszerkezeti aszfaltburkolatok keverékeinek követelményei. Útügyi Műszaki Előírás 61 p.

[20]: Nádas R. 2015: Aszfaltkeverékek energiatartalmának vizsgálata. Útügyi lapok 3 (6) 8 p.

[21]: Saleh, A., Gáspár, L. 2021: Functional and environmental impacts of the use of reclaimed asphalt pavement materials and of foamed asphalt. Acta Technica Jaurinensis 14 (2) <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.00590>

[22]: Saleh, A. 2019: The possibility of design the asphalt mixture using foamed asphalt, Tishreen University Journal. - Engineering Sciences Series (41) (3) [Online]. Available: <http://journal.tishreen.edu.sy/index.php/engscnc/article/view/8779>.



# Az Útügyi Műszaki Előírások szerepe az útépítésre vonatkozó szabályrendszerben

## Hajós Bence

Első Lánchíd Bt.

E-mail: [elsolanchid@elsolanchid.hu](mailto:elsolanchid@elsolanchid.hu)

DOI: [10.36246/UL.2022.1.02](https://doi.org/10.36246/UL.2022.1.02)

### Hajós Bence

*Okleveles építőmérnök, okleveles mérnöktanár. Hídszakértő, hidtervező. Korábban az állami közútkezelő hidásmérnöke volt. Elsődleges szakterülete a hidvizsgálat, hidak teherbírás vizsgálata.*

## 1. ELŐJÁRÓBAN

Az Útügyi Műszaki Előírásokat a 2017-ben megjelent 16/2017. (V.25.) NFM rendelet új keretrendszerbe helyezte. A felépített szervezeti rend szerint ezen előírások gondozása átkerült az erre a célra létrehozott Útügyi Műszaki Szabályozási Bizottsághoz. A MAÚT továbbra is meghatározó szereplője maradt az Útügyi Műszaki Előírások készítésének, mint a kidolgozással megbízott vállalkozó.

Az útépítésre vonatkozó szabályrendszer alapját a jogszabályok adják, melyeket szervesen kiegészítenek és részletes műszaki tartalommal töltenek fel az egyéb szakmai szabályrendszerek. Ilyen szakmai szabályrendszer a szabványokon kívül az Útügyi Műszaki Előírások is.

Ezen előzmények után fontos kérdésként merül fel, hogy az Útügyi Műszaki Előírások alkalmazása kötelező érvényű-e, avagy önkéntes alapú. A válasz érinti szakmánk majd minden szereplőjét, akár tervez, akár épít, ha megrendelő, ha kezelő, akár ellenőriz, vagy épp hatóságként engedélyez. A kérdés sajnos megosztja mérnöktársadalmunkat, ami a lehető legrosszabb verzió az „igen” és a „nem” lehetséges válaszok helyett. Mint látni fogjuk az ördög ezúttal is a részletekben rejlik. (A kérdést kizárólag jogszabályi szempontból elemezzük, nem foglalkozva a szerződéses megállapodáson alapuló „kötelező” előírás használatával.)

Jelen írásra hidásmérnökként vetemedtem, mindenféle jogi jártasság, pláne végzettség nélkül. Mégis megtettem, mert jogászoktól nem kaptam a kérdésre megnyugtató választ, s úgy vélem egy jogszabályt alapvetően meg kellene érteni különösebb jogi vértzettség nélkül is. Ugyanakkor emiatt lehet rossz értelmezést kergetek, jogban jártas olvasóktól emiatt is kétszeres türelmet kérek.

Célom csupán annyi volt, hogy gyakorló mérnökként tudjam a fenti kérdésre a választ. Megfelelő válasz lehet az igen és a nem is, de mindenképpen szükséges pontosan tudni, hogy mi a válasz.

## 2. MŰSZAKI ELŐÍRÁSOK A MAGYAR SZABVÁNYÜGYI TÁRSULATNÁL

A Műszaki Előírások értelmezését nehezítik az egymással fedésben lévő szóhasználatok. Először lássuk, a nemzeti szabványokhoz hogyan kapcsolódik a „Műszaki Előírás” kifejezés.

A 1995. évi XXVIII. törvény a nemzeti szabványosításról szól (továbbiakban Szabványtv.). A törvény értelmében a Magyar Szabványügyi Testület feladata többek között: „jogszabály által nem szabályozott műszaki előírások előkészítése, megalkotása, felülvizsgálata és az ezzel kapcsolatos feladatok ellátása, illetve koordinálása, valamint a működés és a feladatok ellátása egyéb feltételeinek biztosítása az MSZB útján a Műszaki Szabályozási Bizottságról szóló miniszteri rendeletben meghatározottak szerint” (lásd 8. § (1) 16. pont). A Műszaki Előírásokról egyéb említés e törvényben nincs.

A 7/2019. (IV. 4.) ITM rendelet a Műszaki Szabályozási Bizottságról a Szabvány tv. szerinti Műszaki Előírások készítését végző Műszaki Szabályozási Bizottság működését szabályozza. A rendelet 1. §-a értelmében: „(1) A Műszaki Szabályozási Bizottság (a továbbiakban: MSZB) feladata a hazai kis- és középvállalkozások versenyképességének javítása érdekében: a) jogszabály vagy szabvány által nem szabályozott tárgykörben műszaki előírások felülvizsgálata, valamint más bizottságok feladatkörébe nem tartozó műszaki előírások előkészítése, megalkotása [...]”. Azaz a szabványok mellett a jogszabály definiálja a Műszaki Előírást, mint másodlagos szakmai szabályt, tehát ez nem szabvány! Jogosan felmerül a kérdés, van-e ilyen?

A Magyar Szabványügyi Testület (MSZT) napi gyakorlata szerint az egyik sajátos szabványkiadvány, amelynek jelzetében a "TS" (MSZ CEN/TS, MSZ ISO/TS, stb.) „technical specification” szerepel, műszaki előírást jelöl, ugyanezt szokás műszaki specifikációnak is nevezni. TS jelzettel 166 érvényes szabályozás található az MSZT szabványkatalógusában. Ugyanitt 10 db előírás tartalmazza címében, hogy „műszaki előírás”. Ezek mind MSZ-jelzetűek, ami a Szabvány tv. értelmében csak Nemzeti Szabványt jelölhet (!), s ez a jelölés nem illeti meg az előző bekezdés szerinti, azaz 7/2019. ITM rendeletnek megfelelő Műszaki Előírást. Írásbeli megkeresésemre az MSZT erre a látszólagos ellentmondásra azt a tájékoztatást adta, hogy „mivel a törvény ez irányú módosítását követően nem kezdeményezték jogszabály által nem szabályozott műszaki előírások előkészítését, megalkotását, az MSZT nem készíthetett és adhatott ki az 1995. évi XXVIII. törvény szerinti műszaki előírást.”

### 3. MŰSZAKI ELŐÍRÁSOK A HATÁLYOS SZAKÁGI JOGSZABÁLYOKBAN

Nézzük meg hol szerepelnek a jogszabályainkban az Útügyi Műszaki Előírások.

Az 1988. évi I. törvény a közúti közlekedésről (továbbiakban Úttörvény) 22/A § (1) c) pontja büntetéssel fenyegeti, aki gépjárművekre vonatkozó műszaki előírásokat visszatart. Ennek nyilván semmi köze az Útügyi Műszaki Előírásokhoz.

Az Úttörvény 29. § (16) e) pontja szerint hatósági bejelentésköteles tevékenység (azaz nem engedélyköteles, csak bejelentésköteles) „bárki által igénybe vehető létesítményhez szükséges parkolóhelyek és a hozzájuk vezető legfeljebb 50 m hosszú útfelület kiépítését az építéssel érintett ingatlanon összesen (meglévő és tervezett) 10 parkolóhelyig az útügyi műszaki előírások betartásával.” Ez egy ritka kristálytisztá hivatkozás az Útügyi Műszaki Előírásokra. De láthatjuk egy elég jól körülhatárolt esetre vonatkozik.

Az Úttörvény témánkkal kapcsolatos következő említése így hangzik: „29/F § Az útügyi műszaki előírások kidolgozásáért felelős bizottság kidolgozza a közút és műtárgyai tervezésére, építésére, valamint a forgalom biztonságát és forgalmi rendjét meghatározó technikai eszközökre vonatkozó jogszabály vagy szabvány által nem szabályozott műszaki előírásokat.”

Az Úttörvény következő említése a 36. § (5) bekezdésében kizárólag a téli közműépítésekre ad lehetőséget, ha „a vonatkozó útügyi műszaki előírásokban foglaltaknak megfelelően elvégezhető”.

Az Úttörvény végén pedig a szakági miniszter felhatalmazást kap arra, hogy rendeletben állapítsa meg (48. § (3) b) 38.): „a közút és műtárgyai tervezésére, építésére, valamint a forgalom biztonságát és forgalmi rendjét meghatározó technikai eszközökre, továbbá a közutak kezelésére vonatkozó jogszabályi szintű szabályozást nem igénylő műszaki előírások, útmutatók megalkotására és kiadására, közzétételére vonatkozó eljárási szabályokat,

(48. § (3) b) 38a.) az útügyi műszaki előírások kidolgozásáért felelős bizottság létrehozására, összetételére, feladatkörére és működésére vonatkozó részletes szabályokat.”

A közutak és közforgalom elől el nem zárt magánutak hatósági ügyeit a 93/2012. Korm. rendelet szabályozza (továbbiakban Eng. rend.). Az Eng. rendelet alkalmazásában a 2. § szerint: „6. műszaki előírás: a közút és műtárgyai tervezésére, építésére, valamint a forgalom biztonságát és forgalmi rendjét meghatározó technikai eszközökre, továbbá a közutak kezelésére vonatkozó szakmai szabály;

7. út építése: a műszaki előírások szerint meghatározott műszaki jellemzőkkel út kialakítása, átépítése, felújítása vagy korszerűsítése”.

Az Eng. rendelet szerint van bejelentés-köteles tevékenység (4/A §), elvi építési engedélyezési eljárás (8. §), építési engedélyezési eljárás (11. §), műtárgy kiviteli terv jóváhagyási eljárás (16. §), építési engedélytől való eltérés engedélyezési eljárás (7. §), forgalomba helyezési eljárás (18. §), ideiglenes forgalomba helyezés (22. §), fennmaradási engedélyezési eljárás (24. §), és megszüntetési eljárás (27. §). Ezen eljárások közül az elvi építési, az építési engedélyezési és a megszüntetési eljárásnál a kérelmezőnek „igazolnia kell”, hogy a tervezett műszaki megoldás megfelel a műszaki előírásoknak és az általános érvényű szakmai követelményeknek. A bejelentés-köteles tevékenységnél más megfogalmazás szerepel, ekkor ugyanis a bejelentéshez csatolni kell mások mellett: „b) tervezői nyilatkozatot, amely tartalmazza az útügyi műszaki előírásoktól való esetleges eltérés és annak természeti adottságokból fakadó indoklását, „c) országos közúthoz történő csatlakozás, annak a területén való építés esetén útügyi műszaki előírásoktól való eltérés esetén a felmentést”. Kiemelendő, hogy a kiviteli tervek jóváhagyásánál nem szerepel műszaki előírásra való hivatkozás!

Az Eng. rendelet „16. A műszaki előírások alkalmazása” című fejezete az alábbiakat írja elő: „28. § A műszaki előírásokban foglaltakat az építető, a tervező és a hatóság a műszaki fejlődés eredményeinek, valamint a közlekedésbiztonsági szempontok érvényre juttatása érdekében az e rendeletben foglalt eljárások során figyelembe veszi.”

A következő vizsgálendő jogszabály, a 16/2017. (V.25.) NFM rendelet az útügyi műszaki előírások kidolgozására, kiadására és közzétételére vonatkozó szabályokról (továbbiakban ÚME rendelet), amelyet a szakminiszter az Úttörvény fentebb idézett felhatalmazása alapján adott ki. E rendelet szabályozza az Útügyi Műszaki Szabályozási Bizottság (a továbbiakban: Útügyi Bizottság) munkáját. Az Útügyi Bizottságnak alapvetően két feladata van, az Útügyi Műszaki Előírások kidolgozása és felülvizsgálata (4-8. §) és szakmai állásfoglalás kiadása (9. §). E rendelet fontos mondata 8. § (2) bekezdésben: „Az útügyi műszaki előírások a kormányzati honlapon keresztül ingyenesen hozzáférhetők.”

Az ÚME rendelet 11. § (3) bekezdése szerint: „Az e rendelet hatálybalépését követően a 8. § szerint közzétett útügyi műszaki előírást a közzététel napjától kell alkalmazni, kivéve azokat az útügyi műszaki előírásokat, amelyek ettől eltérő alkalmazási időpontot tartalmaznak.” Egyéb előírás a rendeletben ezek alkalmazására, vagy kötelező jellegére vonatkozóan nincsen.

Az Útügyi Bizottságra vonatkozik még a 2/2019. (I.9.) ITM rendelet az Útügyi Műszaki Szabályozási Bizottságról. Eszerint az Útügyi Bizottság feladata mások mellett: „1. § (2) a) az útügyi műszaki előírások megalkotására, kiadására és közzétételére vonatkozó szabályokról szóló miniszteri rendeletben meghatározott eljárásrendben kidolgozza és felülvizsgálja az útügyi műszaki előírásokat tartalmazó szakmai szabályokat; b) az a) pontban hivatkozott jogszabályban meghatározott eljárásrendben a közút tervezésében, építésében vagy üzemeltetésében érintett természetes vagy jogi személy megkeresésére egyedi szakmai állásfoglalást alakít ki a megkereső által bemutatott, az útügyi műszaki előírásokban foglaltaktól eltérő műszaki megoldásokról”.

#### **4. TOVÁBBI JOGSZABÁLYI EMLÍTÉSEK, ELŐFORDULÁSOK**

Az eddig olvasottak alapján vajon egyenlőségjelet tehetünk-e az Útügyi Műszaki Előírás és a Műszaki Előírás közé? Nézzük meg milyen relevánsnak tűnő jogszabályok hivatkoznak műszaki előírásokra! (Nem idéztünk minden esetet, csak a mérvadóbbakat, s néhány egyebet a Műszaki Előírás szókapcsolat használatának illusztrálására.)

Az 1997. évi LXXVIII. törvény az épített környezet alakításáról és védelméről (a továbbiakban Étv.) fogalommeghatározásai között szerepel a „2. § 42. Építésügyi műszaki irányelv: jogszabály vagy európai vagy nemzeti szabvány által nem vagy nem teljeskörűen szabályozott területen, ismételt vagy folyamatos alkalmazás céljára, széles körű szakmai összefogással és állami felügyelet mellett létrehozott, magyar nyelven kiadott, mindenki számára hozzáférhető építésügyi műszaki előírás.” Ezeket az ÉMI adja ki, jelenleg 17 érvényes előírásuk van, melyek alkalmazása természetesen önkéntes.

Az Étv. 54. § (6a) téli közműépítésre vonatkozó, Úttörvénnyel azonos, fentebb már idézett megengedő szabályt tartalmazza általánosságban a közterületre kiterjesztőleg, megemlítve szabatosan az Útügyi Műszaki Előírásokat.

A megkülönböztető és figyelmeztető jelzés felszerelésével, engedélyezésével, használatával és visszavonásával kapcsolatos közigazgatási hatósági eljárásra vonatkozó kiegészítő és eltérő szabályokról szóló 486/2017. (XII. 29.) Korm. rendelet egy helyen említi műszaki előírásokat: az „5/A. § (1) Az engedélyező hatóság az engedélyét visszavonja, ha” a b) pontja szerint „a járművön a megkülönböztető jelzést adó készülék vagy a figyelmeztető jelzést adó készülék elhelyezése, felszerelése nem felel meg a jogszabályban meghatározott üzemeltetési, műszaki előírásoknak”.

A 14.146/2014. (V. 5.) Korm. rendelet a felvonókról, mozgólépcsőkről és mozgójárdákról több paragrafusában is hivatkozik általánosságban, természetesen emelőgépekre vonatkozó műszaki előírásokra.

A 275/2013. (VII. 16.) Korm. rendelet az építési termék építménybe történő betervezésének és beépítésének, ennek során a teljesítmény igazolásának részletes szabályairól több pontjában hivatkozik a műszaki előírásokra. A 2. § 14. értelmezése szerint a „nemzeti műszaki értékelés: műszaki előírás...” A 3. § (4) épületszerkezetre vonatkozó jogszabályi követelmény egyes eseteire műszaki előírás szerinti igazolást fogalmaz meg. A rendelet melléklete tartalmazza az egyes építési termékek lényeges termék tulajdonságait táblázatos formában. Az 1. melléklet 23. Útépítési termékek vonatkozásában csak hivatkozást tartalmaz az Útügyi Műszaki Előírásokra: „Az útépítések során felhasznált építési termékekre vonatkozó követelményeket az útügyi műszaki előírások tartalmazzák.” (Érdekesség, hogy e rendelet megalkotásakor, azaz 2013-ban már maival azonosan hivatkozott az Útügyi Műszaki Előírásokra, még az ÚME rendelet megjelenése előtt.)

Az Országos Tűzvédelmi Szabályzatról alkotott 54/2014 BM rendelet 144. § szerint: „Nem kötelező villámvédelmet létesíteni ... cb) az olyan kötélpályás felvonók vagy egyéb nyomvonalas műszaki létesítmények esetében, amelyek villámvédelmét önálló, kifejezetten az adott típusú nyomvonalas műszaki létesítményre vonatkozó szakmai műszaki előírás szabályozza.”

A 83/2004. (VI. 4.) GKM rendelet a közúti jelzőtáblák megtervezésének, alkalmazásának és elhelyezésének követelményeiről 14 db erős hivatkozást, jellemzően kötelező alkalmazást ír elő a jelzőtáblákkal kapcsolatos Útügyi Műszaki Előírásokra.

A 5/2004. (I. 28.) GKM rendelet a helyi közutak kezelésének szakmai szabályairól egyetlen helyen, a forgalomirányító berendezések fenntartása kapcsán ír elv szinten a műszaki előírások alkalmazásáról.

A 41/2003. (VI. 20.) GKM rendelet a forgalomirányító jelzőlámpák követelményeiről, tervezési, telepítési és üzemeltetési előírásairól és a 40/2001. (XI. 23.) KöViM rendelet a közúti útbaigazítás rendszerének és jelzéseinek követelményeiről 4-4 helyen kötelezően előírja pontosan meghatározott Útügyi Műszaki Előírás alkalmazását, ráadásul a „rég”i” számozási rendszerben (pl. ÚT 2-1.120). Hasonlóan tartalmaz egy régi rendszerű hivatkozást a 11/2001. (III. 13.) KöViM rendelet az útburkolati jelek tervezési és létesítési előírásairól, hat hivatkozást a 4/2001. (I. 31.) KöViM rendelet a közúti jelzőtáblák méreteiről és műszaki követelményeiről, négy hivatkozást a 3/2001. (I. 31.) KöViM rendelet a közutakon végzett munkák elkorlátozási és forgalombiztonsági követelményeiről. A 20/1984. (XII. 21.) KM rendelet az utak forgalomszabályozásáról és a közúti jelzések elhelyezéséről) a forgalomesillapító eszközökre vonatkozóan kötelezően előírja az Útügyi Műszaki Előírások alkalmazását.

Megjegyzendő, hogy az országos közutak kezelésének szabályozásáról szóló 6/1998. (III. 11.) KHVM rendelet nem hivatkozik Műszaki Előírásokra!

## 5. MŰSZAKI ELŐÍRÁS FOGALMA

A „Műszaki Előírást”, mint fogalmat a Szabvány tv. definiálja, és ezek gondozását külön bizottsághoz rendeli, azonban az MSZT tájékoztatása szerint ez a definiált „Műszaki Előírás” kategória üreshalmaz, nem alkottak ilyet, hiába van ennek jogszabályi lehetősége.

Ugyanakkor az MSZT szóhasználatában szinonimaként használja a Műszaki Előírás szókapcsolatot, mégpedig nemzeti szabványokra vonatkozóan. Ezek viszont határozottan szabványok és nem a Szabvány tv. 8. § (1) 16. pont szerinti „Műszaki Előírás”-ok.

Az Útügyi Műszaki Előírás a jogszabályokban előforduló szabatos pontos hivatkozás, ezek előfordulási helyeit megadtuk. Láttuk, hogy 2004. évi és korábbi jogszabályok kötelező Útügyi Műszaki Előírás alkalmazást írnak elő egy-egy konkrét – az előzőekben idézett - esetre, de nem általánosságban.

Az újabb jogszabályainkban Útügyi Műszaki Előírások kötelező alkalmazását elrendelő definitív mondatot nem találtunk.

A Műszaki Előírás (Útügyi megkülönböztető előtag nélkül) sok jogszabályban szerepel. Látható a citált példákban, hogy ezek jellemzően általános jelentés tartalmúak, bizonyosan nem tehetünk azonosságot a Műszaki Előírás és az Útügyi Műszaki Előírás közé még kifejezetten útépítési tárgyú jogszabályok esetében sem (pl. Eng. rendelet).

A Műszaki Előírás jelentését ezek után így definiálhatjuk: szakmai szabály, a szabványokhoz igen hasonló tulajdonságokkal, a szabványok amolyan kistestvérei. A hasonló tulajdonság alatt érthető, hogy közmegegyezésen alapulnak, alkalmazásuk védi a használót, alkalmazásuk önkéntes stb.

Műszaki Előírások közé sorolható az Útügyi Műszaki Előírások, de vannak Vasúti Műszaki Előírások, Átjárhatósági Műszaki Előírások, Építésügyi Műszaki Irányelvek és egyéb szakmai Műszaki Előírások.

## 6. SZABÁLYOZÁSI HIERARCHIA

Valamennyi jogszabály alkalmazása kötelező. Ugyanakkor minden, ami nem jogszabály, az nem kötelező.

A Szabvány tv. 1995 óta kimondja, hogy a nemzeti szabvány alkalmazása önkéntes (3. § c), 6. §). A hazai szabályozás Európai Unió harmonizálása során megszüntették az egykori kötelező szabványokat. A szabályozás rendezőelve, hogy jogszabályban csak a legfontosabb műszaki követelmények jelenjenek meg, ami valóban indokolt. A részletszabályozást pedig önkéntes használatú irányelvekkel, szabványokkal, műszaki előírásokkal kell meghatározni, mint követelményszintet. Ez gyakorlatilag azt jelenti, hogy ha egy jogszabály szabványra hivatkozik (számos ilyen van ma is), akkor az nem azt jelenti, hogy az adott szabvány alkalmazása kötelező, hanem csak azt, hogy az adott szabványban szereplő követelményszintet, vagy azzal egyenértékűt kell biztosítani.

Ezzel párhuzamosan megjegyzendő, hogy nem tartoznak a szerzői jogról szóló törvény (1999. évi LXXVI. törvény) védelme alá a jogszabályok, közjogi szervezetszabályozó eszközök, a bírósági vagy hatósági határozatok, a hatósági vagy más hivatalos közlemények és ügyiratok, valamint más hasonló rendelkezések. Ellenben a szabványokat védi a szerzői jog.

A tankönyvszagú elvek tehát azt sugallják, hogy a Műszaki Előírások, szakmai szabályok nem kötelezőek, csak követelményszintet határoznak meg, hasonlóan a szabványokhoz. A fent felsorolt példák ezt viszont részben cáfolják.

Ugyanakkor láttuk, hogy kifejezetten kötelező Útügyi Műszaki Előírás alkalmazást ír elő több forgalomtechnikával kapcsolatos jogszabályunk, mind 2004. évnél nem frissebb. Valóban annak idején még ezen előírások borítóján is feltűnő grafikus megkülönböztetés jelezte, hogy mely előírás kötetek jogszabály erejénél fogva kötelező használatúak. Így ezen kötelező jogszabályok jogtörténeti hagyatékunk, ami véleményem szerint nem illeszkedik harmonikusan a mai szabályozási elvekbe.

Akkor illeszkedne ugyanis, ha ezen jogszabályok melléklete lenne a hivatkozott forgalomtechnikai Útügyi Műszaki Előírás.

## 7. ÚTKATEGÓRIÁK ÉS ALAP JOGSZABÁLYAINK

A feltett kérdés vizsgálatához szükséges azt is tudnunk, mire akarjuk használni ezeket az Útügyi Műszaki Előírásokat. Ehhez egy kis alapfogalom áttekintés szükséges.

Az utakat három fő csoportba osztjuk: lehet közút, lehet közfoglalom elől el nem zárt magánút, illetve lehet közfoglalom elől elzárt magánút. Természetesen útnak minősül nem csak a gépjármű közlekedésre szolgáló út, hanem a kerékpáros vagy gyalogos közlekedésre szolgáló út is, melyek szintén e három csoportba vannak osztva.

Az első két csoportra, azaz a közutakra és a közfoglalom elől el nem zárt magánutakra vonatkozó legfontosabb jogszabályunk az Úttörvény, az 1988. évi I. törvény.

Mi a harmadik csoport? Az Úttörvény 47. § 8. szerint: „Közfoglalom elől elzárt magánút: a sorompóval, kapuval vagy más fizikai eszközzel lezárt, vagy „Mindkét irányból behajtani tilos” jelzőtáblával és a „magánút” feliratot tartalmazó kiegészítő táblával jelzett út, amely az ingatlan-nyilvántartásban közfoglalom elől elzárt magánútként van bejegyezve.”

Az utak fenti csoportosítása alapvetően kihat azok létesítésére, kezelésére. A közút és a közfoglalom elől el nem zárt magánút az Úttörvény hatálya alatt van és érvényesek rá a jól ismert és használt közlekedésépítési jogszabályaink. A közfoglalom elől elzárt magánút azonban nincs az Úttörvény hatálya alatt, így azok létesítésére és kezelésére az általános építési jogszabályok, így elsősorban az Építési törvény (1997. évi LXXVIII. törvény az épített környezet alakításáról és védelméről) és annak rendeletei, valamint az adott szakterületre – mezőgazdaság, erdészet, honvédelem, bányászat... – vonatkozó sajátos előírások alkalmazandók.

Tervezőmérnökként önkényesen három féle „ügyet” különböztetek meg, amelyek vonatkozásában egyesével értelmezendő az Útügyi Műszaki Előírások alkalmazásának kérdése. Az első eset, mikor a tevékenységnek van hatósági vonzata (építési engedélyköteles beavatkozás, kiviteli terv jóváhagyás köteles tevékenység, hatósági bejelentésköteles munka). Második eset, mikor nincs hatósági eljárás, de a tevékenység kiviteli terv készítés köteles (legjellemzőbb példa erre egy felújítás esete). Harmadik ügy pedig az egyéb, nem terv igényes kérdések (üzemeltetés, minősítés, stb.).

A háromféle ügy-típus vonatkozásában vizsgálandó az Útügyi Műszaki Előírások kötelezősége, hiszen ezekre különböző jogszabályok vonatkoznak. Miután bemutattuk a jogszabályi előfordulásokat, láthatjuk, hogy egyetlen halovány utalást sem találhatunk arra, hogy útüzemeltetéshez ezen előírásokat alkalmazni kellene. A hatóságot nem érintő esetben sincs a legkisebb jogszabályi alapja sem ezek kötelező alkalmazásának. Egyedül a hatósági engedélyes esetekben (ami az előírás-használatnak csak egy részterülete) van hivatkozási lehetőség akkor, ha a „Műszaki Előírás” megfogalmazásokat, „Útügyi Műszaki Előírásoknak” értelmezünk. Azonban az Eng. rendelet fogalom meghatározásában a Műszaki Előírást különösebb pontos megkötés nélkül, szakmai szabályként írja le!

## 8. FORGALOM ELŐL ELZÁRT ÜGYEK

Az előző fejezetben leírt útkategóriák vonatkozásában eddig csak a közutakra és közfoglalom elől el nem zárt magánutakra gondolhattunk, de mi a helyzet a forgalom elől elzárt esetben, ami a napi feladatok között bár nem óriási számban, de megtalálható?

A forgalom elől elzárt útépítés és a tartozékának minősülő hídépítés nincs az Úttörvény hatálya alatt és nincs a jól ismert közlekedésépítési rendeletek hatálya alatt sem. Ezekre az Építési törvény érvényes. Ilyen jogszabályi környezetben pedig végképp nem találunk Útügyi Műszaki Előírásokra vonatkozó előírásokat – de ez nem is hiányzik.

Ráadásul a 312/2012. (XI. 8.) Korm. rendelet az építésügyi és építésfelügyeleti hatósági eljárásokról és ellenőrzésekről, valamint az építésügyi hatósági szolgáltatásról 1. melléklete szerint építési engedély nélkül végezhető építési tevékenység a 30. pont szerint: „Közfoglalom elől elzárt, telken belüli út, parkoló, átereszt, bejáró-, átjáró-híd építése.” Az olyan elzárt magánúton lévő híd, ami beleillik az előbbi

kitételbe az a méretétől függetlenül engedély nélkül építhető. (Sajnos sokszor előforduló probléma, hogy a magánutakon lévő hidakat az általános építési hatóság nem hajlandó engedélyezni, s a közlekedési hatóság sem, hiszen nekik kristálytisztán nincs erre jogkörük. Magánúton épülő híd vagy az előbb ismertetett kivétel nyomán engedély nélkül építhető, egyéb esetben engedélyezést az általános építési hatóságnak kellene elvégeznie. Továbbá, ha ez a magánúton épülő híd terve részét képezi egy más okból engedélyköteles építmény tervdokumentációjának, akkor az engedélyköteles építményre kiadott engedély egyúttal szentesíti a híd terveit is – így születhet tehát akár ETDR záradékolású magánúti bejáróhíd terv is.)

## 9. JOGI ÁLLÁSFOGLALÁS ÉS KÉRDŐJELEK

Az Útügyi Műszaki Előírásra vonatkozó jogszabályi hivatkozások áttekintése után vizsgáljuk meg a MAÚT Jogi Koordináló Bizottságának e tárgykörben kiadott, 2020. november 17-én keltezett állásfoglalását. Az állásfoglalás az alábbi két kérdésre kívánt válaszolni:

I. A hatályos jogszabályok alapján az útügyi műszaki előírások kötelezően alkalmazandóak-e az országos közutak, helyi közutak és a közforgalom elől el nem zárt magánutak tekintetében?

II. A minden útkategóriára kiterjedő, kötelező alkalmazáshoz szükséges-e és milyen körben jogszabálymódosítás?

A jogi állásfoglalás összegzése a két felvetésre az alábbi:

ad I. Jogi Koordináló Bizottság tagjai az UME-k kötelező alkalmazása szempontjából egységes állásponton vannak, vagyis az I. pontban megfogalmazott kérdésre a válasz: Igen, kötelező az UME-k alkalmazása az országos közutak, helyi közutak és a közforgalom elől el nem zárt magánutak tekintetében.

ad II. A Bizottság tagjai a II. pontban feltett kérdéssel kapcsolatban nincsenek azonos állásponton. Egyes tagok szerint szükség lenne jogszabálymódosításra a minden útkategóriára kiterjedő kötelező alkalmazáshoz, mások ezt nem támogatják leginkább a túlszabályozás és a nem állami szervek gazdálkodásába való beavatkozás veszélye miatt.

A jogszabálymódosítási igény a megismert KÉSZ tervezet alapján véleményem szerint sem indokolt, hiszen a rendelet tervezete mögöttes, kötelezően alkalmazandó szabályként hivatkozik az útügyi műszaki szabályokra. Amennyiben a KÉSZ a jelenlegi formájában kerül elfogadásra egyéb jogszabálymódosításra nincs szükség.

A jogi állásfoglalás részletes indoklást nem tartalmaz, ezért az alábbi kérdések merülhetnek fel:

- 1) ad I.-hez: Mi az egységes álláspont jogszabályi levezetése (részletes indoklás)?
- 2) ad I.-hez: Milyen ügyben kötelező? Mint kifejtettük van legalább három nagyon markánsan eltérő ügypontunk.
- 3) ad II.-hez: Egyéb útkategória alatt a közforgalom elől elzárt magánutakat értjük?

## 10. KONKLÚZIÓ

Eddigi kutakodásomban nem találtam olyan jogszabályt, ami definitíven az Útügyi Műszaki Előírások kötelező alkalmazását rendelné el.

A Műszaki Előírásoknak való előírt megfelelés követelményszintként értelmezendő hasonlóan a szabványokhoz, irányelvekhez.

Véleményem szerint az Útügyi Műszaki Előírások alkalmazása általános elvként nem kötelező (ide nem értve a néhány egyedi előírást (pl. forgalomtechnika). Ezek alkalmazása ugyanakkor kívánatos és célszerű. Az Útügyi Műszaki Előírások azonban így is, önkéntes alkalmazással tökéletesen betöltik feladatukat, nem szükséges ezek jogszabályi kötelezőségének elrendelése.

Önkéntes alkalmazás mellett van-e szükség az Útügyi Műszaki Szabályozási Bizottságtól az egyedi eltérésekre támogatást kérelmezni? Természetesen ez továbbra is igen fontos lehetőség. Egyrészt szerződésen alapuló ÚME-szerinti tervezés esetén az eltérésre „egyenszilárdságú” igazolást nyerhetünk,



másrészt önkéntes alkalmazás esetén a műszaki eltérési engedély birtokában az UME védőernyője alatt maradhatunk annak számtalan jogi előnyével együtt.

Megjegyzendő, hogy ha az Útügyi Műszaki Előírások alkalmazása nem kötelező, akkor kellő körültekintéssel jár el az a tervező, aki tervében előírja a megvalósítás során általánosságban az Útügyi Műszaki Előírásoknak való megfelelést! Ennek hiányában akár tervértelmezési hiátusok is adódhatnak.

Bizonyosan vannak olyan Útügyi Műszaki Előírások (lásd forgalomtechnikai példák), melyek egészséges helye a jogszabály mellékletében lenne, jogszabályi rangban. Ezek szükséges rendezését egyedileg kell megítélni.

Végezetül a zavaró azonos fogalomhasználat megszüntetéséhez javaslom a Szabvány tv.-ből kivezetni az üres halmaz „Műszaki Előírásokat”, egyúttal a nemzeti szabványok megnevezésében is indokolt a Műszaki Előírás szóhasználat mellőzése.

2022. augusztus 9.

### Jogszabályok

- Úttörvény: 1988. évi I. törvény a közúti közlekedésről
- Építési törvény: 1997. évi LXXVIII. törvény az épített környezet alakításáról és védelméről
- Szabvány tv.: 1995. évi XXVIII. törvény a nemzeti szabványosításról
- Eng. rendelet: 93/2012. (V. 25.) Korm. rendelet az utak építésének, forgalomba helyezésének és megszüntetésének engedélyezéséről
- UME rendelet: 16/2017. (V. 25.) NFM rendelet az útügyi műszaki előírások kidolgozására, kiadására és közzétételére vonatkozó szabályokról szóló
- UMSZB rendelet: 2/2019. (I. 9.) ITM rendelet az Útügyi Műszaki Szabályozási Bizottságról szóló
- Termék rend.: 275/2013. (VII. 16.) Korm. rendelet az építési termék építménybe történő betervezésének és beépítésének, ennek során a teljesítmény igazolásának részletes szabályairól
- 54/2014. (XII. 5.) BM rendelet az Országos Tűzvédelmi Szabályzatról
- 83/2004. (VI. 4.) GKM rendelet a közúti jelzőtáblák megtervezésének, alkalmazásának és elhelyezésének követelményeiről
- 5/2004. (I. 28.) GKM rendelet a helyi közutak kezelésének szakmai szabályairól
- 41/2003. (VI. 20.) GKM rendelet a forgalomirányító jelzőlámpák követelményeiről, tervezési, telepítési és üzemeltetési előírásairól
- 40/2001. (XI. 23.) KöViM rendelet a közúti útbaigazítás rendszerének és jelzéseinek követelményeiről
- 11/2001. (III. 13.) KöViM rendelet az útburkolati jelek tervezési és létesítési előírásairól
- 4/2001. (I. 31.) KöViM rendelet a közúti jelzőtáblák méreteiről és műszaki követelményeiről
- 3/2001. (I. 31.) KöViM rendelet a közutakon végzett munkák elkorlátozási és forgalombiztonsági követelményeiről
- 20/1984. (XII. 21.) KM rendelet az utak forgalomszabályozásáról és a közúti jelzések elhelyezéséről
- 7/2019. (IV. 4.) ITM rendelet a Műszaki Szabályozási Bizottságról
- 312/2012. (XI. 8.) Korm. rendelet az építésügyi és építésfelügyeleti hatósági eljárásokról és ellenőrzésekről, valamint az építésügyi hatósági szolgáltatásról
- 1999. évi LXXVI. törvény a szerzői jogról



# Földradar (GPR) alapú talajnedvességtartalom-mérési lehetőségek földművek esetén – szakirodalmi áttekintés

**Herceg András**

<sup>1</sup> Soproni Egyetem, Erdőmérnöki Kar, Geomatikai és Kultúrmérnöki Intézet

E-mail: [herceg.andras@uni-sopron.hu](mailto:herceg.andras@uni-sopron.hu)

DOI: [10.36246/UL.2022.1.03](https://doi.org/10.36246/UL.2022.1.03)

## KIVONAT

A hajlékony pályaszerkezetek korai meghibásodásának és degradációjának egyik fő forrása a víz fokozott jelenléte annak rétegeiben, így a talajnedvesség-tartalom pontos mérése és változásának meghatározása kulcsfontosságú, mivel ezek jelentős hatással vannak a talaj teherbírására és alakváltozási jellemzőire, így befolyásolják a pályaszerkezetek stabilitását, süllyedését, valamint a talajvíz áramlását is.

Kiemelt fontosságú a környezeti jellemzők alaposabb vizsgálata az alsóbbrendű, a mezőgazdasági utak, valamint az agro-erdészeti rendszerek kiszolgáló útjainál, illetve az erdők feltáróhálózatánál. Ezeknél az úthálózatoknál az időjárásnak való kitettség erőteljesebben érezteti hatását a vékonyabb pályaszerkezet miatt.

A földmű feladata a pályaszerkezet megfelelő alátámasztásának biztosítása, ezért kialakításánál a kedvezőtlen éghajlati és terhelési viszonyok között is kellő stabilitást kell megvalósítani. Következésképpen az egész pályaszerkezet-rendszer elsősorban a földmű szilárdságától függ, és biztosítja a terhelések hatékony elosztását a mélység mentén. A földmű állapotának felmérése és időbeli változásának nyomon követése értékes információkat szolgáltat a pályaszerkezet-hibákról, ezáltal előrejelzést ad a jövőben szükséges útfenntartásról.

A talajnedvesség-tartalom változásainak monitorozására a földmű kialakítása gyors, roncsolásmentes módszert igényelhet. A földradar (GPR) egy olyan roncsolásmentes műszer, amellyel a földművek minőségi felmérése, valamint a nedvesség okozta pályaszerkezetkárok értékelése is kivitelezhető. Az eljárás a pályaszerkezet felszínén még nem észlelhető súlyos károk megelőzésére is használható.

Jelen cikk célja szakirodalmi áttekintést adni a GPR alapú talajnedvesség-tartalom meghatározás lehetőségeiről, a földművek esetében és a legalaposabban kutatott módszerek részletes bemutatása.

*Kulcsszavak:* GPR, talajnedvesség, pályaszerkezet méretezés, földmű

## ABSTRACT

One of the main sources of pavement degradation and early failure of flexible pavements is the presence of excessive water within the pavement layers. Consequently, the accurate measurement of the soil moisture content and its changes is crucial, since they affect significantly the strength of the soil and its deformation characteristics, thus influencing the stabilization of the surface constructions, subsidence and ground water flow.

A more thorough examination of the environmental characteristics of inferior agricultural roads, service roads of agro-forestry systems, and forest opening up networks is of particular importance, since with these road networks, exposure to the weather can be felt more strongly due to the thinner pavement structure.

Subgrade soil (as a subsurface pavement layer) must provide suitable support to the pavement structure. In pavement design the subgrade should possess enough stability under unfavorable climate and loading conditions. Consequently, the whole pavement system depends primarily on the subgrade strength that provides an effective

distribution of loads along depth. Assessment of the subgrade's condition and monitoring its temporal variation deliver valuable information about pavement failure, allowing for the beneficial prediction of future road maintenance.

The subgrade's design may require a fast non-destructive method to observe changes in soil moisture contents. GPR is one of the non-destructive instruments, which can be applied to estimate the quality of subgrade soils, and to evaluate moisture-related pavement damage. The procedure is also beneficial in preventing the severe damage that is not yet visible on the top surface of the pavement.

The main goal of this article is to provide a literature overview on the possibilities of the soil moisture determination based on GPR systems and give details about the most researched methods.

*Keywords:* GPR, soil water content, subgrade, pavement design

### **Dr. Herceg András**

*A Soproni Egyetem (SOE) Erdőmérnöki Karán a Geomatikai és Kultúrmérnöki Intézet munkatársa. Fő kutatási területe a vízmérleg-modellezés.*

---

## **1. BEVEZETÉS**

Hagyományosan a talajnedvesség-meghatározási módszerek a gyakorlatban időigényesek és roncsolással járnak. Még manapság is hiányosság tapasztalható a kis, ( $<0,01 \text{ m}^2$ ) valamint a nagy léptékű ( $>100 \text{ m}^2$ ) mérések közötti, tehát közepes léptékű ( $0,01\text{-}100 \text{ m}^2$ ) sekély felszín alatti talajtulajdonságok feltárásának lehetőségei terén [1]. Itt fontos tisztázni a talajnedvesség-tartalom fogalmát.

A talajnedvesség-tartalom, mint több tudományterület kulcsparamétere (angolban: SWC = soil water content) konkrétan a *térfogati talajvíztartalomra* utal, ami a víztérfogatának, a teljes talajtérfogathoz viszonyított arányát jelenti egy egységre vonatkoztatva [1], [2], [3].

A talajnedvességtartalom meghatározására szolgáló technikák közül kiemelendők a geofizikai eljárások, amelyek minimálisan vagy teljesen roncsolásmentesek, és hatalmas területi lefedettséget képesek megvalósítani a talaj tulajdonságainak meghatározásához. Nagy vonalakban két fő kategória különböztethető meg, nevezetesen a talaj elektromos vezetőképességét [4], [5] mérők, valamint azok a módszerek, melyek során az elektromágneses hullámoknak a talajba történő kibocsájtása, majd detektálása történik. Ilyen, az utóbbi kategóriába sorolható altípus a földradar vagy talajradar (angolban: GPR = ground penetrating radar).

A GPR rendszerek előnye, hogy a hagyományos módszerekkel (pl. termogravimetrius eljárás, időtartománybeli reflexiómérés) szemben az úthálózatok állapota rövidebb idő alatt felmérhető, és roncsolásmentes eszközként lehetővé teszi a pályaszerkezetek állapotának, a földmű minőségének, ill. nedvesség okozta pályaszerkezeti károknak a kiértékelését, így az eljárás előnyös a burkolaton megfigyelhető úthibák megelőzésében. Mindez elősegíti a döntéstámogatást és a fenntartási munkák hatékonyabb kezelését.

Lényeges az alsóbbrendű mezőgazdasági utak, valamint az agro-erdészeti rendszereket kiszolgáló utak, illetve az erdők feltáróhálózata esetén a környezeti jellemzőinek alaposabb vizsgálata, mivel az időjárásnak való kitettség a vékonyabb pályaszerkezet miatt ezeknél az úthálózatoknál erőteljesebben érezteti hatását

Jelen cikk célja áttekintést adni a GPR alapú talajnedvesség-tartalom meghatározásának lehetőségeiről földművek esetében és részletesen bemutatni a szakirodalmat.

## **2. ALAPELVEK ÉS GPR KONFIGURÁCIÓK A TALAJNEDVESSÉG-TARTALOM MÉRÉSEK ESETÉN**

A földradar, terepi gyakorlatban nagy hatékonysággal alkalmazható eszköz, mivel nagyobb talajtérfogat mérésére alkalmazható ( $\text{cm}^3\text{-m}^3$ ), amely előnyössé teszi a *Bevezetésben* már említett szabványos pontmérési technikákkal szemben (pl.: TDR (time-domain reflectometry) és a kapacitás szonda) [6], [7], [8], [9], [10], [11]. A GPR emellett olyan roncsolásmentes geofizikai eljárás, amely nagy felbontási lehetőséget, jelentős behatolási mélységet biztosít a közepes léptékű talajnedvesség

méréseknél [2], valamint jobb időhatékonysággal alkalmazható más roncsolással járó és roncsolásmentes eljárásokkal összehasonlítva [1].

A vizsgálandó közegben lévő anyagok tulajdonságainak észlelésére a GPR nagyfrekvenciás elektromágneses (EM) hullámokat használ (általában 10 és 1200 MHz közötti középfrekvenciákon) [12]. A GPR adó egysége általában EM hullámimpulzusokat továbbít a vizsgálandó közegbe, és a vevő egysége a visszavert jeleket fogadja az idő függvényében. Ezt a kialakítást bisztatikusnak nevezik [13].

A GPR két kulcsparamétere annak felbontása, és behatolási mélysége. A felbontást a GPR által kibocsájtott impulzus időtartama határozza meg, amit pedig a GPR rendszer frekvenciájának sávzélessége. A GPR felbontása, a központi frekvenciájával párhuzamosan növekszik [14]. A feltárható mélység a vizsgálandó talaj elektromos konduktivitásától, valamint a GPR központi frekvenciájától függ. Alacsony vezetőképességű közeg (pl. száraz homok, kavics) esetén az alacsony frekvenciás (50 vagy 100 MHz antennájú) GPR rendszerek néhány 10 méteres, míg a magas frekvenciás típusok (450 vagy 900 MHz) pár méteres behatolási mélységet képesek elérni. Kőzetlisztes homok és agyag esetén a behatolási mélység jelentősen csökken. A GPR tehát kifejezetten érzékeny a talajtextúrára, valamint az elektromos vezetőképességre, ezáltal a sikeres alkalmazhatóságának területe redukálódik [13].

Az EM-hullámterjedés miatt a visszavert jelek hasznos információkat tartalmaznak a vizsgált közegről a dielektromos állandó változás, és ehhez kapcsolódóan a kétirányú futási idő (*two-way travel time*), amplitúdó, hullámforma és fázis tekintetében. A talajközeg esetén a visszavert jelek tulajdonságait főként a talaj dielektromos állandó értéke befolyásolja, amely pedig erősen talajnedvesség függő.

A dielektromos állandó egy „valós” és egy képzetes részből tevődik össze, amelyet komplex dielektromos állandónak nevezünk.

$$\varepsilon^* = \varepsilon_r - j\varepsilon'' \tag{1}$$

ahol

$\varepsilon''$ : a dielektromos állandó 'képzetes' része, amely az energiaelozsláshoz kapcsolódik.

A GPR mérések esetén a sávzélesség értéke alapvetően 10 MHz és 1 GHz közé esik, amely tartományban  $\varepsilon''$  értéke tipikusan kicsi  $\varepsilon_r$ -hez képest, így a vizsgált közeg dielektromos állandója a következőképpen határozható meg:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \tag{2}$$

ahol

$\varepsilon_r$ : egy anyag dielektromos állandója

$\varepsilon_0$ : vákuum dielektromos állandója

A dielektromos állandó valós része ( $\varepsilon_r$ ) egy anyag elektromos térerősség-tárolási kapacitását adja meg a vákuumhoz viszonyítva.

A dielektromos állandó értékében nagy különbségek vannak, így a cseppfolyós halmazállapotú víz értéke 78-88 között változik a hőmérséklet függvényében (az édesvíz pl. ~80), az egyéb talaj alkotó, mint a levegő értéke ~1, vagy szilárd fázisok, kb. 3-10 közöttiek [13], [3], [15]. A három talajalkotó fázis közti jelentős dielektromos állandóban való különbség elsősorban a vízmolekulák magas polarizálhatóságának köszönhető [1].

Ez, a talajban levő dielektromos állandóban való jelentős értékkülönbség a fő oka a GPR-ek talajnedvesség-tartalom mérőeszközeként való használatának [2].

Az 1. táblázat áttekintést ad a különböző anyagok dielektromos állandóiról.

1. táblázat. Dielektromos állandó értékek [16], [15], [17].

Anyag	Dielektromos állandó
Levegő	1

Desztillált víz	80
Édesvíz	81
Durva törmelék, feltöltés	6-12
Beton	7
Aszfalt	3-4
Pályaszerkezet	8
Homok földmű	4-6
Kavics földmű	4-7
Bitumennel stabilizált alapréteg	6-7
Cementstabilizált réteg	8-10
Nedves talaj	30
Fagyott talaj	6
Száraz, homokos talaj	3
Nedves, homokos talaj	19-25
Száraz, iszapos talaj	2,5
Nedves, iszapos talaj	19
Száraz, agyagos talaj	2
Nedves, agyagos talaj	15-25
Agyag	5-40
Kőzetliszt	10
Köves talaj	7

Tekintettel arra, hogy a GPR-ek által kibocsájtott hullámok minden irányba terjednek, ezért egy anomália (pl. vízzel töltött csővezeték a talajban) esetén az arról visszaverődő hullámok előbb érik el a vevőegységet, minthogy a GPR közvetlenül fölötte legyen. A radarképen ezen visszavert hullámok hiperbolaként jelennek meg, mert a példában közvetlenül az említett anomália felett végzett mérés során visszaverődő hullám esetén a legrövidebb az út (idő), és ehhez képest minden más hullám által megtett út hosszabb. A hiperbola domborúságát a talajban levő átlagos hullámsebesség határozza meg (vagyis azt határozza meg, mennyivel hosszabb idő szükséges a hullámoknak az extra távolság megtételéhez [13]).

### 3. GPR ANTENNA RENDSZEREK ÉS MÉRÉS TECHNIKÁK

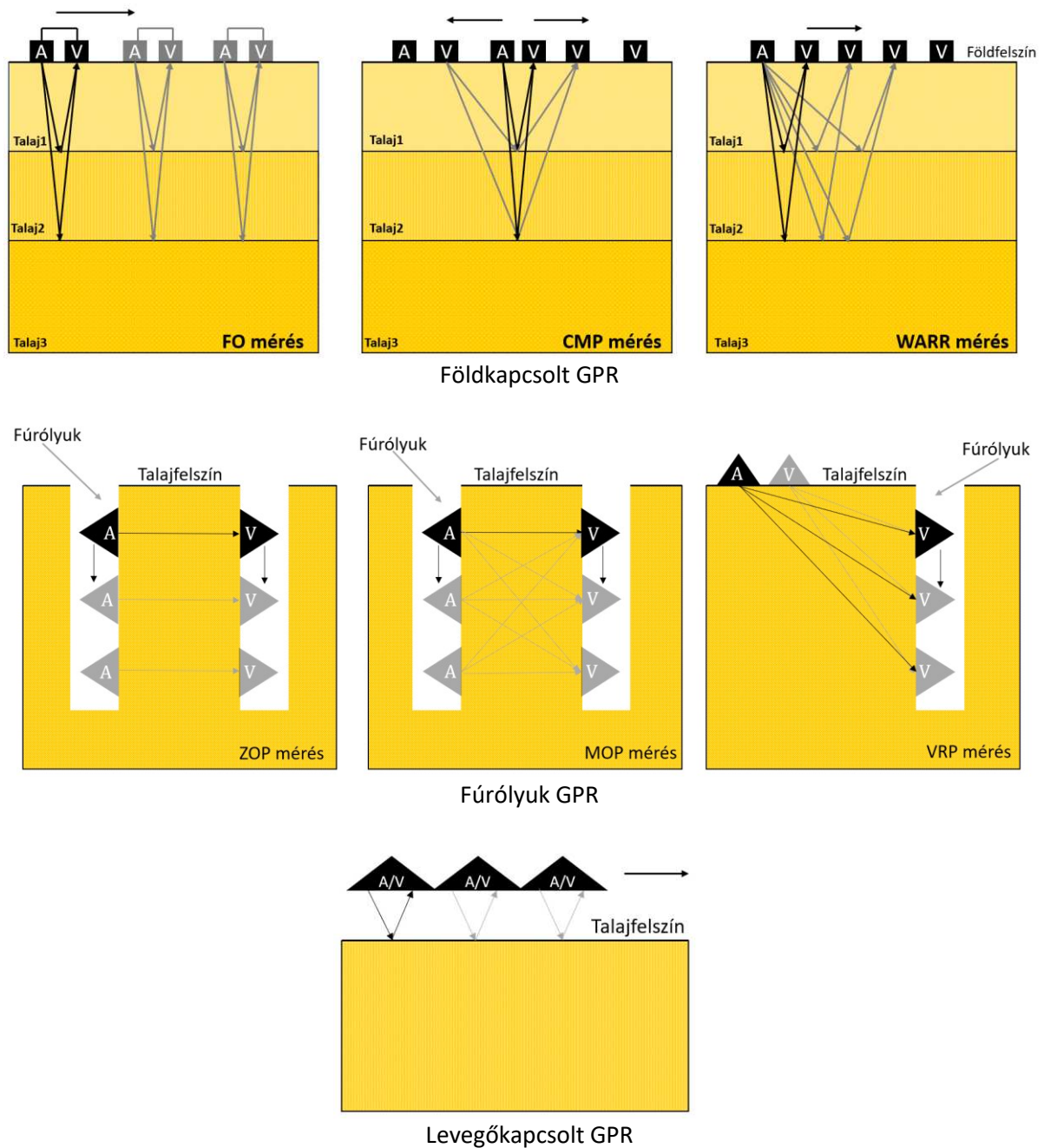
A gyakorlatban jelenleg 3 talajnedvesség-mérésre alkalmazható GPR antenna rendszert alkalmaznak: földkapcsolt (ground-coupled), levegőkapcsolt (air-coupled) és a fúróluk típus (borehole GPR) [2].

A földkapcsolt GPR esetén (ahol a talajjal az antenna teljes kontaktban van, ezáltal nagy behatolási mélységet eredményezve) 3 mérés technika típust különböztethetünk meg:

- Rögzített távolság (*Fix-offset (FO)*): rögzített antenna-távolságot tart fenn az adó és a vevőegység között, amelyeket egyszerre mozgat a mérési vonalon.
- Szélesszögű visszaverődés és refrakció (*wide-angle reflection and refraction (WARR)*): egységközönként növeli a távolságot az adó és a vevő között, de az adót rögzített pozícióba tartva.
- Közös-középpont (*CMP*): egységközönként növeli az adó, és a vevő közötti távolságot (mindkettőt mozgatva), de egy közös középpontot fenntartva.

A WARR és CMP módszereket közös néven „multi-offset” (MO) módszernek (többszörös távolság módszer) nevezik [9].

Ellentétben a talajkapcsolt GPR-rel, a levegőkapcsolt GPR esetén az adatgyűjtés egy meghatározott felszín feletti magasságra beállított antenna segítségével történik [2].



1. ábra. (a): különböző mérés technikák a földkapcsolt GPR-ek esetén (FO, WARR, CMP); (b): fúrólyuk GPR (ZOP, MOP, VRP); (c): levegőkapcsolt GPR mérés technika [18]. Jelmagyarázat: „A”: adó, „V”: vevő.

*Fúrólyuk GPR*: két fúrólyuk között kivitelezett mérés, vagy a felszínről a fúrólyukba [19].

A fúrólyuk GPR-ok esetén a következő három mérési technika (1b. ábra) terjedt el: zero távolság profil (zero-offset profile (ZOP)), több távolságot alkalmazó profil (multi-offset profile (MOP)) és vertikális radarprofil (vertical radar profile (VRP)).

- *ZOP*: a mérés során, a felszín alatti szelvényadatok gyűjtéséhez az adó és a vevő egységet külön-külön fúrásban egyidejűleg mozgatják azonos mélységen egységes lépésközzel [2].
- A *MOP* módszer esetén a vevő egység mozgatása történik a fúrólyukban, miközben az adót a másik fúrólyuk bizonyos mélységében rögzítik egy rész mérésben. Majd a következő rész mérésben egységnyi lépésközzel haladva az adót is mozgatják, így az egy következő fixpontba kerül [2].

- A VRP méréshez csak egy furat szükséges és fúrólukba ereszkedő vevőről történik az adatgyűjtés, míg az adó egység a talajfelszínen rögzített [1].

A ZOP és MOP méréseket „fúrások közötti” (interhole) vagy keresztfúrásos (cross-borehole) módszereknek is nevezik, mert az adatgyűjtés két fúróluk között történik [2].

A módszerek felosztásának további lehetősége aszerint történik, hogy a talajnedvesség-tartalom meghatározására egy antennatávolságból történik (egy távolságos módszer (single-offset method) (FO és ZOP módszerek)), vagy több mérésből, különböző antennatávolságokkal (Több távolság alapú módszerek (multi-offset method) (CMP és WARR módszerek)) [1]. Mindkét esetben a mérés mélységét ismernünk kell.

#### 4. GPR ALAPÚ TALAJNEDVESSÉG-MÉRÉS MÓDSZEREK

Számos, a nedvességérzékelést célzó GPR-alapú módszert fejlesztettek ki különböző alkalmazási területekre [20], [21] és anyagokra, mint például betonszerkezetekre [22], természetes talajokra [23], [24], valamint hengerelt aszfaltkeverékekre [25].

Az elmúlt évtizedekben a földradar (GPR) egy elterjedt mérőeszköze volt a telítetlen zónák hidrológiájának és a vízerőforrások vizsgálatának [1]. A számos felhasználási terület közül kiemelendő a talajnedvesség-tartalom mérés [6], [13], [26].

A GPR-alapú SWC mérési módszerek területén Xinbo és mtsai 2019 [2] rendszerbe foglaltan mutatják be a közelmúltban elért kutatási eredményeket a visszavert hullám (reflected wave), a talajhullám (ground wave), a felszíni visszaverődés (ground wave), a fúróluk GPR (borehole GPR), teljes hullámforma inverzió (full waveform inversion), átlagos burkológörbe amplitúdó (average envelope amplitude) és frekvencia eltolás (frequency shift) módszerek esetén. Xinbo és mtsai 2019 [2] ezen módszereket a vonatkozó alapelvek, előnyök, korlátok és alkalmazási lehetőségek tekintetében részletezik.

##### 4.1. MÓDSZEREK OSZTÁLYOZÁSA

A GPR alapú talajnedvesség-mérési módszerek végén felsoroltakat a 2. táblázat rendszerezi.

2. táblázat. A különböző GPR módszerek [2].

Módszer osztályozása		Méréstechnika	Radar rendszer konfiguráció	Alkalmazott jeltulajdonság	SWC becslés referencia mélység tartomány a	Referencia antenna frekvenciák
Dielektromos állandón alapuló módszerek	Talajhullám módszer	CMP, WARR; FO, MO kombináció	Talajkapcsolt GPR	Idő	≤30 cm	- 225/450/900 225/450 1500 200 (MO) - 225; 450; 450/900; 100/450 (FO)
	Visszavert hullám módszer	MO; FO	Talajkapcsolt GPR	Idő	A visszaverődő felület mélysége	450; 400/200; 400; 250; 450; 900; 225/450/900; 225/450/900/1200; 1000; 100;

						250; 200/400
	Fúróluk GPR módszer	VPR; ZOP; MOP	Fúróluk GPR	Idő	Az adó és a vevő közötti maximális távolság, fúróluk mélység	100;250;100; 200 (VPR; ZOP) 100;200 (MOP)
	Felszínivissza verődés módszer		Levegőkapcsolt GPR	Amplitúdó	≤2 cm	500; 1000
	Teljes hullámforma inverzió	- WARR, CMO; MOP, VPR	SFWC föld feletti monosztatikus GPR; Földkapcsolt GPR; Fúróluk GPR	A rögzített jel minden tulajdonsága	~2 cm (SFWC) - -	1000-2000 (SFWC) - 70/200; 100 - 100/150; 160; 250; 200; 250; 200
	Átlagos burkológörbe amplitúdón alapuló módszer	FO	Talajkapcsolt GPR	Amplitúdó és hullámforma	≤30 cm (a a talajban levő radarjel hullámhosszával azonos nagyságrend)	250; 250/500; 250; 1000; 200
<b>Frekvencia tartomány analízis</b>	Frekvencia eltolás módszer	FO	Talajkapcsolt GPR	Energia és fázis stb.	10 cm	600

A felvázolt 7 módszer közül egyedül a frekvencia eltolás módszer esetén, a GPR adatokból direkt módon a frekvenciából történik adatkinyerés.

Az összes többi eljárás (lásd 2. táblázat) a dielektromos állandón alapuló módszerek közé sorolható, mert ezek a talaj dielektromos állandóját igyekeznek első körben meghatározni, majd abból helyszíni kalibrációval, vagy empirikus összefüggés segítségével a talajnedvességre következtetni úgynevezett petrofizikai (kőzetfizikai) összefüggés segítségével. A petrofizikai összefüggéseknek 3 csoportja ismeretes:

- Empirikus összefüggések, pl.: [27], [28], [29], [30], [31], [32]
- Térfogati keverés formulák, pl.: [33], [34], [35], [36], [37].
- Effektív közeg megközelítések, pl.: [38], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46], [47].

## 5. KŐZETFIZIKAI ÖSSZEFÜGGÉSEK

### 5.1. EMPIRIKUS ÖSSZEFÜGGÉSEK

A terepi és laboratóriumi méréseken alapuló, empirikusan levezetett összefüggések kevésbé összetettek, mint a fizikai modellek, ezért könnyebben alkalmazhatók számos talajszerkezetre és víztartalom-feltételre, mivel a talaj szerkezeti tulajdonságairól (pl. térfogatsűrűség, porozitás, pórusszerkezet stb.) csak korlátozott információt igényelnek [3].

Az empirikus típus legelterjedtebb példája a Topp egyenlet [27], [48], [49], [3].

$$\theta_{soil} = -5,3 * 10^{-2} + 2,92 * 10^{-2} \varepsilon_r - 5,5 * 10^{-4} \varepsilon_r^2 + 4,3 * 10^{-6} \varepsilon_r^3 \quad (3)$$

ahol  $\theta_{soil}$ : térfogati talajnedvesség



Gerhards és mtsai. 2008 [11] arra a következtetésre jutottak, hogy ez az összefüggés megfelelően alkalmazható a levegőszárazságtól, a víztelítettségig terjedő nedvességviszonyok között,  $0,013 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  előrejelzési hibával.

A Topp egyenlet tehát empirikus módon lett a különböző fizikai talajféleségekre (különböző textúrával rendelkező ásványi talajokra) meghatározva. Pontossága Jacobsen és Schjønning 1994 [50] validációja alapján:  $0,022 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$

A Topp egyenlet elsősorban homokos talajok esetén alkalmazható [27] [51].

Nadler és mtsai 1991 [28] a különböző víztartalmú rétegek egymásra helyezésének (pl. száraz a nedvesen, nedves a szárazon) hatásait vizsgálta iszapos vályogban TDR szondák segítségével. Az eredményeik a következő empirikus összefüggésre vezettek:

$$\theta = -7,25 \cdot 10^{-2} + 3,67 \cdot 10^{-2} \varepsilon_r - 12,3 \cdot 10^{-4} \varepsilon_r^2 + 15 \cdot 10^{-6} \varepsilon_r^{-3} \quad (4)$$

Nadler és mtsai 1991 [28] eredményeinek fő következtetése, hogy módszerükkel pontos víztartalom meghatározás végezhető TDR szondatípustól és talajrétegzettségétől függetlenül, kivéve, ha nagyon száraz talaj kerül nagyon nedves fölé [3].

Curtis 2001 [32] a dielektromos tulajdonságait mérte számos száraz térfogatsűrűséggel rendelkező talajminta esetén, 100 MHz-es frekvencián működő koaxiális átviteli-reflexiós berendezéssel, és a következő harmadrendű polinomot javasolták:

$$\theta = -2,86 + 2,435 \varepsilon_r - 3,421 \cdot 10^{-2} \varepsilon_r^2 + 2,37 \cdot 10^{-4} \varepsilon_r^3 \quad (5)$$

Curtis 2001 [32] rámutatott, hogy a talaj víztartalmának mérési pontossága a jel frekvenciájától függ, és a térfogati víztartalmat 10%-kal alulbecsüli az általuk javasolt egyenlet (5) a nagyfrekvenciás (pl. 500–1000 MHz) méréseknél, amennyiben a dielektromos állandó értéke is nagy egyúttal (pl.  $\varepsilon_r \geq 30$ ).

Más kutatók a talaj szerkezetének, sűrűségének és szervesanyag-tartalmának hatásait igyekeztek közvetlenül beépíteni a dielektromos állandó mérésébe az empirikus összefüggések kialakítása során. Erre jó példa a [30] által kifejlesztett szabványos harmadrendű polinom.

$$\theta = -7,01 \cdot 10^{-2} + 3,47 \cdot 10^{-2} \varepsilon_r - 11,6 \cdot 10^{-4} \varepsilon_r^2 + 18 \cdot 10^{-6} \varepsilon_r^3 \quad (6)$$

Az összefüggést használva, a TDR mérések alapján talajmintákból  $0,012 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  előrejelzési hibával számolhatunk. [30] egy továbbfejlesztett harmadrendű polinomot javasolt, amely magában foglalja a száraz térfogatsűrűség ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ), az agyagtartalom (% w/w) és a szerves anyag (OM, % w/w) hatását:

$$\theta = -3,41 \cdot 10^{-2} + 3,45 \cdot 10^{-2} \varepsilon_r - 11,4 \cdot 10^{-4} \varepsilon_r^2 + 17,1 \cdot 10^{-6} \varepsilon_r^3 - 3,70 \cdot 10^{-2} \rho_b + 7,36 \cdot 10^{-4} (\text{agyag}) + 47,7 \cdot 10^{-4} (\text{OM}) \quad (7)$$

A Jacobsen és Schjønning 1993 [30] által fejlesztett összefüggéseket a durvaszemcstől egészen a homokos agyag és vályog talajtextúrákig tesztelték. A száraz térfogatsűrűség, agyagtartalom és a szerves anyag tartalom hatásának figyelembevétele a becslési hibát  $0,0097 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ -ra csökkentette.

## 5.2. TÉRFOGATI KEVERÉS FORMULÁK

A talajnedvesség-tartalom és a dielektromos állandó közötti kimondottan elméleti alapú megközelítések, minden talajösszetevőnek a térfogati frakcióit és a dielektromos állandóját veszik alapul a kapcsolat felállítására. Ilyen típusú modell CRIM (Complex Refractive Index Model) modell, amelyben a talaj-levegő-víz rendszer dielektromos állandója [33], [43], [44], [35], [36], [37], [52] a következő képlettel fejezhető ki:

$$\varepsilon_b = [\theta \varepsilon_w^\alpha + (1 - n) \varepsilon_s^\alpha + (n - \theta) \varepsilon_a^\alpha]^{\frac{1}{\alpha}} \quad (8)$$

ahol  $n$ : talaj porozitás ( $m^3 m^{-3}$ ),  $\varepsilon_w \varepsilon_s \varepsilon_a$ : víz, talaj részecskék és a levegő dielektromos állandója,  $\alpha$ : az elektromos mező orientációját meghatározó faktorszám, amely a vizsgálandó közeg geometriáját figyelembe veszi.

$\alpha$  értékei a következők lehetnek:  $\alpha = 1$ , ha az elektromos mező párhuzamos a talajrétegekkel.  $\alpha = -1$ , amennyiben az elektromos mező merőleges a talajrétegekre, és  $\alpha = 0,5$ , ha izotropikus a közeg. Ezen utóbbi azt jelenti, hogy a fáziskeverékeken keresztülhatoló hullám futási ideje egyenlő a fázisalkotókon áthaladó hullámok térfogatsúlyozottan figyelembe vett futási idejének összegével [1].

(8) egyenlet átrendezésével a talajnedvesség-tartalom kifejezhető a következő szerint:

$$\theta = \frac{\varepsilon_b^\alpha - (1 - n)\varepsilon_s^\alpha - \varepsilon_a^\alpha}{\varepsilon_w^\alpha - \varepsilon_a^\alpha} \quad (9)$$

$\varepsilon_a = 1$ , és  $\alpha = 0,5$ , akkor az egyenlet a következő szerint redukálódik.

$$\theta = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_w} - 1} \sqrt{\varepsilon_b} - \frac{(1 - n)\sqrt{\varepsilon_s} - n}{\sqrt{\varepsilon_w} - 1} \quad (10)$$

A (10) egyenlet fizikai értelmezése egy szimpla talajnedvesség-dielektromos állandó összefüggés révén [53] szerint:

$$\theta = a\sqrt{\varepsilon_b} - b \quad (11)$$

ahol  $a, b$ : kalibrációs paraméterek.

Dobson és mtsai 1985 és Roth és mtsai 1992 [35], [29], valamint Patriarca és mtsai 2014 [54] kutatásaik a térfogati keverés módszerekre megállapították, hogy agyagos talajban nedves kondíciók esetén megbízhatatlanok lehetnek tekintettel az agyag duzzadóképességére. Ez konkrétan az elektromos tulajdonságok alulbecsléséhez vezet a modell esetén.

Jacobsen és Schjønning 1994 [50] ásványi talajokon végzett független validációs kutatása alapján a (11) összefüggés pontossága:  $0,0188 m^3 m^{-3}$ .

### 5.3. EFFEKTÍV KÖZEG MEGKÖZELÍTÉSEK

Ezen módszerek figyelembe veszik egy kompozit anyag minden komponensének texturális és szerkezeti hozzájárulását ezen kompozit anyag dielektromos állandójához. Az effektív közegmegközelítés módszerek mikroléptékű geometriai modelleken alapulnak, amelyek a heterogén rendszerre vonatkozó texturális és szerkezeti információkat használnak fel a dielektromos tulajdonságok meghatározására. Az ilyen módszereken alapuló kutatások rámutattak, hogy egy közeg dielektromos tulajdonságainak a porozitás és a víztartalom függvényében való modellezésével nem érhető el megfelelő pontosság a nedvességbecslésben [3]. Az irodalomban található különféle effektív közegközelítés módszerek közül az [55] által javasolt EMA megközelítés egy hozzávetőleges víztartalom-permittivitás összefüggést ad, amelyet az effektív közegközelítés alkalmazásával kapunk véletlenszerű fáziskeverékben. Ez utóbbi modellezése a Multi-Indicator modellen keresztül történik változó sugarú gömbelemekkel. A számítás menetét a következő egyenletet adja:

$$\theta = \frac{(\varepsilon_w + 2\varepsilon_r)[(\varepsilon_a + 2\varepsilon_r)(\varepsilon_r - \varepsilon_s) + 3\varepsilon_r\phi(\varepsilon_s - \varepsilon_a)]}{2\varepsilon_r(2\varepsilon_r + \varepsilon_s)(\varepsilon_w - \varepsilon_a)} \quad (12)$$

ahol  $\phi$ : talaj porozitás,  $\varepsilon_r$ : az anyagterfogat dielektromos állandója,  $\varepsilon_a$   $\varepsilon_w$   $\varepsilon_s$ : levegő, vízkomponens, és talajmátrix dielektromos állandó értéke.

A frakciók relatív térfogata:  $n_s = 1 - \phi$  (szilárd térfogat frakció),  $n_w = 0$  (térfogati víztartalom),  $n_a = \phi - \theta$  (levegőtérfogat frakció). A levegő és a víz dielektromos állandó értékei fixáltak, és amennyiben az összes porozitás adott, a (12) egyenlet már csak a szilárd fázis dielektromos állandójának függvénye.

## 6. VISSZAVERT HULLÁM MÓDSZER

A visszavert hullám módszer esetén, a visszavert hullámadatok rögzítésére elsősorban földkapcsolt GPR-t alkalmaznak. A 2. ábrán vázolt módon, a GPR által kibocsájtott EM hullámok, miután visszaverődésen, átvitelen és hullámtörésen mentek keresztül a levegőben és két talajrétegen, akkor különböző módokon érik el a vevőt, így azok levegő, talaj, visszavert és megtört hullámként funkcionálnak. [13] szerint a visszavert hullámsebesség a talaj elektromos értelemben vett áteresztőképességétől (dielektromos állandójától) függ, amennyiben nemmágneses, alacsony vezetőképességű talajról beszélünk:

$$v_{soil} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{soil}}} \quad (13)$$

ahol  $v_{soil}$ : a visszavert hullám talajban való átlagos terjedési sebessége,  $\varepsilon_{soil}$ : talaj dielektromos állandója,  $c$ : elektromágneses hullám vákuumban való terjedési sebessége  $2 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$

Megjegyezzük, hogy a képlet speciális eset, amennyiben tehát ott a relatív mágneses permeabilitás = 1.

A módszer során a visszaverő felület (talajnedvesség) mélységét ismerni kell, melyet a GPR mérésén túl külön kell kivitelezni [56], [57]. Ismert mélység esetén tehát a vevőegységbe érkező hullámok idejéből (amely tehát ez esetben a talajnedvességről verődik vissza) könnyedén kiszámítható a vadózus zóna átlagos talajnedvesség-tartalma a következő összefüggés segítségével:

$$v_{soil} = \frac{2d}{t_{rw}} \quad (14)$$

ahol  $t_{rw}$ : a visszavert hullám kétirányú futásideje,  $d$ : talajvízszint mélység [13]

Amikor az antennatávolság jelentős, akkor a (14) egyenlet a következőképpen módosul egytávolságos módszerek esetén [1]:

$$v_{soil} = \frac{2\sqrt{d^2 + (0,5a)^2}}{t_{rw}} \quad (15)$$

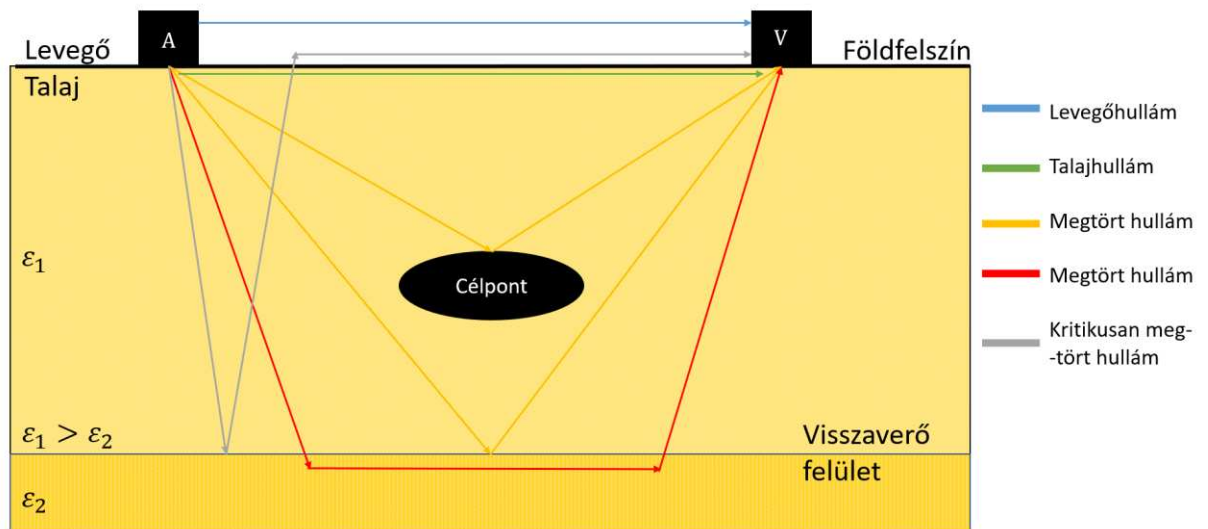
ahol  $a$ : antennatávolság [13]

A talajnedvesség tehát (14) és (15) egyenlet segítségével határozható meg, ha  $v_{soil}$  meghatározása a GPR jel felhasználásával történt. Az így kiszámított SWC a talajfelszín és a visszaverő felület közti talajnedvességet reprezentálja (tehát annak a talajszelvénynek, amin átmege a hullám).

A módszer fő lépései:

- Visszaverődés adatok gyűjtése GPR segítségével
- Az átlagos terjedési sebesség meghatározása a visszaverő felület felett.

- Az átlagos terjedési sebesség konvertálása a talaj dielektromos állandójává, majd az SWC meghatározása.



2. ábra. Az elektromágneses hullámok behatolási útja a talajban, ahol két eltérő dielektromos állandóval rendelkező réteg található [13] alapján.

Miután visszaverő felület kiválasztásra került, az átlagos terjedési sebesség meghatározása pl. FO (fixed offset) segítségével történhet. Konkrét menete, hogy a visszaverő felület mélységet elosztják a visszaverődő hullám egyutas futási idejével (one-way travel time) [7], [50], [58], [8] majd az adatokat, a radarképen megjelenő visszaverődési hiperbolákhoz illesztik [13].

A fenti módszer mellett, az MO mérés technika alkalmazásával az átlagos terjedési sebességet, a normál futási sebesség elemzése (normal move-out velocity analysis) révén is kiszámíthatjuk, de az intervallumsebesség-profilok is meghatározhatók Dix-egyenlettel [59], [3].

$$v_{int,n} = \sqrt{\frac{t_{rw,n} v_{soil,n}^2 - t_{rw,n-1} v_{soil,n-1}^2}{t_{rw,n} - t_{rw,n-1}}} \tag{16}$$

ahol  $v_{soil,n}$ : átlagos terjedési sebesség a felszíntől a legalsó rétegig (n),  $v_{soil,n-1}$ : átlagos terjedési sebesség a felszíntől az alsó rétegig (n-1),  $t_{rw,n}$ : kétutas futási idő (n) réteg aljáig,  $t_{rw-1}$ : kétutas futási idő (n-1) réteg aljáig, n=1 a talaj felső rétege.

A két mérési eljárás (FO és MO) tekintetében az FO (fixed offset) mérés előnye az egyszerű kivitelezhetőség és a kényelmes adatfeldolgozás, és így alkalmas a nagy területen, és helyben (in situ) történő SWC feltérképezésre [8]. Az FO mérés alkalmazása azonban előre ismert mélységű visszaverő felületet követel. Az MO-méréssel részletes SWC feltárás kivitelezhető a vertikális talajprofilban, és lehetővé teszi a talajfelszín és a visszaverő felület közötti átlagos terjedési sebesség mérését, még akkor is, ha a vizsgálandó (visszaverő) felület mélysége ismeretlen. Az adatgyűjtési folyamat hátránya viszont az FO-hoz képest annak jelentős időigénye.

Összefoglalva, a visszavert hullám módszerrel egyszerűen, viszonylag nagy talajmélységben lehetséges az SWC feltérképezése. A módszer nagy hátránya, hogy a számított SWC-k eloszlása a visszaverő felület helyzetétől függ. Így egy adott talajréteg talajnedvesség-tartalma nem határozható meg direkt módon.

## 7. TALAJHULLÁM MÓDSZER

A talajhullám módszer és az előzőekben bemutatott visszaverthullám-módszerek alapja hasonló. Mindkét eljárás talajkapcsolt GPR-t használ az adatgyűjtéshez (2. ábra).

A talajhullám módszer azonban korlátozott mélységű felszínközeli talajon képes áthaladni a visszaverthullám-módszerhez képest (2. ábra), ezáltal az SWC becslést csak korlátozott mélységben teszi lehetővé. [7] kutatásai alapján a talaj felső 20 centiméterében tárható fel a talajnedvesség-tartalom, függően a felszíni körülményektől és műszer beállításoktól. A behatolási mélység ( $h$ ) azonban nem szigorúan meghatározott, három különböző képlettel számítható [60], [56], [61].

$$h = 0,5 \cdot \frac{c}{f \cdot \varepsilon_{soil}^{\frac{1}{2}}} \quad (17)$$

$$h = 0,5 \cdot \sqrt{c \cdot \frac{s}{f \cdot \varepsilon_{soil}^{\frac{1}{2}}}} \quad (18)$$

$$h = 0,145 \cdot \sqrt{\frac{c}{f \cdot \varepsilon_{soil}^{\frac{1}{2}}}} \quad (19)$$

ahol  $f$ : GPR középfrekvencia,  $s$ : antenna távolság

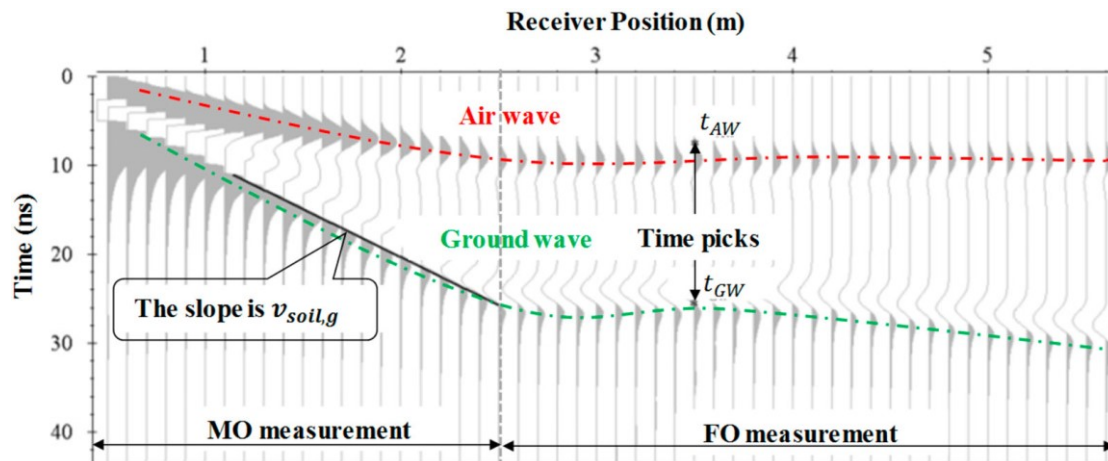
[62] kutatásai alapján a talajhullám módszerrel csupán 20 cm-es mélységben volt mérhető az SWC (450, 900 MHz középfrekvenciák mellett).

A talajhullám-módszer esetén FO és MO méréstechnika egyaránt alkalmazható a talajhullám terjedési sebességének meghatározására, amit később dielektromos állandóvá konvertálnak, majd az SWC-t határozzák meg.

MO méréstechnika esetén az antenna távolság és a talajhullám behatolási ideje között lineáris korreláció van, ezért a terjedési sebesség a talajhullám jel meredekségéből könnyen meghatározható (3. ábra, fekete vonal) [63], [13]. Az MO méréstípus ugyanakkor időigényes, így a nagyterületen való SWC térképezés ezzel nem praktikus. Az FO méréstípus esetén, amennyiben megfelelő az antenna távolság, akkor a talajhullám a levegőhullámtól elkülöníthető. Ezért a talajhullám sebessége ( $v_{soil,g}$ ) minden FO mérésnél meghatározható, az antenna távolság ( $s$ ), valamint a talajhullám ( $t_{GW}$ ) és a levegőhullám érkezési idejének ( $t_{AW}$ ) és felhasználásával [61] alapján:

$$v_{soil,g} = \frac{cs}{c(t_{GW} - t_{AW}) + s} \quad (20)$$

ahol  $v_{soil,g}$ : talajhullám sebessége,  $t_{GW}$ : talajhullám érkezési ideje,  $t_{AW}$ : levegőhullám érkezési ideje,  $s$ : antenna távolság.



3. ábra. MO és az FO mérés technikák kombinációjának eredménye (az ábra bal fele az MO, a jobb fele pedig az FO)  $v_{soil,g}$  a talajhullám terjedési sebességét reprezentálja, amit a jel meredekségéből származtatnak (MO);  $t_{GW}$ : talajhullám érkezési ideje,  $t_{AW}$ : levegőhullám érkezési ideje (FO) [6].

A talajhullám-módszer hatékony felhasználásához [60], [61] a két mérési technika kombinált alkalmazását javasolta az SWC eredményes meghatározásához, amely a következő 3 lépést jelenti:

- (i) Különböző antenna-távolságára becsült talajhullám futási idejével meghatározása többtávolság (MO) alapú módszerrel.
- (ii) MO-mérés (WARR vagy CMP) segítségével megfelelő antennatávolság kialakítása a földi és légi hullámok elkülönítésére, és
- (iii) az FO mérés adaptálása a fent említett antennatávolság alkalmazásával, a nagy területen történő adatgyűjtéshez, a talajhullám futási idejének változása, valamint a talaj dielektromos állapotjában történő változás közötti kapcsolat felállítása [1] (majd SWC eloszlás térkép létrehozása). Ezt a megközelítést számos más tanulmány is igazolta [63], [64], [62], [65], [10].

A módszer előnye, hogy csak magát a talajhullámot kell értelmezni a GPR adatai alapján, de a visszaverődő felület előzetes ismerete nem szükséges.

A módszer hátrányai: csekély behatolási mélység; talajhullámok gyorsan csillapodnak, és érzékenyek a zajhullámokra, ami a mért adatok értelmezést nehezíti. A talajkondíciók (talajtípusok) és a radarbeállítások tovább korlátozhatják a rendszert gyakorlati szempontból. [10] kedvezőtlen eredményeket kapott a módszer agyagban gazdag talaj esetén való alkalmazásánál, míg [66] pedig az útpályaszerkezetek esetén történő nedvességtartalom kiértékelésénél kapott megbízhatatlan eredményeket.

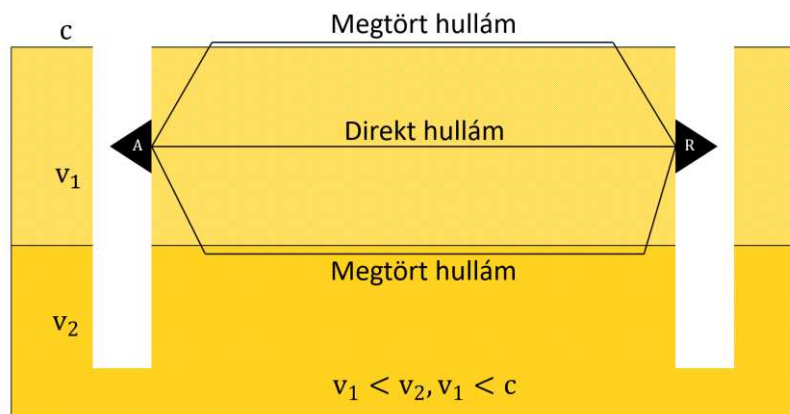
## 8. FŰRÓLYUK GPR MÓDSZER

A fűrőlyuk GPR mérés kivitelezése egy vagy két fűrőlyuk segítségével történik, amelyekben az adó és vevőantennák elhelyezkednek. Hagyományosan a vevő által több pozícióból befogott direkt hullámok futási idejét használják a fűrőlyukak közötti terjedési sebesség-eloszlás meghatározásához. A fűrőlyukak közötti távolságok ismertek. Ezeket a sebességeket dielektromos állandóvá és talajnedvességgé konvertálják a (13) és (3) egyenletek szerint.

A fűrőlyuk GPR-ek esetén alkalmazott mérés technikák (ZOP, MOP, VRP mérés), melyek bemutatását a *GPR antenna rendszer és mérés technikák* c. fejezetben megtettük, lehetőséget adnak, hogy az SWC eloszlást tudjunk a fűrőlyukak körül és között meghatározni. ZOP esetén a direkt hullámok futási idejét, valamint a két fűrőlyuk közötti ismert távolságot felhasználva számolják az átlagos terjedési sebesség profilt, amit pedig az 1D-s SWC profil meghatározásához használnak két fűrőlyuk között [67]. A MOP mérés technika esetén először a direkt hullámok futási idejét felhasználva

a terjedési sebesség profil 2D-s tomográfiai képét hozzák létre [67], [68], amiből az SWC eloszlás térképet készítenek el két fúróluk között. A VRP mérés technika esetén az antenna helyzete és a direkt hullám érkezési ideje használatos az intervallum-sebesség meghatározására a mélységgel, így a fúróluk körüli SWC könnyen számítható.

A fúróluk GPR mérés technika magasabb felbontást és nagyobb feltárási mélységet (pár 10 méteres) biztosít, mint a föld- vagy levegőkapcsolt megoldások. Emellett akár az SWC horizontális eloszlását is meg lehet vele határozni, amennyiben a fúróluk maga is horizontális kivitelezésű [65], [69]. A fúrólukas GPR esetén jelentős probléma a direkt hullám futási idejének pontos meghatározása. [13] rámutatott, hogy a módszer a környező talajra nézve destruktív, és a mérés maga a két fúróluk közé (ZOP, MOP), vagy köré (VRP) korlátozódik. A 2D és 3D SWC tomográfia alkalmatlan az erősen dinamikus hidrológiai körülmények között, mivel néhány esemény az időigényes adatgyűjtési folyamat alatt következik be.



4. ábra. A direkt és megtört hullámok behatolási útja alacsonysebesség-zónás talajba a fúrólukas GPR mérés esetén [2].

### 9. FELÜLETI VISSZAVERŐDÉSEN ALAPULÓ MÓDSZER

Levegőkapcsolt GPR segítségével mono, vagy bisztatikus konfigurációt valósít meg. A GPR antennák a felszín felett vannak bizonyos magasságban, valamely járműre rögzítve [13]. A módszer először a levegő és a földfelszín között a reflexiós koefficiens határozza meg [23], majd ezután a talaj dielektromos állandóját és végül az SWC-t.

A levegő, felszín érintkezési felületre a következő egyenlettel lehet kifejezni a reflexiós koefficiens:

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{air}} - \sqrt{\epsilon_{soil}}}{\sqrt{\epsilon_{air}} + \sqrt{\epsilon_{soil}}} = \frac{1 - \sqrt{\epsilon_{soil}}}{1 + \sqrt{\epsilon_{soil}}} \quad (21)$$

$\epsilon_{soil}$  a (21) egyenletből fakadóan R ismeretében közvetlenül meghatározható. R pedig a (22) egyenlettel számítható, a talajfelszín visszaverődés amplitudójának (A) és egy tökéletes vezető lapról való visszaverődés amplitudójának ( $A_{PEC}$ ) (nagyobb, mint a radarantenna észlelési hatóköre, amelyet GPR-rel mértek azonos magasságban) felhasználásával, az alábbiak szerint:

$$R = -\frac{A}{A_{PEC}} \quad (22)$$

Ezért a dielektromos állandó a következő módon fejezhető ki [70], [71] [23].

$$\epsilon_{SOIL} = \left( \frac{1 + \frac{A}{A_{PEC}}}{1 - \frac{A}{A_{PEC}}} \right)^2 \quad (23)$$

Ezt követően az SWC meghatározása Topp egyenlettel történik (lásd 3. egyenlet) a (23) egyenletben meghatározott  $\varepsilon_{SOIL}$  felhasználásával.

A reflexiókoefficiens érzékenyebb a talajnedvesség-változásra alacsonyabb nedvességtartalom esetén [13].

A „radarlábnyom”, vagyis az említett radarantenna észlelési hatóköre az első ún. Fresnel zóna átmérőjével (FZD) becsülhető:

$$FZD = \left( \frac{\lambda^2}{4} + 2h\lambda \right)^{0,5} \quad (24)$$

ahol  $\lambda$ : hullámhossz (c/f a levegő esetén) a GPR antenna középfrekvenciáján, h: az antenna föld feletti magassága [13].

A (24) összefüggés alapján, 1 GHz-es, a felszín felett 1 méteres magasságban működő antenna esetén 0,79 x 0,79 kalibrációs „radarlábnyomot” javasol, míg ugyanebben a magasságban, egy 225 MHz-es antenna esetén 1,76x1,76-ost.

Serbin és Or 2003, Ardekani 2013 [26], [72] kutatásai alapján ezzel a módszerrel csupán kb. 1-2 cm a behatolási mélység, amelyben SWC értéke meghatározható, azonban [13] 20 cm-es feltárást közöl.

A mérés pontossága alapvetően a befogott jel amplitúdóján múlik. A mért amplitúdókban fellépő csupán 1%-os hiba, már jelentős hibát  $\pm 0,02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  jelent 0,30  $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$  talajnedvesség-tartalom esetén [70]. Az amplitúdón túl a felszín érdessége az antenna frekvencia és magasság, valamint a talajnedvesség mélységgel való változása is meghatározó, ugyanakkor ezekkel a tényezőkkel a (23) egyenlet nem számol [70], [13], [26], [23].

A felületi visszaverődésen alapuló módszert összefoglalva elmondható, hogy gyors az adatgyűjtési lehetőség, relatíve egyszerű a módszerkivitelezés és teljes a roncsolásmentesség, hiszen mérés alatt nem érintkezik az eszköz a felülettel [73], [18]. A módszer hátránya a limitált mélység, és a felszínérdességre és vegetációra való érzékenység. Megjegyzendő továbbá, hogy alacsony talajnedvesség-értékek esetén ez a technika kifejezetten érzékeny a talajnedvesség-változásra.

## 10. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk során áttekintettük a GPR-ek, mint roncsolásmentes rendszerek működésének alapelveit, valamint helyét és szerepét a talajnedvesség-meghatározásban. Kiemeltük, hogy a rugalmas pályaszerkezet sérüléseinek - melyek sok esetben a felszínről közvetlenül nem észlelhetők – és korai tönkremenetelének elsődleges forrása a hézagokon és csatlakozási pontokon beszivárgó feles vízmennyiség. A GPR rendszerek előnye, hogy a hagyományos módszerekkel szemben az úthálózatok rövidebb idő alatt ellenőrizhetőek, és roncsolásmentes műszerként lehetővé teszik a pályaszerkezetek állapotának, a földmű minőségének, ill. nedvesség okozta pályaszerkezeti károknak a kiértékelését, így az eljárás a pályaszerkezet felső felületén alapvetően láthatatlan súlyos károk megelőzésében jelenthet megoldást. Mindez a döntéstámogatást és a fenntartási alapok leghatékonyabb kezelését teszi lehetővé.

A cikkben a 7 konkrét módszer közül négyet mutattunk be részletesebben. Hardver tekintetében talajkapcsolt GPR-t használnak a következő módszerek: visszaverthullám-módszer, talajhullám-módszer, frekvencia eltolás és az átlagos burkológörbe amplitúdója. A vizsgálat során az eszköz érintkezik a talajjal, így csak a felszín alatt jelent roncsolásmentességet. A talaj felületének érdessége, a vegetáció, és adott esetben akadályok az antenna áthelyezésekor azok a tényezők, amik az adatminőséget befolyásolják. Ezen módszereknél az elektromágneses hullám direktben áthalad a teljes talajprofilon, és nem konkrétan egy kiválasztott talajrétegre irányul, ezért, ha az SWC-t intervallumokra, rétegekre akarjuk meghatározni, az további plusz feladat. Talajnedvesség meghatározásához, jelentősebb mélységigény esetén, az ezt biztosító antennafrekvencia kiválasztása is szükséges [13].

A talajvisszaverődés módszer levegőkapcsolt GPR antennát használ, amely teljes roncsolásmentességet biztosít, azonban néhány centiméterre szűkül a feltárási mélység, és a



növényborítottságra is érzékeny ez a megoldás. Az FWI módszer szintén levegőkapcsolt GPR-t használ, a pontosság növelésére alkalmazható, valamint a felszínivisszaverődés módszer okozta kalibrációs szükséglet elkerülésére [2].

A használt jelattribútumokhoz a visszavert hullám, a talajhullám és a fűrőlyuk GPR módszerek a jel kétirányú futási idejét használják az átlagos hullámterjedési-sebesség kiszámításához; a felületi reflexiós módszer a levegő és a talaj felszíne közötti határfelületről való visszaverődés amplitúdóit veszi igénybe a visszaverődési együttható kiszámításához.

A műszaki keretekhez a visszaverthullám, a talajhullám és a fűrőlyuk módszerekhez először a rendelkezésre álló radarhullámok átlagos sebességének meghatározása szükséges, amelyet a dielektromos állandó, majd az SWC számításához használnak. A felületi reflexiós módszerrel a reflexiós együttható és a talaj dielektromos állandója között határoznak meg összefüggést, az FWI és AEA módszerekkel pedig a radarjelekből közvetlenül is meghatározható a talaj dielektromos állandója. Nyilvánvaló, hogy a hat módszer (dielektromos állandó alapú módszerek) megköveteli az  $\epsilon_{soil} - \theta_{soil}$  összefüggést a talaj dielektromos állandójának SWC-vé alakításához, de a pontos összefüggést terepen kell kalibrálni [3], így ez a hat módszer nem biztosít gyors és pontos SWC feltérképezési lehetőséget. Összehasonlításképpen, a frekvenciaeltolós módszer az SWC-t egyszerűen FFT (fast Fourier transformation) használatával kapja meg a radarjelekhez, és kiküszöböli a talaj dielektromos állandójából az SWC-re való átalakítás hibáit [3].

A hét módszer fejlesztéseit és alkalmazási lehetőségeit figyelembe véve a visszaverthullám, a talajhullám és a fűrőlyuk módszereket fejlesztették ki korábban, és alkalmazták azokat széles körben, de jelenleg számos korlátjuk ismeretes, mint például a talajhullám gyors csillapodása és a GPR adatok nehézkes értelmezhetősége, erős függés a visszaverő felületektől, valamint helyhez kötött mérés. A felületi reflexiós és FWI-módszereket eddig elsősorban ellenőrzött körülmények között kivitelezett kutatások esetén alkalmazták, és ezek elméletei további finomításra szorulnak. A legfrissebb fejlesztések, vagyis az AEA és frekvenciaeltolás-módszerek pedig a működési eljárásuk mielőbbi pontos letisztázását igénylik az agyagban gazdag talajok vizsgálatához.

## 11. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Jelen publikáció a TKP2021-NKTA-43 azonosítószámú projekt keretében az Innovációs és Technológiai Minisztérium (jogutód: Kulturális és Innovációs Minisztérium) Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NKTA pályázati program finanszírozásában valósult meg.

## 12. IRODALOMJEGYZÉK

[1]: Tosti, F. & E. Slob. 2015: Determination, by Using GPR, of the Volumetric Water Content in Structures, Substructures, Foundations and Soil, Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-04813-0\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-04813-0_7)

[2]: Xinbo, L., Jin, C., Xihong, C., Qixin, L., Xin, C. & Xuehong, C. 2019: Measurement of soil water content using ground-penetrating radar: a review of current methods, International Journal of Digital Earth, 12:1, 95-118, <https://doi.org/10.1080/17538947.2017.1412520>

[3]: Steelman, C.M. & Endres, A. L. 2011: Comparison of Petrophysical Relationships for Soil Moisture Estimation using GPR Ground Waves, Vadose Zone J. 10, pp. 270-285, <https://doi.org/10.2136/vzj2010.0040>

[4]: Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A. & Guy, B.R. 2005: Electrical resistivity survey in soil science: A review, Soil and Tillage Research. 83. 173-193, <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.10.004>

[5]: Sheets, K. R. & Hendrickx, J. M. H. 1995: Noninvasive soil water content measurement using electromagnetic induction. Water Resources Research 31, issn: 0043-1397, <https://doi.org/10.1029/95WR01949>.

[6]: Hubbard, S., Grote, K. & Rubin, Y. 2002: Mapping the volumetric soil water content of a California vineyard using high-frequency GPR ground wave data. Leading Edge 25:552-559. <https://doi.org/10.1190/1.1490641>.

- [7]: Grote, K., Hubbard, S. & Rubin, Y. 2002: GPR Monitoring of Volumetric Water Content in Soils Applied to Highway Construction and Maintenance. *The Leading Edge* 21 (5): 482–504. <https://doi.org/10.1190/1.1481259>.
- [8]: Lunt, I. A., Hubbard, S. S. & Y. Rubin. 2005: Soil Moisture Content Estimation Using Ground-penetrating Radar Reflection Data. *Journal of Hydrology* 307 (1): 254–269. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.10.014>.
- [9]: Galagedara, L. W., Parkin, G. W., Redman, P. von Bertoldi, & Endres A. L. 2005: Field Studies of the GPR Ground Wave Method for Estimating Soil Water Content During Irrigation and Drainage. *Journal of Hydrology* 301 (2005): 182–197. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.06.031>.
- [10]: Weihermüller, L., Huisman, J. A., Lambot, S., Herbst, M. & Vereecken, H. 2007: Mapping the Spatial Variation of Soil Water Content at the Field Scale with Different Ground Penetrating Radar Techniques. *Journal of Hydrology* 340: 205–216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.04.013>.
- [11]: Gerhards, H., Wollschläger, U., Yu, Q., Schiwek, P., Pan, X. & Roth, K. 2008: Continuous and simultaneous measurement of reflector depth and average soil-water content with multi channel ground-penetrating radar. *Geophysics* 73: J15–J23. <https://doi.org/10.1190/1.2943669>
- [12]: Daniels, D. J. 2004: *Ground Penetrating Radar: 2nd Edition*. London: Institution of Electrical Engineers.
- [13]: Huisman, J. A., Hubbard, S. S., Redman, J. D. & Annan, A. P. 2003a: Measuring Soil Water Content with Ground Penetrating Radar. *Vadose Zone Journal* 2 (4): 476–491. <https://doi.org/10.2136/vzj2003.4760>.
- [14]: Davis, J.L. & Annan, A.P. 2002: Ground penetrating radar to measure soil water content. p. 446–463. In *J.H.*
- [15]: Cassidy, Nigel. 2009: Electrical and Magnetic Properties of Rocks, Soils and Fluids. In book: *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*, Chapter 3, 41-72.
- [16]: Berthelot, C., Podborochynski, D., Saarenketo, T., Marjerison B., & Prang, C. 2010: Ground-Penetrating Radar Evaluation of Moisture and Frost across Typical Saskatchewan Road Soils, *Advances in Civil Engineering*, vol. 2010, Article ID 416190, 9 pages, <https://doi.org/10.1155/2010/416190>
- [17]: Reynolds, J. M. 2011: *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, 2nd Edition, ISBN: 978-0-471-48535-3 April 2011, Chapter 13, pp 551.
- [18]: Leng, Z. & Al-Qadi, I. L. 2014: An Innovative Method for Measuring Pavement Dielectric Constant Using the Extended CMP Method with Two Air-coupled GPR Systems. *NDT & E International* 66: 90–98. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2014.05.002>.
- [19]: Slob, E., Sato, M. & Olhoeft, G. 2010: Surface and Borehole Ground-penetrating-radar Developments. *Geophysics* 75 (5): 75A103–75A120. <https://doi.org/10.1190/1.3480619>.
- [20]: Nakashima, Y., Hui, Z., Sato, M. 2001: Estimation of groundwater level by GPR in an area with multiple ambiguous reflections, *Journal of Applied Geophysics*, 2001, Pages 241-249, ISSN 0926-9851, [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(01\)00068-4](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(01)00068-4)
- [21]: Mínguez, M. R. 2012: Aplicación del geo-radar 3D multifrecuencia como herramienta de alto rendimiento para la detección de zonas de acumulación de humedad en obras lineales. *Rutas Técnica*, vol. 150, 6 pp.
- [22]: Hugenschmidt, J., Loser, R. 2008: Detection of chlorides and moisture in concrete structures with ground penetrating radar. *Mater. Struct.* 41, 785–792, <https://doi.org/10.1617/s11527-007-9282-5>.
- [23]: Lambot, S., L. Weihermuller, J. A. Huisman, H. Vereecken, M. Vanclooster, & E. C. Slob. 2006: Analysis of Airlaunched Ground-penetrating Radar Techniques to Measure the Soil Surface Water Content. *Water Resources Research* 42, W1140311, <https://doi.org/10.1029/2006WR005097>.
- [24]: Benedetto, A. & Pensa, S. 2007: Indirect diagnosis of pavement structural damages using surface GPR reflection techniques. *Journal of Applied Geophysics*. 62. 107-123, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2006.09.001>.
- [25]: Sybilski, D., Wojciech, B., Jacek, S. & Krysinski, L. 2012: Reasons of Premature Cracking Pavement Deterioration – A Case Study. 4. 1029-1038, [https://doi.org/10.1007/978-94-007-4566-7\\_98](https://doi.org/10.1007/978-94-007-4566-7_98)
- [26]: Serbin, G. & Or, D. 2003: Near-Surface Soil Water Content Measurements Using Horn Antenna Radar. *Vadose Zone Journal* 2 (4): 500–510. <https://doi.org/10.2136/vzj2003.5000>.
- [27]: Topp, G. C., Davis, J. L. & Annan, A. P. 1980: Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines. *Water Resources Research* 16 (3): 574–582. <https://doi.org/10.1029/WR016i003p00574>.

- [28]: Nadler, A., Dasberg, S. & Lapid, I. 1991: Time domain reflectometry measurements of water content and electrical conductivity of layered soil columns. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:938–943. <https://doi.org/10.2136/sssaj1991.03615995005500040007x>
- [29]: Roth, C.H., Malicki, M.A. & Plagge, R. 1992: Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements by TDR. *J. Soil Sci.* 43:1–13. Hydraulic Properties.” *Advances in Water Resources* 54 (2013): 38–56, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1992.tb00115.x>.
- [30]: Jacobsen, O.H., & Schjønning, P. 1993: A laboratory calibration of time domain reflectometry for soil water measurements including effects of bulk density and texture. *J. Hydrol.* 151:147–157. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(93\)90233-Y](https://doi.org/10.1016/0022-1694(93)90233-Y)
- [31]: Malicki, M.A., Plagge, R. & Roth, C.H. 1996: Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into account the solid soil. *Eur. J. Soil Sci.* 47:357–366. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01409.x>.
- [32]: Curtis, J.O. 2001: Moisture effects on the dielectric properties of soils. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 39:125–128.
- [33]: Birchak, J.R., Gardner, C.G., Hipp, J.E., & Victor, J.M. 1974: High dielectric constant microwave probes for sensing soil moisture. *Proc. IEEE* 62, 93–98.
- [34]: Wharton, R.P., Rau, R.N. & Best, D.L. 1980: Electromagnetic propagation logging: Advances in technique and interpretation. Pap. 9267. In *SPE Annu. Tech. Conf.*, Dallas, TX. 21–24 Sept. 1980. Soc. Pet. Eng., Richardson, TX. <https://doi.org/10.2118/9267-MS>
- [35]: Dobson, M.C., Ulaby, F.T., Hallikainen, M.T. & El-Rayes, M.A. 1985: Microwave dielectric behaviour of wet soil. Part II. Dielectric mixing models. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 23:35–46.
- [36]: Roth, K., R. Schulin, Flußler, H. & Attinger, W. 1990: Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Resour. Res.* 26:2267–2273.
- [37]: Heimovaara, T.J., Bouten, W. & Verstraten, J.M. 1994: Frequency domain analysis of time-domain reflectometry waveforms: 2. A four component complex dielectric mixing model for soils. *Water Resour. Res.* 30, 201–209, <https://doi.org/10.1029/93WR02949>.
- [38]: Sen, P.N., Scala, C. & Cohen, M.H. 1981: A self-similar model for sedimentary rocks with application to the dielectric constant of fused glass beads. *Geophysics* 46:781–795. <https://doi.org/10.1190/1.1441215>
- [39]: Sen, P.N. 1984: Grain shape effects on dielectric and electrical properties of rocks. *Geophysics* 49, 586–587. <https://doi.org/10.1190/1.1441695>
- [40]: Kenyon, W.E. 1984: Texture effects on megahertz dielectric properties of calcite rock samples. *J. Appl. Phys.* 55:3153–3159. <https://doi.org/10.1063/1.333315>
- [41]: Tyč, S., Schwartz, L.M., Sen, P.N. & Wong, P. 1988: Geometrical models for the high-frequency dielectric properties of brine saturated sandstones. *J. Appl. Phys.* 64:2575–2582. <https://doi.org/10.1063/1.341645>
- [42]: Endres, A.L. & Redman, J.D. 1996: Modelling the electrical properties of porous rocks and soil containing immiscible contaminants. *J. Environ. Eng. Geophys.* 1, 105–112. <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.209.1993.004>
- [43]: Friedman, S.P. 1998: A saturation degree-dependent composite spheres model for describing the effective dielectric constant of unsaturated porous media”. *Wat. Resour. Res.* 34:2949–2961. <https://doi.org/10.1029/98WR01923>
- [44]: Jones, S.B., & Friedman, S.P. 2000: Particle shape effect on the effective permittivity of anisotropic or isotropic media consisting of aligned or randomly oriented ellipsoidal particles. *WaterResour.* 36:2821–2833 Munich, Germany. <https://doi.org/10.1029/2000WR900198>.
- [45]: Cosenza, P., Camerlynck, C. & Tabbagh, A. 2003: Differential effective medium schemes for investigating the relationship between high-frequency relative dielectric permittivity and water content of soil. *Water Resour. Res.* 39(9):1230. <https://doi.org/10.1029/2002WR001774>.
- [46]: Endres, A.L., & Bertrand, E.A. 2006: A pore-size scale model for the dielectric properties of water-saturated clean rocks and soils. *Geophysics* 71: F185–F193. <https://doi.org/10.1190/1.2360192>
- [47]: Chen, Y., Or, D. 2006: Geometrical factors and interfacial processes affecting complex dielectric permittivity of partially saturated porous media. *Water Resour. Res.* 42, W06423.

- [48]: Topp, G.C., Yanuka, M., Zebchuk, W.D. & Zegelin, S.J. 1988: Determination of electrical conductivity using time domain reflectometry: Soil and water experiments in coaxial lines. *Water Resour. Res.* 24:945–952.
- [49]: Chan, C. Y. & Knight, R. J. 1999: Determining water content and saturation from dielectric measurements in layered materials, *Water resources research*, Volume35, Issue1, Pages 85-93, <https://doi.org/10.1029/1998WR900039>
- [50]: Jacobsen, O.H. & Schjønning, P. 1994: Comparison of TDR calibration functions for soil water determination. p. 9–23. In *Proc. Time Domain Reflectometry, Applications in Soil Science*, Research Centre Foulum, Denmark. 16 Sept. 1994. SP-Report 25-33. Danish Inst. of Plant and Soil Sci., Tjele, Denmark.
- [51]: Stoffregen, H., Zenker, T. & Wessolek, G. 2002: Accuracy of Soil Water Content Measurements Using Ground Penetrating Radar: Comparison of Ground Penetrating Radar and Lysimeter Data. *Journal of Hydrology* 267: 201–206. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.02.041>.
- [52]: Gorriti, A.G., Slob, E.C. 2005: Comparison of the different reconstruction techniques of permittivity from S-parameters. *IEEE Trans. Geosci. Remote* 43, 2051–2057. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.854312>.
- [53]: Herkelrath, W.N., Hamburg, S.P. & Murphy, F. 1991: Automatic, real-time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry. *Water Resour. Res.* 27:857–864. <https://doi.org/10.1029/91WR00311>
- [54]: Patriarca, C., Tosti, F., Velds, C., Benedetto, A., Lambot, S. & Slob, E.C. 2013: Frequency dependent electric properties of homogeneous multi-phase lossy media in the ground-penetrating radar frequency range. *J. Appl. Geophys.* 1(97), 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.05.003>
- [55]: Fiori, A., Benedetto, A. & Romanelli, M. 2005: Application of the effective medium approximation for determining water contents through GPR in coarse-grained soil materials. *Geophys. Res. Lett.* 32, L09404
- [56]: van Overmeeren, R. A., Sariowan, S. V. & Gehrels, J. C. 1997: Ground Penetrating Radar for Determining Volumetric Soil Water Content; Results of Comparative Measurements at Two Test Sites. *Journal of Hydrology* 197 (1997): 316–338. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03244-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03244-1).
- [57]: Klenk, P., Jaumann S. & K. Roth. 2015: Quantitative High-resolution Observations of Soil Water Dynamics in A Complicated Architecture Using Time-lapse Ground-penetrating Radar. *Hydrology and Earth System Sciences* 19 (3): 1125–1139. <https://doi.org/10.5194/hess-19-1125-2015>, 2015.
- [58]: Loeffler, O. & Bano, M. 2004: Ground Penetrating Radar Measurements in a Controlled Vadose Zone. *Vadose Zone Journal* 3 (4): 1082–1092. <https://doi.org/10.2136/vzj2004.1082>.
- [59]: Garambois, S., Senechal, P. & Perroud, H. 2002: On the Use of Combined Geophysical Methods to Assess Water Content and Water Conductivity of Near-Surface Formations. *Journal of Hydrology* 259 (2002): 32–48. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00588-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00588-1).
- [60]: Du, S. 1996: Determination of Water Content in the Subsurface with the Ground Wave of Ground Penetrating Radar. PhD diss., Ludwig-Maximilians-Universität.
- [61]: Sperl, C. 1999: Determination of Spatial and Temporal Variation of the Soil Water Content in an Agro-ecosystem with Ground Penetrating Radar. PhD diss., Technische University München.
- [62]: Grote, K., Hubbard, S. S. & Rubin, Y. 2003: Field-scale estimation of volumetric water content using GPR ground wave techniques. *Wat Resour. Res.* 39(11). <https://doi.org/10.1029/2003WR002045>.
- [63]: Huisman, J. A., Snepvangers, J. J. C. Bouten, W. & Heuvelink, G. B. M. 2002: Mapping Spatial Variation in Surface Soil Water Content: Comparison of Ground-penetrating Radar and Time Domain Reflectometry. *Journal of Hydrology* 269 (3): 194–207, [https://10.1016/S0022-1694\(02\)00239-1](https://10.1016/S0022-1694(02)00239-1)
- [64]: Huisman, J. A., Snepvangers, J. J. C, Bouten, W. & Heuvelink, G. B. M. 2003: Monitoring Temporal Development of Spatial Soil Water Content Variation. *Vadose Zone Journal* 2 (4): 519–529. <https://doi:10.2136/vzj2003.5190>
- [65]: Galagedara, L. W., Redman, J. D. & Endres, A. L. 2002: Temporal and Spatial Variation of Soil Water Content Measured by Borehole GPR Under Irrigation and Drainage. Paper presented at the 9th international conference on ground penetrating radar, Santa Barbara, April 29–May 2. <https://doi.org/10.1117/12.462253>.

- [66]: Laurens, S., Balayssac, J.-P., Rhazi, J., Klysz, G., & Arliguie, G. 2005: Non-destructive evaluation of concrete moisture by GPR: experimental study and direct modeling. *Mater. Struct.* 38(283), 827–832. <https://doi.org/10.1007/BF02481655>.
- [67]: Binley, A., Winship, P., Middleton, R., Pokar, M. & West, J. 2001: High-resolution Characterization of Vadose Zone Dynamics Using Cross-borehole Radar. *Water Resources Research* 37 (11): 2639–2652. <https://doi.org/10.1029/2000WR000089>.
- [68]: Alumbaugh, D., Chang, P. Y., Paprocki, L., Brainard, J. R., Glass, R. J. & Rautman, C. A. 2002: Estimating Moisture Contents in the Vadose Zone Using Cross-borehole Ground Penetrating Radar: A Study of Accuracy and Repeatability. *Water Resources Research* 38 (130912): 45-1–45-12, <https://doi.org/10.1029/2001wr000754>.
- [69]: Galagedara, L. W., Parkin, G. W., Redman, J. D. & Endres, A. L. 2003: Assessment of Soil Moisture Content Measured by Borehole GPR and TDR Under Transient Irrigation and Drainage. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics* 8 (2): 77–86. <https://doi.org/10.4133/JEEG8.2.77>.
- [70]: Redman, J.D., Davis, J.L. Galagedara, L.W. & Parkin, G.W. 2002: Field studies of GPR air launched surface reflectivity measurements of soil water content. *Proc. of the Ninth Conf. on Ground Penetrating Radar. Proc. SPIE* 4758:156–161. <https://doi.org/10.1117/12.462256>.
- [71]: Maser, K. R., & Scullion, T. 1992: Automated Pavement Subsurface Profiling Using Radar: Case Studies of Four Experimental Field Sites. *Transportation Research Record* 1344: 148–54.
- [72]: Serbin, G., & Or, D. 2004: Ground-penetrating Radar Measurement of Soil Water Content Dynamics Using a Suspended Horn Antenna. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing* 42 (9): 1695–1705, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.835790>
- [73]: Ardekani, M. R. M. 2013: Off- and On-ground GPR Techniques for Field-scale Soil Moisture Mapping. *Geoderma* 200–201 (2013): 55–66, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.02.010>.



# Új építésű aszfaltrétegek vastagságának és tömörségének meghatározása földradarral

**Primusz Péter<sup>1</sup>, Runa Boglárka<sup>2</sup>, Balogh Olivér<sup>2</sup>,  
Tóth Csaba<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>: Soproni Egyetem, Erdőmérnöki Kar, Geomatikai és Kultúrmérnöki Intézet

<sup>2</sup>: RODEN Mérnöki Iroda Kft.

<sup>3</sup>: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Út és Vasútépítési Tanszék

E-mail: [primusz.peter@uni-sopron.hu](mailto:primusz.peter@uni-sopron.hu); [runa.boglarka@roden.hu](mailto:runa.boglarka@roden.hu);  
[balogh.oliver@roden.hu](mailto:balogh.oliver@roden.hu); [toth.csaba@emk.bme.hu](mailto:toth.csaba@emk.bme.hu)

DOI: [10.36246/UL.2022.1.04](https://doi.org/10.36246/UL.2022.1.04)

## KIVONAT

A földradarok (Ground Penetrating Radar, GPR) alkalmazhatósága az útpályaszerkezet diagnosztikában közismert és elismert, a segítségükkel roncsolásmentesen nyerhető információk ma már számos PMS rendszer fontos input adatát képezik.

Az eszköz a hazai szakmai közvélemény előtt sem ismeretlen, azonban alkalmazhatóságával kapcsolatban alapvetően a pályaszerkezeti rétegek vastagságának - többé-kevésbé pontos - meghatározhatósága él a köztudatban. Jelen cikkben ezen ismeretek bővítésére törekedve, egy olyan mérésorozatot eredményeiket ismertetjük, amelyek a rétegvastagság meghatározása mellett, a burkolati rétegek tömörségi viszonyainak vizsgálatára is kiterjednek.

A kapott eredmények nemcsak a tekintetben biztatóak, hogy a fűrt mintavételre alapuló rétegvastagság kiváltására is alkalmas eszközről beszélhetünk, hanem az épített rétegek tömörségének térbeli alakulása is – megnyugtató pontossággal - elemezhető.

*Kulcsszavak:* GPR, aszfaltréteg vastagság, aszfaltréteg tömörség, felületi visszaverődésen (reflexión) alapuló módszer

## ABSTRACT

The applicability of ground penetrating radars (GPR) in pavement diagnostics is well known and recognized, and the non-destructive information obtained with their help is now a vital input data of many PMS systems.

The tool is not unknown to the Hungarian professional public either, however, in relation to its applicability, the ability to determine the thickness of the pavement structure layers - more or less accurately - in common knowledge. In this article, in an effort to expand this knowledge, we present the results of a series of measurements which, in addition to determining the layer thickness, also cover the examination of the compactness conditions of the pavement layers. The obtained results are not only encouraging since it is a tool that suitable for determining the layer thickness based on drilled sampling, but also the spatial development of the compactness of the built layers can be analyzed - with reassuring accuracy.

*Keywords:* GPR, asphalt layer thickness, asphalt layer compactness, surface reflection method

### **Dr. Primusz Péter**

*A Soproni Egyetem (SOE) Erdőmérnöki Karán a Geomatikai, Erdőfeltárási és Vizgazdálkodási Intézet munkatársa. Fő kutatási területe az útfenntartás és az útpályaszerkezetek méretezése, megerősítése.*

**Runa Boglárka**

*A RODEN Mérnöki Iroda Kft. okleveles geológus munkatársa. Fő kutatási területe a Georadar technológia roncsolásmentes útpályadiagnosztikai alkalmazásának vizsgálata.*

**Balogh Olivér**

*A RODEN Mérnöki Iroda Kft. okleveles geológus munkatársa. Fő kutatási területe a Georadar technológia roncsolásmentes útpályadiagnosztikai alkalmazásának vizsgálata.*

**Dr. Tóth Csaba**

*A Magyar Mérnöki Kamara, a Közlekedéstudományi Egyesület, a Magyar Útügyi Társaság Útpályaszerkezetek Szakbizottság tagja, jelenleg az BME Út és Vasútéptérségi Tanszék docense. Korábban a Csongrád Megyei Állami Közútképző Kht., illetve az Állami Közúti Műszaki és Információs Kht. osztályvezetőjeként a magyar útügyi adminisztrációban dolgozott. Később a Strabag Konzern mérnökeként részt vett az épülő hazai országos közúthálózat minőségellenőrzésében, valamint a Konzern nemzetközi és hazai kutatásaiban. Közlekedési építőmérnöki szakértőként, tervezőként, illetve műszaki ellenőrként közreműködött számos hazai burkolat-megerősítési projektben. Kutatási területe: hajlékony útpályaszerkezetek igénybevétele, méretezése, teherbíró-képessége, megerősítése.*

---

## 1. BEVEZETÉS

A roncsolásmentes vizsgálatok fő előnye abban rejlik, hogy gyorsan és zavarásmentesen lehet nagymennyiségű mérést úgy végrehajtani, hogy közben nem okozunk kárt a vizsgált szerkezetben. Ez utóbbi tulajdonság főleg új építésű útpályaszerkezeteknél különösen fontos, ahol nem lehet „szétfúrni” a beépített rétegeket az építési minőség ellenőrzése érdekében sem. Az útpályaszerkezet diagnosztikában alkalmazható roncsolásmentes vizsgálatok részletes áttekintése megtalálható [1] munkájában, valamint magyar nyelven [2] összefoglalóját javasoljuk átolvasásra. A cikkben felsorolt eszközök és eljárások közül mi most csak a földradar (Ground Penetrating Radar, GPR) mérés technológiával foglalkozunk. Az eljárás nem csak leromlott állapotú útszakaszok kiértékeléséhez, hanem újépítésű szakaszok minőségellenőrzéséhez is kiválóan felhasználható (sőt, inkább erre használják leginkább), mivel képes a forgalom zavarása nélkül nagymennyiségű folytonos térbeli adathalmazt összegyűjteni. A folytonos mérés azért különösen fontos és hasznos, mivel a lokális pontokban (a 25–50 vagy akár 500–1000 m-es szelvénytávolságokban) meghatározott szerkezeti adatok térbeli kiterjesztése egyáltalán nem egyértelmű és könnyű feladat, nem is beszélve azok „valós” átlagos értékének meghatározásáról. A hagyományos mintavételezési eljárásokkal a lokális hibák kimutathatatlanok, pedig azok nagyrésze még az építés közben kijavítható lenne, ha elég gyorsan kap visszajelzést a kivitelező. Cikkünkben ezért a földradar alkalmazhatóságát vizsgáljuk a minőségellenőrzés területén.

## 2. ELMÉLETI HÁTTÉR

A földradar műszer jellemzően egy adó és egy vevő antennából, egy adatgyűjtő és vezérlő egységből, egy mérőkerékből és opcionálisan egy GPS-ből áll. A földradar adó része nagyfrekvenciás elektromágneses impulzusok sorozatát bocsátja ki. A hullámok a vizsgált közegben részben elnyelődnek, részben visszaverődnek [3]. A visszaérkező jelet (feszültséget) a vevő egység veszi az idő függvényében, digitalizálja és az adatrögzítő egység tárolja [4]. A radarjel terjedése a vizsgált közeg elektromos és mágneses tulajdonságaitól függ. Ezek közül a két legjellemzőbb, a dielektromos állandó (permittivitás) és a vezetőképesség (konduktancia). Az aszfaltrétegek in-situ  $\epsilon_r$  relatív dielektromos állandóját megkapjuk a felületi visszaverődés (Surface Reflection, SR) módszerét alkalmazva [5]. A felületi visszaverődésen (reflexión) alapuló módszer azt használja ki, hogy a visszavert jel amplitúdója annál nagyobb, minél nagyobb a kontraszt a réteghatár két oldalán található anyag fizikai,

elektromágneses tulajdonságaiban. A reflexiók együttható ( $R$ ) – elhanyagolva a vezetőképességet – az alábbi képlettel számítható [6]:

$$R = \frac{\text{Visszaverődő hullám amplitúdója}}{\text{Beeső hullám amplitúdója}} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} \quad (1)$$

ahol  $\varepsilon_1$  és  $\varepsilon_2$  az egymást követő rétegek dielektromos állandói. Az útpályaszerkezetre beeső hullám amplitúdóját ( $A_p$ ) megkapjuk, ha egy rendkívül reflektív rézlemezt helyezünk a GPR antenna alá, ami tökéletesen visszasugározza a vevő felé a kibocsájtott jelet. A rézlemezt eltávolítva az antenna alól, és egy újabb mérést végrehajtva megkapjuk a kopórétegről visszaverődő hullám ( $A_0$ ) amplitúdóját. Felhasználva ezeket az adatokat és figyelembevéve, hogy a levegő dielektromos állandója 1, az (1) egyenlet átrendezésével megkapjuk a keresett  $\varepsilon_r$  összefüggését:

$$\varepsilon_r = \left[ \frac{1 + (A_0/A_p)}{1 - (A_0/A_p)} \right]^2 \quad (2)$$

ahol  $\varepsilon_r$  a felső aszfaltréteg dielektromos állandója,  $A_0$  az aszfaltréteg felületéről visszaverődő hullám amplitúdója,  $A_p$  pedig a rézlemezről visszaverődő hullám amplitúdója. A relatív  $\varepsilon_r$  dielektromos állandó ismeretében pedig már lehetőség nyílik egy adott réteg vastagságának kiszámítására:

$$h_i = \frac{c\Delta t}{2\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (3)$$

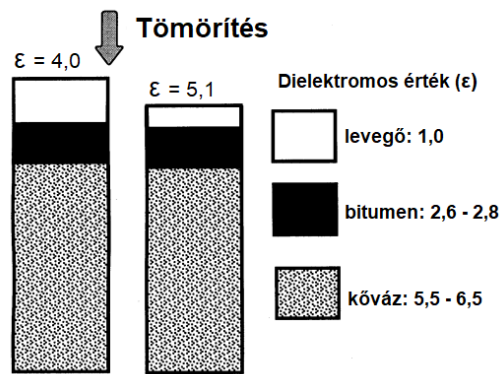
ahol  $c$  a fénysebesség (0,30 m/ns),  $\Delta t$  az  $A_0$  és  $A_p$  amplitúdók közötti kétirányú futási idő, és  $\varepsilon_r$  az anyag relatív dielektromos állandója. Így a radarmérés időtengelye mélységmetszette alakítható. Amennyiben viszont ismert a  $h_i$  rétegvastagság (pl. fúrás által) akkor az  $\varepsilon_r$  dielektromos állandó határozható meg igen pontosan a (3) egyenletből.

Az útpályaszerkezetet felépítő rétegek dielektromos állandójára vonatkozóan vannak irodalmi adatok (aszfalt: 4–8; beton: 9–11), amelyek alkalmazásával könnyen, fűrómagminta nélkül kiszámíthatjuk a rétegvastagságokat. A módszer nehézsége, hogy a dielektromos állandó az utépítési anyagoknál változó lehet, amire a nedvességtartalom, az ásványi összetétel, a hőmérséklet, a tömörség és a mérőfrekvencia egyaránt hatást gyakorol. Ez azzal magyarázható, hogy az utépítésben használt anyagok (talaj, zúzottkő, aszfalt, beton stb.) kémiai szempontból háromfázisú diszperz rendszerek, amikben a folyadék- és gázfázis aránya az időjárási tényezőktől nagymértékben függ. Ennek köszönhetően viszont a földradar mérések nem csak a rétegvastagságok meghatározására alkalmasak, hanem az aszfaltkeverékek testsűrűségének és szabadhézag-tartalmának megbecslésére, a földműanyagok tömörségének és nedvességtartalmának monitorozására, valamint az úthibák pl. repedések detektálására is [7] [8] [9] [10]. További hasznos részletek olvashatóak az útpályaszerkezetek földradarral történő roncsolásmentes vizsgálati lehetőségeiről [11], valamint [12] magyar nyelvű cikkében.

Saarenketo (1997) [13] volt az egyik első kutató Európában, aki földradart használt az aszfalt-pályaszerkezetek sűrűségének mérésére. Kutatásai szintén azon az elven alapultak, hogy a pályaszerkezet dielektromos állandója feltételezhetően, az összetevőinek dielektromos állandóinak a függvénye. Ezért az összetevők (fázisalkotók) térfogatarányaiban bekövetkező változások kimutathatóak a teljes pályaszerkezet dielektromos állandójának mérésével.

Az aszfaltkeverék összetevői közé tartozik a bitumen, az ásványi adalékanyag, a levegő és esetlegesen a víz (lásd 1. ábra). A bitumen dielektromos állandója általában 2,6 és 2,8 közötti tartományba esik, a zúzott száraz aggregátumok állandói 5,5 és 6,5 között változnak, a levegőé pedig 1. Bár a víz dielektromos állandója függ annak kémiai értelemben vett kötöttségi fokától, kijelenthető, hogy a víznek az új pályaszerkezet dielektromos állandójának mérésére nincs érzékelhető hatása.





1. ábra. A tömörítés hatását a dielektromos állandóra [13].

Laboratóriumi vizsgálatokkal korrelációs kapcsolatot kerestek a finn útügyi kutatók a száraz aszfaltkeverék dielektromos állandója és annak testsűrűsége között. A finn kutatások arra a következtetésre mutattak, hogy az útburkolat dielektromos állandója és annak szabadhézag-tartalma ( $V_A$ ) között exponenciális kapcsolat van:

$$V_A(\%) = a \cdot e^{-b \cdot \epsilon_{AC}} \quad (4)$$

ahol  $\epsilon_{AC}$  az aszfaltburkolat dielektromos állandója (GPR antennarendszerrel meghatározható),  $a$  és  $b$  kalibrációs együtthatók, amelyek a keverék típusától függenek, és a helyszíni mérés közben vett magmintából meghatározhatóak. Különböző utakról gyűjtött GPR adatok bizonyították, hogy a dielektromos állandó értékének csökkenése sűrűségproblémákat jelez (lásd 1. ábra). A tanulmány által kimutatott legjelentősebb tény, hogy a GPR óriási lehetőségeket kínál a helyi problémák monitorozásában [14].

### 3. ANYAG ÉS MÓDSZER

A földradar méréstechnika lehetőségeit a minőségellenőrzés területen egy délföldi lakóútca 220–240 m hosszú kísérleti útszakaszán vizsgáltuk meg. Méréseinket elsősorban a beépített aszfaltrétegek előírt vastagságának és azok szabadhézag-tartalmának ellenőrzésére kívántuk felhasználni.

A kutatáshoz a földradar mérőrendszert a RODEN Mérnöki Iroda biztosította. A GSSI gyártmányú 1 GHz és 2 GHz frekvenciájú levegőcsatolt antennák a hordozó gépkocsi mögött 1,5 méterre, a burkolat felszíne felett pedig kb. 450 mm-re helyezkedtek el. Az antennák pontos elrendezését a 2. ábra mutatja be. A terepi mérés 16 km/h sebességgel, és méterenként 50 db letapogatással történt. A nyers adatokat a nagysebességű SIR-30 többcsatornás adatgyűjtő és vezérlőrendszer rögzítette. A begyűjtött adatok közül tanulmányunkban most csak a jobb felbontású 2 GHz-es antennák RADAN szoftverrel feldolgozott eredményeit értékeljük. Ennek háttérben az áll, hogy az FZKA rétegre került 3–4 cm vastagságú kiékelő/kiegyenlítő szemcsés réteget folytonosan csak a 2 GHz-es antennák által észlelt szelvényeken tudtuk azonosítani. A RADAN7 szoftverből kiexportált rétegvastagságokat végül Microsoft Excel programmal halmozott terület diagramokon ábráztuk.

A beépített aszfaltrétegeket nem csak a levegőcsatolt antennákkal, hanem a PaveScan RDM 2.0 (második generációs) roncsolásmentes aszfaltsűrűség-értékelő mérőberendezéssel is megvizsgáltuk (3. ábra). A PaveScan berendezés alapvetően a vizsgált aszfaltkeverék dielektromos tulajdonságait méri és abból következtet a testsűrűsége. A készülék 3 darab egymástól tetszőleges (de maximum 1,1 m) távolságra elhelyezhető 2 GHz középfrekvenciájú levegőkapcsolt antennával (érzékelővel) van felszerelve az útpálya felületének minél teljesebb lefedése érdekében.



2. ábra. A RODEN Mérnök Iroda „RoadScan” rendszere.



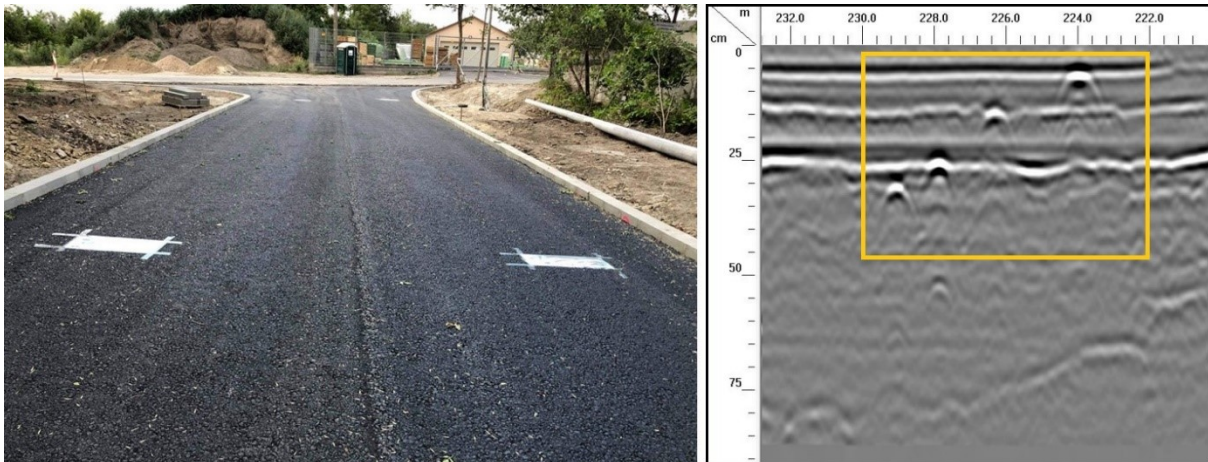
3. ábra. A RODEN Mérnök Iroda PaveScan RDM 2.0 (második generációs) roncsolásmentes aszfaltsűrűség-értékelő mérőberendezése a levegő (bal) és a fémlemez kalibráció (jobb) közben.

A szenzorok 30 cm magasságban vannak rögzítve a felszín felett. A szenzorok a felületi visszaverődés (SR) módszer alapján, automatikusan kiszámítják az aszfalt adott pontjára vonatkozó dielektromos állandót. A mérőműszer méterenként 40 letapogatást végez, amelynek köszönhetően nagy felbontású dielektromos állandó meghatározást tesz lehetővé. A mérést megelőzi az úgynevezett levegő kalibráció, melynek célja a háttérzajok eltávolítása, valamint a fémlemez kalibráció, melynek célja az aszfalt felszínének, valamint a fémlemezről visszavert hullám amplitúdójának detektálása.

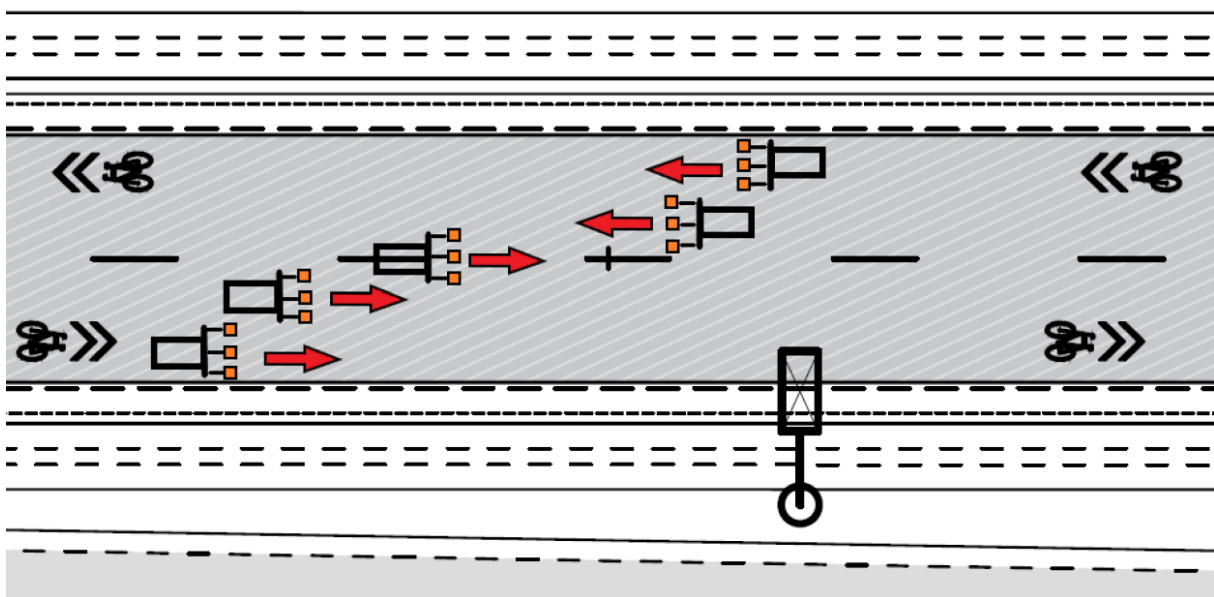
A mérőműszerek rövid bemutatásából kiemeljük, hogy mind a két földradar 2 GHz középfrekvenciájú levegőkapcsolt antennákkal dolgozik, amik a felszín felett közel azonos 30–45 cm magasságban helyezkednek el. Ezért a két mérőberendezés által meghatározott dielektromos állandókat jelentősen sem a mérési magasság, sem a mérési frekvenciákból származó különbségek nem terhelhetik.

A kutatásban vizsgált két forgalmi sávú lakóútca tervezett útpályaszerkezetének felépítése az alábbi volt:

1. 4,0 cm AC 11 kopó (F) réteg
2. 7,0 cm AC 22 kötő (F) réteg
3. 8,0 cm AC 22 alap (F) réteg
4. 20,0 cm FZKA 0/63 szórt alap (3-4 cm vastag 0/22 szemcsés réteggel eltakarva)
5. 20,0 cm homokos kavics védőréteg



4. ábra. Az aszfalt kötő- és alaprétegen elhelyezett antipólusok (bal) és az egyes rétegek közé egymástól 1 méterrel elcsúsztatva lehelyezett antipólusok megjelenése a radarszelvényen (jobb).



5. ábra. A lakóútcán történt felmérések vázlatrajza.

A kísérleti útszakasz pályaszerkezetének építése közben lehetőség nyílt 20 méterenként az aszfaltrétegek alá egymástól 1 méterrel eltolva antipólusokat elhelyezni (4. ábra). Erre a célra a könnyen beszerezhető háztartási alumínium fóliát választottuk, de a 2-3 mm vastag fémlemez is megfelelő eredményt ad. Az antipólusok a GPR által kibocsájtott hullámenergiát teljesen visszaverik, ezért az aszfaltréteg aljának pontos helye parabola alakú visszaverődés képében azonosítható a radarszelvényen. Megjegyzendő, hogy ezek az alumínium fóliák a gyakorlatban nem szükségesek a GPR mérésekhez, csak a kutatási eredmények validálására szokás használni.

Mind a két földradar berendezéssel három mérést hajtottunk végre a teljes kísérleti útszakaszon. Az első (1) mérés az AC 22 aszfalt alapréteg beépítése után, a második (2) mérés az AC 22 aszfalt kötőréteg beépítése után, végül a harmadik (3) mérés az AC 11 aszfalt kopóréteg beépítés után történt meg. A rétegenkénti méréseknek köszönhetően valamennyi aszfaltréteg dielektromos állandójáról információt kaptunk. A teljes útpálya lefedése érdekében sávonként két mérés történt, egy a sávszélen (a szélső szenzor padka mellett), egy pedig a sávközépen (a szélső szenzor az úttengely mellett). A részletesebb adatgyűjtés érdekében a mérések kiegészültek egy úttengely menti felméréssel is (5. ábra).



6. ábra. A fúrt magminták elhelyezkedése az alaprétegen.

A vizsgált útpályaszerkezet rétegeinek vastagságát meghatároztuk a GSSI gyártmányú 2 GHz frekvenciájú levegőcsatolt antennák által gyűjtött adatokból, mivel itt elsősorban a beépített antipólusokra támaszkodtunk (4. ábra). A beépített aszfaltrétegek testsűrűségének megbecsléséhez viszont már az erre a célra kifejlesztett PaveScan RDM 2.0 eredményekből indultunk ki. A földradar mérések validálásához fúrt magmintákat használtunk. Az aszfalt alapréteg beépítését követően 3–3, az aszfalt kötőréteg beépítését követően pedig újabb 3–3 fúrómag került kivételre a jobb és bal sávban egymástól kb. ~70 méterenként (6. ábra). A fúrt magminták rétegvastagságát az MSZ EN 12697-36:2003 szabvány szerint, míg a testsűrűségeket az MSZ EN 12697-6:2012 szabvány szerint megállapítottuk. A térfogati jellemzők keveréktervezési kritériumként, vagy a keveréknek az útpályaszerkezetbe való terítése és tömörítése utáni kiértékelési paramétereként használatos. A beépített aszfaltkeverékek legfontosabb jellemzői az alábbiak voltak: AC 11 kopóréteg hézagmentes  $G_{mm}$  testsűrűsége  $2436 \text{ kg/m}^3$ . AC 22 alap- és kötőréteg hézagmentes  $G_{mm}$  testsűrűsége  $2572 \text{ kg/m}^3$  és  $2580 \text{ kg/m}^3$ . A kötőanyag súly szerinti aránya 4,1%, relatív sűrűsége  $1050 \text{ kg/m}^3$ , a felhasznált köváz hézagmentes testsűrűsége pedig  $2759 \text{ kg/m}^3$ .

A kutatás további részében korrelációt kerestünk a mért  $\epsilon_{AC}$  dielektromos állandó és az aszfaltréteg  $G_{mb}$  testsűrűsége között. Mivel a szabadhézag-tartalom a következő összefüggés szerint számítandó:

$$V_A(\%) = 100 \cdot \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \quad (5)$$

a (4)-es számú képlet exponenciális függvénye jó választásnak tűnt erre a célra, mivel ha ismerjük  $V_A$ -t, akkor a fenti képletből  $G_{mb}$  értéke könnyen kifejezhető:

$$G_{mb} = (1 - V_A) \cdot G_{mm} \quad (6)$$

A modell paramétereinek meghatározásához az eredeti (4) exponenciális függvényt a következő formában alkalmaztuk:

$$V_A(\%) = \alpha \cdot e^{-\beta \cdot \epsilon_{AC}} + \epsilon \quad (7)$$

ahol  $V_A$  a szabadhézag,  $\epsilon_{AC}$  az aszfalt dielektromos állandója,  $\alpha$  és  $\beta$  a keresett modellparaméterek,  $\epsilon$  pedig a hibtag. A hibtag megjelenése a modellben azt jelenti, hogy a dielektrikumon kívül más tényezők is befolyásolhatják a szabadhézag-tartalom előrejelzésének pontosságát, amelyek közé tartozhat a modell hibája, az anyagok és a környezet, például a hőmérséklet vagy a nedvességtartalom változékonysága.



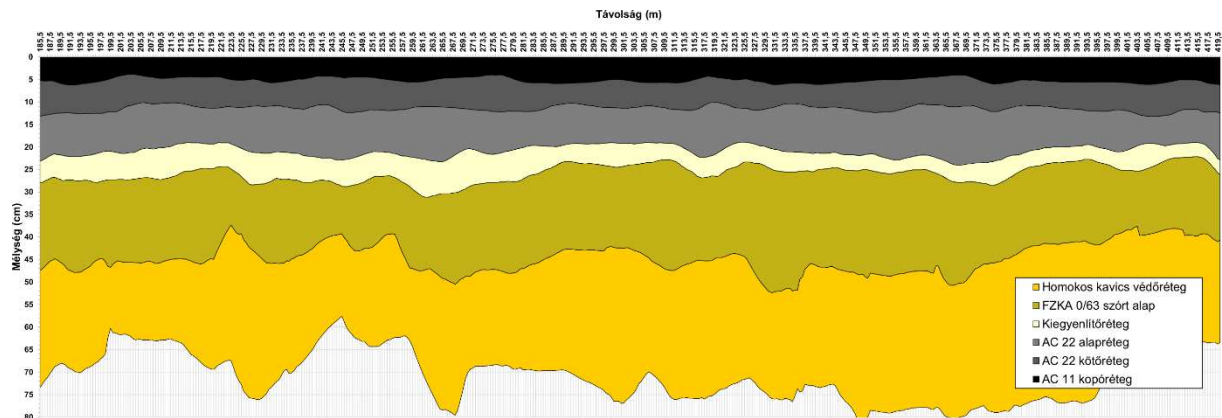
7. ábra. A magminták laboratóriumi dielektromos állandó mérése a PaveScan RDM 2.0 mérőműszerrel.

A modell kalibrálásához fúrómag mintavételre, vagy az adott aszfaltkeverékből előállított gyrtoros próbatestekre van szükség [15]. A vizsgált lakóutca AC 22 alap- és kötőrétegéből sikerült fűrt mintákat venni, viszont ezek az AC 11 kopóréteg esetében nem álltak rendelkezésünkre. Ezért a kalibrációhoz a BME laboratóriumában gyrtoros próbatesteket készítettünk, majd meghatároztuk ezek testsűrűségét és dielektromos állandóját a PaveScan RDM 2.0 készülékkel (7. ábra). A helyszíni és laboratóriumi adatok már lehetővé tették, hogy a (7)-es képlet modellparamétereit az átlagos négyzethiba gyökének (Root Mean Square Error, RMSE) minimalizálásával meghatározzuk, majd a dielektromos állandókat átszámítsuk testsűrűsége vagy szabadhégzag-tartalomra. A terepi mérések után a PaveScan RDM 2.0 eszközből 0,5 méterenként kiexportáltuk a dielektromos állandó értékeket a sávszegélytől az úttengely felé haladva a következő szenzorpozíciókban: 2,9 m; 2,3 m; 1,7 m; 1,3 m; 0,7 m; 0,6 m; 0,1 m és 0 m. Az így előállított térbeli dielektromos állandókból végül a Surfer 14 szoftverrel készítettünk szintvonalas sűrűségterképeket.

#### 4. EREDMÉNYEK ÉS MEGVITATÁSUK

A következőkben bemutatjuk és megvitatjuk a vizsgált lakóutca aszfalt rétegein végrehajtott földradarméréseink eredményeit, tapasztalatait. Elemzésünket a vastagságméréssel kezdjük, mivel ez az egyik legkézzelfoghatóbb minőségi paraméter, aminek teljesülnie kell. Vastagság minősítési jellemzőnél az előírt érték a tervezett vastagság. Az aszfaltrétegek vastagságának előírt és megfeleléségi határai részben a mintaszámától függenek (e-ÚT 06.03.21/M1). Ha a mintaszám  $\geq 10$  db, akkor az átlagos rétegvastagság legalább érje el az Előírt érték–6%-ot. Az átlag vastagság megfeleléségi határértéke ekkor az Előírt érték–12% a hivatkozott szabályozás szövege szerint.

Az első (1) AC 22 aszfalt alaprétegen történt mérések eredményei azt mutatták, hogy a radarszelvényeken valamennyi beépített réteg egyértelműen elkülönült egymástól. A nagy pontosságú rétegazonosítást segítették a kiegyenlítő- és az aszfalt alapréteg alatt elhelyezett antipólusok, melyek egymástól 1 méterrel eltolt hiperbolák formájában megjelentek a radarképen (4. ábra jobb oldala). Az előzetes elvárásoknak megfelelően a szemcsés kiegyenlítő réteg és az AC 22 aszfalt alapréteg vastagsága a hossz-szelvények mentén nem változik jelentősen (a vastagságadatok szórása  $\pm 1$  cm), így ezen réteghatárok közel egyenes lefutásúak. Az AC22 aszfalt alapréteg előírt (8 cm) vastagságához képest a földradar +6,3%-os eltérést mutatott ki.



8. ábra. A vizsgált lakóútca jobb sávjában a kopórétegen történt 3. felmérés eredményei alapján szerkesztett vastagság hossz-szelvény (4. csatorna – útszegélyhez közelebb eső 2 GHz-es antenna).

1. táblázat. A három aszfaltréteg vastagságmérésének összefoglalása.

#	Rétegrend	Tervezett vastagság (cm)	CH2 (2GHz)				CH4 (2GHz)			
			Átlag (cm)	Szórás (cm)	N (db)	Eltérés (%)	Átlag (cm)	Szórás (cm)	N (db)	Eltérés (%)
1	AC 22 alap (F)	8	8,5	0,98	461	-6,3	8,5	1,08	464	6,2
	Kiegyenlítő réteg	4	3,9	0,98	409	+1,3	4,0	1,04	335	0,2
	FZKA 0/63 szórt alap	20	19,2	3,19	266	+4,1	20,0	2,92	140	0,1
	Homokos kavics vr.	20	23,4	5,58	281	-17,1	23,0	4,40	161	15,0
2	AC 22 kötő (F)	7	6,4	1,15	462	+8,1	6,5	0,98	470	7,3
	AC 22 alap (F)	8	9,1	1,09	446	-13,5	9,6	1,13	448	20,2
	Kiegyenlítő réteg	4	4,0	1,07	378	+0,3	4,4	1,41	418	10,1
	FZKA 0/63 szórt alap	20	19,1	3,45	315	+4,3	18,4	3,37	325	7,9
3	Homokos kavics vr.	20	21,6	6,22	368	-8,2	23,9	4,85	340	19,7
	AC 11 kopó (F)	4	4,8	0,70	479	-18,9	5,2	0,70	479	30,8
	AC 22 kötő (F)	7	6,5	0,84	479	+7,2	6,3	0,97	447	10,1
	AC 22 alap (F)	8	9,0	1,43	479	-13,1	9,6	1,67	447	19,5
	Kiegyenlítő réteg	4	4,6	1,27	439	-14,9	5,0	1,58	467	24,9
	FZKA 0/63 szórt alap	20	17,0	2,69	284	+15,0	19,0	3,36	292	4,8
Homokos kavics vr.	20	25,0	7,89	275	-25,1	26,4	5,83	301	31,9	

Az FZKA 0/63 szórt alap és a homokos kavics védőréteg esetén már jóval magasabb a vastagságadatok szórása ( $\pm 3-5$  cm), és így a rétegek lefutása is változatosabb.

A második (2) AC 22 aszfalt kötőrétegen történt mérések eredményei nagymértékben hasonlítottak az elsőhöz (1). Az AC 22 aszfalt alap- és kötőréteg vastagsága a hossz-szelvények mentén nem változik jelentősen (a vastagságadatok szórása  $\pm 1$  cm), így ezen réteghatárok közel egyenes lefutásúak voltak. Az AC 22 aszfalt kötőréteg vastagsága az előírt 7 cm-től  $-7,7\%$ -ban eltért. A földradar viszont az AC 22 aszfalt alapréteg vastagságára már  $+17\%$ -os eltérést mutatott ki a tervezett vastagsághoz képest, ami magasabb, mint az első (1) méréskor kimutatott  $+6,3\%$ -os érték.

A harmadik (3) utolsó mérés az AC 11 aszfalt kopórétegen történt, és az eddigiekhez hasonlóan a radarszelvényeken valamennyi beépített réteg egyértelműen elkülönült egymástól (8. ábra). Az AC 11 aszfalt kopó- és AC 22 kötőréteg vastagsága a hossz-szelvények mentén nem változik jelentősen (a vastagságadatok szórása  $\pm 0,8$  cm), így ezen réteghatárok közel egyenes lefutásúak. Az AC 22 aszfalt alapréteg lefutása is egyenletes, de már magasabb  $\pm 1,5$  cm-es szórás jellemzi az átlagos vastagságot. Az AC 11 aszfalt kopóréteg 4 cm-es előírt vastagságához képest a földradar átlagosan 5 cm-es vastagságot becsült, ami  $+25\%$ -os eltérést jelent. Az AC 22 aszfalt kötőréteg eltérés  $-8,6\%$  míg az AC 22 aszfalt alaprétegé  $+16,3\%$  volt ezen felmérés szerint.

Az 1. táblázat alapján jól látható, hogy a három eltérő időpontban végrehajtott földradar felmérések, minden rétegre háromféle átlagos rétegvastagságot határoztak meg. A földradar vastagságmérés eredményeinek validálásához ezért a jobb és a bal sávból 3-3 fűrómag mintavétel történt a kötőréteg

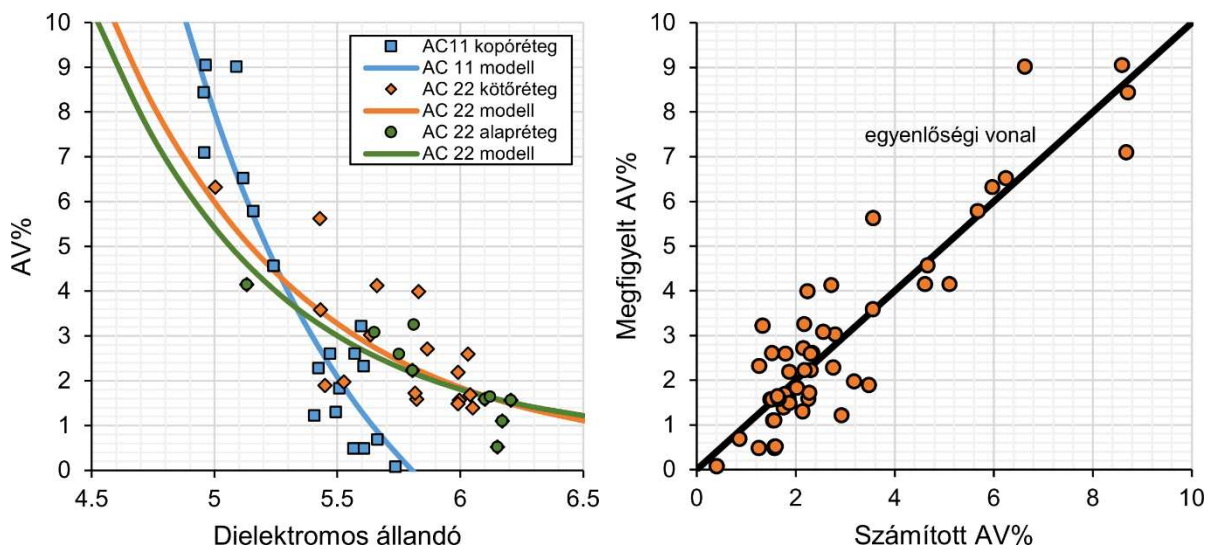
beépítését követően. A kopóréteg beépítése után nem történt már a teljes aszfaltvastagságot feltáró fúrómag mintavétel, csak 1 db magot fúrtak a bal sávból, amely kizárólag a kopóréteget tartalmazta. Ennek következtében a kopórétegen történt GPR mérések érvényesítéséhez a kötőrétegből vett 6 db fúrómag vastagsáadatait és a fent említett 1 db fúrómag mélységadatát tudtuk felhasználni. Ezek után a három aszfaltréteg georadar felmérések alapján meghatározott vastagságának a fúrómagokon azonosított rétegvastagságokkal történő összehasonlítását a 2. táblázat tartalmazza.

Az eredményeket elemezve megállapítható, hogy a georadarral becsült AC22 aszfalt alapréteg vastagságát a fúrómagokhoz viszonyítva az első (1) mérésből átlagosan 1,4%; a másodikból (2) mérésből 1,9%; a harmadik (3) mérésből számolva pedig 6,5% hiba terhelt. Az AC 22 kötőréteg vastagságát a második (2) mérésből átlagosan 3,2%-os; a harmadikból (3) pedig 8,1%-os hibával lehetett meghatározni. Az AC 11 kopóréteg vastagságmérésének átlaghibája az 1 db feltárás alapján 2–8,5% közé tehető. A harmadik (3) kopórétegen történt felmérés eredményeiből számított átlagos eltérések nagyobbak, mint a kötő és alaprétegen történt mérések esetében kapott eltérések. Ennek háttérben a nedvesebb mérési körülmények állhatnak, mivel a kivitelező a burkolat mielőbbi forgalomhelyezhetősége érdekében – a mérést közvetlenül megelőzően – locsolta a kopóréteget és a kopórétegre, illetve a felületre jutó víz befolyásolta a dielektromos állandó értékét.

Mindent figyelembe véve elmondható, hogy a tervezett vastagsági értékek kontroljaként a georadaros rétegvastagság meghatározás pontossága eléri a fúrásokkal történő ellenőrzés megbízhatóságát.

2. táblázat. A földradar vastagságmérések és a fúrt magminták adatainak összefoglalása.

#	Szelvény	Réteg	Sáv	CH2 (cm)	CH4 (cm)	Fúrás (cm)	CH2 Hiba (%)	CH4 Hiba (%)
1	260	AC 22 alap (F)	Jobb	8,89	8,97	8,85	0,5	1,4
	300	AC 22 alap (F)	Jobb	8,20	8,25	8,30	1,2	0,6
	370	AC 22 alap (F)	Jobb	8,78	8,84	8,95	1,9	1,2
	260	AC 22 alap (F)	Bal	7,98	8,04	8,10	1,5	0,7
	300	AC 22 alap (F)	Bal	7,64	7,87	7,70	0,8	2,2
	370	AC 22 alap (F)	Bal	7,31	7,66	7,50	2,5	2,1
2	260	AC 22 alap (F)	Jobb	8,90	8,75	8,85	0,6	1,1
	300	AC 22 alap (F)	Jobb	8,65	8,30	8,30	4,2	0,0
	370	AC 22 alap (F)	Jobb	8,90	8,92	8,95	0,6	0,3
	260	AC 22 alap (F)	Bal	8,34	8,34	8,10	3,0	3,0
	300	AC 22 alap (F)	Bal	7,58	7,19	7,70	1,6	6,6
	370	AC 22 alap (F)	Bal	7,55	7,55	7,50	0,7	0,7
	260	AC 22 kötő (F)	Jobb	5,94	6,69	6,40	7,3	4,5
	300	AC 22 kötő (F)	Jobb	6,06	5,73	6,10	0,7	6,1
	370	AC 22 kötő (F)	Jobb	5,82	5,42	5,60	3,9	3,2
	260	AC 22 kötő (F)	Bal	6,40	6,42	6,60	3,0	2,7
	300	AC 22 kötő (F)	Bal	6,76	6,68	6,80	0,6	1,8
	370	AC 22 kötő (F)	Bal	7,82	7,45	7,80	0,3	4,5
3	260	AC 22 alap (F)	Jobb	8,37	8,87	8,85	5,4	0,2
	300	AC 22 alap (F)	Jobb	8,83	7,75	8,30	6,4	6,6
	370	AC 22 alap (F)	Jobb	7,12	8,74	8,95	20,4	2,3
	260	AC 22 alap (F)	Bal	8,19	8,09	8,10	1,1	0,1
	300	AC 22 alap (F)	Bal	8,93	7,63	7,70	16,0	0,9
	370	AC 22 alap (F)	Bal	7,80	8,57	7,50	4,0	14,3
	260	AC 22 kötő (F)	Jobb	6,21	6,72	6,40	3,0	5,0
	300	AC 22 kötő (F)	Jobb	6,68	5,65	6,10	9,5	7,4
	370	AC 22 kötő (F)	Jobb	7,25	5,76	5,60	29,5	2,9
	260	AC 22 kötő (F)	Bal	6,48	7,97	6,60	1,8	20,8
	300	AC 22 kötő (F)	Bal	6,68	6,81	6,80	1,8	0,1
	370	AC 22 kötő (F)	Bal	8,39	7,17	7,80	7,6	8,1
	330	AC 11 kopó (F)	Bal	3,66	4,08	4,00	8,5	2,0



9. ábra. A vizsgálati helyszínen fúrt magminták alapján a dielektromos állandó és a szabadhézag-tartalom között aszfaltrétegenként felállított empirikus modellek (bal), és a számított és megfigyelt AV% értékek viszonya (jobb).

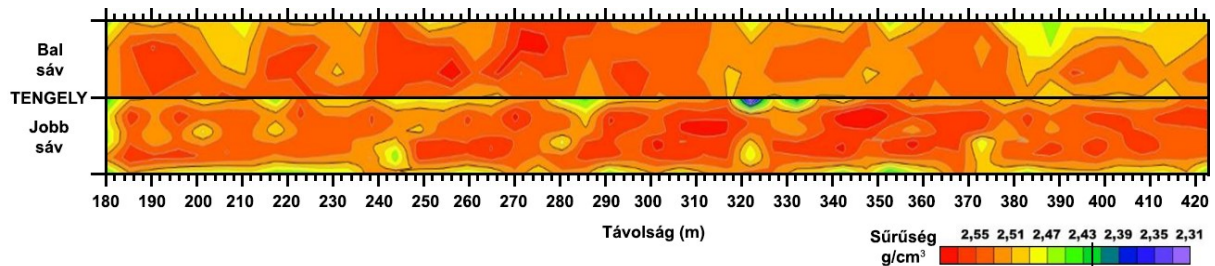
A vastagságmérések után rátérünk a földradarral meghatározott testsűrűség és szabadhézag-tartalom kiértékelésére. A helyszínen mért dielektromos állandó és az aszfaltkeverék szabadhézag-tartalma között a kapcsolatot a (7) összefüggéssel határoztuk meg. A helyszínen mért és a modellel számolt értékeket a 9. ábra mutatja be. Az AC 22 kötő- és alapréteg között nem volt tapasztalható nagy eltérés, mivel a két keverék igen hasonló volt egymáshoz. A modell paramétereit mind a három keveréktípusra a 3. táblázat tartalmazza. Előzetesen meghatároztuk, hogy a két változó, azaz a szabadhézag-tartalom és a dielektromos állandó közötti összefüggést  $R^2 \geq 0,60$  esetén tekintjük csak elfogadhatónak. Szerencsére ez a kritérium mind a három aszfaltrétegnél teljesült. A legmagasabb RMS hibát az AC 11 kopórétegnél találtuk és mivel az  $\epsilon$  hibátag is itt volt a legmagasabb, ezt a modellt végül nem tudtuk használni. Általánosságban kijelenthető, hogy a (7) modell jól tudja előre jelezni a szabadhézag-tartalmat a dielektromos állandóból, mivel a mért és a becsült értékek egy  $45^\circ$ -os egyenesre esnek és a pontok szóródása is kielégítő (9. ábra jobb oldala). Felhasználva mindegyik keverék laboratóriumban meghatározott  $G_{mm}$  értékét, a szabadhézagból a (6) képlettel testsűrűséget számoltunk.

3. táblázat. Az empirikus szabadhézag becsülő modell paramétereit.

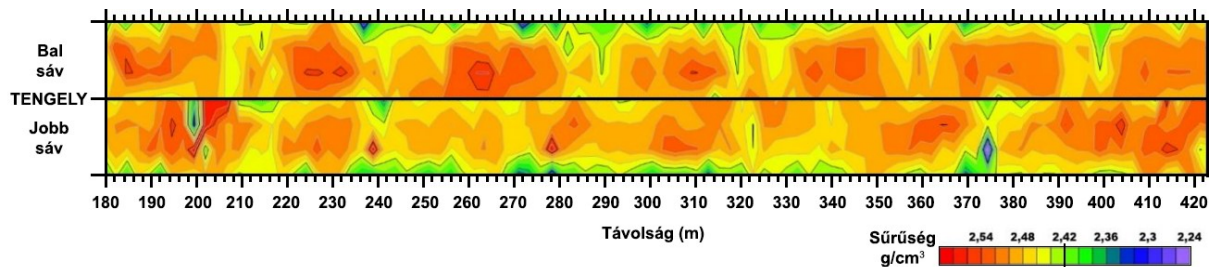
Keverék	$\alpha$	$\beta$	$\epsilon$	RMSE	$R^2$
AC 11 kopóréteg	9174,405	-1,325	-4,1985	1,034	0,88
AC 22 kötőréteg	3642,681	-1,292	0,2854	0,880	0,62
AC 22 alapréteg	5546,240	-1,412	0,6506	0,559	0,71

Az AC 22 aszfalt alapréteg sűrűségterképét elemezve megállapítható, hogy a jobb sávban az aszfaltsűrűség a sávközépen a legmagasabb, míg a padka felé haladva az értékek fokozatosan csökkennek. Ezzel szemben a bal sávban az aszfaltsűrűség többé-kevésbé homogén a 0+370 szelvényig, ahonnan kezdve egy jelentősebb sűrűségcsökkenés megfigyelhető az úttengely környezetében. Az AC 22 aszfalt kötőréteg sűrűségterképét elemezve megállapítható, hogy mind a jobb, mind pedig a bal sávban az aszfaltsűrűség a sávközépen a legmagasabb, míg az úttengely felé haladva az értékek fokozatosan csökkennek.





10. ábra. AC 22 alapréteg sűrűségterképe.



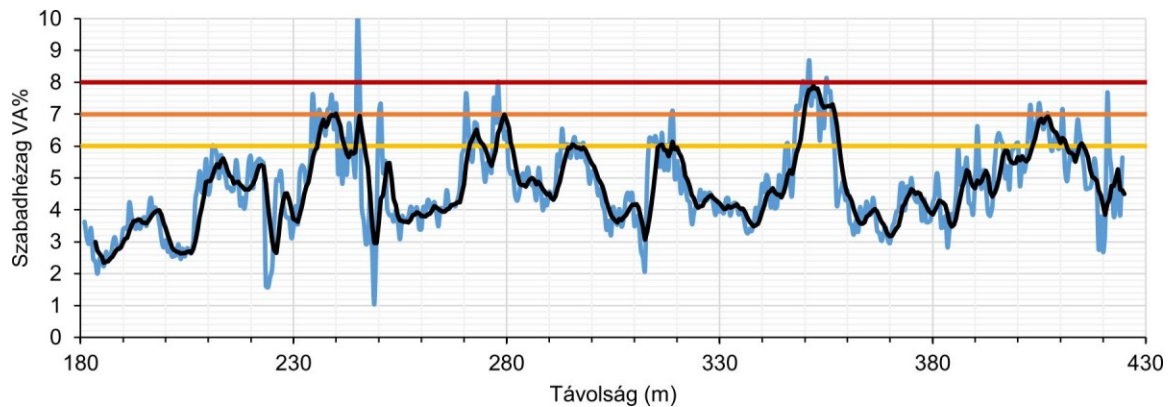
11. ábra. AC 22 kötőréteg sűrűségterképe.

A bemutatott két sűrűségterkép jól szemlélteti azt, hogy a beépített aszfaltanyagok testsűrűsége nem lesz egyenletes a teljes útfelületen, mivel az építési nehézségek rögtön megmutatkoznak minőségcsökkenés képében. Ebből következik, hogy az aszfaltsűrűség a sávközépen a legmagasabb, míg az úttengely felé haladva a sűrűségértékek fokozatosan csökkenek. Az aszfaltalap- és kötőréteg sűrűségterképeit összehasonlítva pedig az is megállapítható, hogy az alaprétegen mért sűrűségértékek magasabbak, tehát az alapréteg jobban lett tömörítve, mint a kötőréteg.

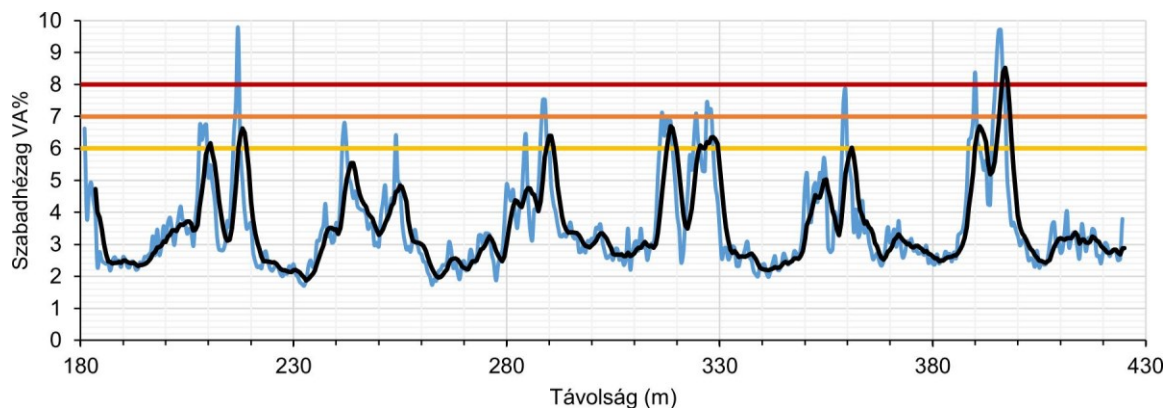
Az AC jelű aszfaltkeverékből épített új kopóréteg előírt átlagos hézagtartalma legfeljebb 6% (a megfelelőségi határ 7%), az új kötő- és az új alapréteg előírt átlagos hézagtartalma legfeljebb 7% (a megfelelőségi határ 8%) lehet az e-ÚT 06.03.21/M1 szerint, ha a mintaszám  $\geq 10$  db. A Texas Department of Transportation (1995) [16] szerint, ha a szabadhézag-tartalom 8,5% és 9,9% közötti, akkor már jelentős értékcsökkenésről beszélünk; míg 9,9% feletti  $V_A$ -nál az útburkolatot el kell távolítani és újra kell építeni [17]. Ennek megfelelően kiszámítottuk minden egyes réteg esetén a  $V_A = 6\% - 7\% - 8\%$  szabadhézag-tartalomhoz tartozó testsűrűség és dielektromos állandó küszöbértékeket. A számítás eredményét a 4. táblázat foglalja össze. A 4. táblázatból jól látszik, hogy az alapréteg és a kötőréteg testsűrűség határértéke három tizedesjegyre kiszámítva is megegyezik, míg az ehhez a testsűrűséghez tartozó dielektromos állandó már mutat kismértékű eltérést. Ez azért lehet mert a sűrűség jóval kisebb tartományban változik, mint a hozzá tartozó dielektromos állandó. Ezért a testsűrűség helyett a dielektromos állandóra vagy a szabadhézagra célszerű határértéket megfogalmazni, amikor a földradar méréseket kiértékeljük.

4. táblázat. A szabadhézag alapján megfogalmazott határértékek aszfaltrétegenként.

Keverék	$V_A$ 6%		$V_A$ 7%		$V_A$ 8%	
	$G_{mb}$	$\epsilon_{AC}$	$G_{mb}$	$\epsilon_{AC}$	$G_{mb}$	$\epsilon_{AC}$
AC 11 kopóréteg	2,304	5,13	2,279	5,06	2,255	5,00
AC 22 kötőréteg	2,421	5,00	2,396	4,87	2,370	4,77
AC 22 alapréteg	2,421	4,92	2,396	4,80	2,370	4,69



12. ábra. Az AC 22 kötőréteg szabadhézag-profilja a padkától 0,1 m-re (bal sáv széle), ahol VA 6% a sárga, VA 7% a zöld és VA 8% a piros határgörbe.



13. ábra. Az AC 22 kötőréteg szabadhézag-profilja a padkától 1,7 m-re (bal sáv közepe), ahol VA 6% a sárga, VA 7% a zöld és VA 8% a piros határgörbe.

A könnyebb áttekinthetőség kedvéért bemutatjuk még az AC 22 kötőréteg baloldali sávszélének (a padkától 0,1 m-re) és sávközepének (a padkától 1,7 m-re) a szabadhézag profilját (lásd 12–13. ábra). Berajzolva az ábrákra a 6%–7%–8% hézagtartalomhoz tartozó küszöbértékeket egyből megkapjuk a nem megfelelő vagy bizonytalan minőségű szakaszok szelvényhatárait. Mivel kötőréteg esetén a megfelelőségi határ 8%, ezért a mérésekre illesztett fekete színű mozgóátlag görbe érintési vagy metszéspontját kell megkeresnünk a vízszintes vörös határvonalal. Viszont, ha figyelembe vesszük a modell bizonytalanságát (ami átlagosan 0,6-0,8%-ra tehető), akkor helyesebb, ha a narancssárga (előírt) és a vörös (megfelelőségi) határvonalak közötti tartományt tekintjük nem megfelelőnek. Ezt elfogadva megállapíthatjuk, hogy a burkolat szélén a 0+370 és 0+380 szelvények közötti 10 méter hosszú útszakasz tömörsége nem megfelelő, de a 0+235 és 0+250 szelvényhatárok közötti 15 m-es útszakaszt is érdemes még tovább vizsgálni. A sávközépnek viszont csak a 0+395 és 0+400 szelvények közötti útszakasza esik a nem elfogadható szabadhézag tartományba.

A vizsgált kísérletű útszakaszon mind a 12 db fűrt magminta szabadhézag-tartalma jellemzően 2-5% között változott, így gyengébb minőségű építési szakaszokat nem jeleztek előre. Ebből is látható, hogy a földradar technológia legnagyobb előnye az, hogy igen nagy az adatsűrűség, valamint gyorsan és relatív pontosan képes dielektromos vagy testsűrűség vagy szabadhézag térképeket és profilokat előállítani. Ezek a térképek pedig ideálisak arra, hogy a gyengébben vagy éppen a jobban tömörített útszakaszokat lehatároljuk és azok minőségét fűrt mintával igazoljuk.

## 5. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben bemutatott mérések és azok feldolgozása alapján javasoljuk, hogy újépítésű pályaszerkezeti rétegek vastagságmérésénél minden réteg közé be kell építeni alumínium fólia antipólusokat, mivel ezek nagymértékben megnövelik a földradar adatok kiértékelésének pontosságát.

Hasonlóan az örvényáramos vastagságmérés technikához, ahol a réteg terítése előtt a fogadófelületre szintén egy antipólust helyeznek le, ami sok esetben szintén egy egyszerű alumíniumlap [18].

A vizsgált délalföldi lakóutca 220–240 m hosszú kísérleti útszakaszának tapasztalatai azt mutatják, hogy célszerű minden réteg terítése és betömörítése után az aktuális réteg felszínén elvégezni a földradar méréseket. A mért adatokból pedig csak az éppen vizsgált réteg vastagságát felhasználni a minőségellenőrzéshez. Ez az eljárás ugyan több mérést igényel, de sokkal pontosabb lehet, mint az egyszeri, a kész pályaszerkezet felszínén történő vastagságmérés. A többletmérés másrészt lehetővé teszi, hogy minden réteg testsűrűség vagy szabadhézag tartalmát is megállapítsuk.

Az aszfaltkeverékek dielektromos állandója és azok szabadhézag-tartalma között erős kapcsolatot találtunk, hasonlóan a nemzetközi szakirodalomhoz. Szisztematikus adatgyűjtéssel olyan empirikus modell fejleszthető, amivel a  $V_a$  értékeket  $\pm 1\%$  pontosan meg lehet becsülni. Erre a célra legjobban a fúrások helyén megmért dielektromos állandók és a fűrt minták laboratóriumban meghatározott hézagjellemzői használhatóak fel. Valójában erre nincs is mindig szükség, hiszen határértéket közvetlenül a dielektromos állandóra is megfogalmazhatunk. Újra felhívjuk a figyelmet arra a tényre, hogy a különböző utakról gyűjtött GPR adatok már bizonyították, hogy a dielektromos állandó értékének csökkenése mindig sűrűségproblémákat jelez előre! Ezért az első hengerjárat után mért dielektromos állandó térképek már jó viszonyítási alapot adnak a későbbi kiértékelésekhez.

Összefoglalva kijelenthetjük, hogy a roncsolásmentes útdiagnosztikai módszerek közül a földradarok és az intelligens úthengerek (Intelligent Compaction, IC) képesek egyedül biztosítani az aszfaltkeverék folyamatos kvantitatív tömörségének meghatározását. Viszont továbbra is csak a földradar módszer alkalmas a tömörség mellett az útpályaszerkezet rétegvastagságnak a meghatározására is, így az építési minőség ellenőrzésére jó szívvel ajánlható.

## 6. IRODALOMJEGYZÉK

[1]: Goel, A. & Das, A. 2008: Nondestructive Testing of Asphalt Pavements for Structural Condition Evaluation: A State of the Art. *Nondestructive Testing and Evaluation* 23 (2): 121–40. <https://doi.org/10/fdtqhf>.

[2]: Tóth, C. & Primusz, P. 2021: Modern roncsolásmentes útdiagnosztikai eszközök. *Az Aszfalt* 28 (1): 33–47.

[3]: Pattantyús-Á., M., Neduczka, B., Prónay, Z. & Törös, E. 1994: A földradar módszerfejlesztés másfél éves tapasztalatai az ELGI-ben. *Magyar geofizika* 35 (1): 32–41.

[4]: Katona, O., Sipos, G., Fiala, K., Rakonczai, J. & Mezösi, G. 2013: A georadar működése és felhasználási területei. *Hidrológiai közlöny* 93. évf. (4. sz.): 55–60.

[5]: Kóti, Á. 2014: Közforgalmú utak úthibáinak roncsolásmentes vizsgálata földradar segítségével. Diplomamunka, Miskolc: Miskolci Egyetem.

[6]: Maser, K. R. & Scullion, T. 1992: Automated Pavement Subsurface Profiling Using Radar: Case Studies of Four Experimental Field Sites. *Transportation Research Record* 1344: 148–54.

[7]: Krysiński, L. & Sudyka, J. 2013: GPR Abilities in Investigation of the Pavement Transversal Cracks. *Journal of Applied Geophysics* 97 (október): 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.03.010>.

[8]: Diamanti, N. & Redman, D. 2012: Field Observations and Numerical Models of GPR Response from Vertical Pavement Cracks. *Journal of Applied Geophysics* 81 (június): 106–16. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.09.006>.

[9]: Sudyka, J. & Krysi, L. 2011: Radar Technique Application in Structural Analysis and Identification of Interlayer Bonding. *International Journal of Pavement Research & Technology* 4 (3): 10.

[10]: Lambot, S., Weihermüller, L., Huisman, J. A., Vereecken, H., Vanclooster, M. & Slob, E. C. 2006: Analysis of Air-Launched Ground-Penetrating Radar Techniques to Measure the Soil Surface Water Content. *Water Resources Research* 42 (11). <https://doi.org/10/b7rkw2>.

- [11]: Petőcz, M., Schváb, J. & Szarka, I. 1999: Útpályaszerkezeti rétegek roncsolásmentes vastagságmérése. Közúti és mélyépítési szemle 49 (6): 219–25.
- [12]: Runa, B. & Balogh, P. 2021: Georadar szerepe a roncsolásmentes útpályadiagnosztikában. Az Aszfalt XXVIII. (2): 49–56.
- [13]: Saarenketo, T. 1997: Using Ground-Penetrating Radar and Dielectric Probe Measurements in Pavement Density Quality Control. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1575 (1): 34–41. <https://doi.org/10/d28cch>.
- [14]: Saarenketo, T. & Scullion, T. 2000: Road Evaluation with Ground Penetrating Radar. Journal of Applied Geophysics 43 (2–4): 119–38. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(99\)00052-X](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00052-X).
- [15]: Hoegh, K., Roberts, R., Dai, S. & Zegeye Teshale, E. 2019: Toward Core-Free Pavement Compaction Evaluation: An Innovative Method Relating Asphalt Permittivity to Density. Geosciences 9 (7): 280. <https://doi.org/10/ghgqbc>.
- [16]: TxDOT 2004: Standard Specifications for Construction and Maintenance of Highways, Streets, and Bridges. Texas Department of Transportation.
- [17]: Chen, D.-H., Hong, F., Zhou, W. & Ying, P. 2014: Estimating the Hotmix Asphalt Air Voids from Ground Penetrating Radar. NDT & E International 68 (december): 120–27. <https://doi.org/10/f6p8h5>.
- [18]: Pethő, L. & Tóth, C. 2010: Beépített aszfaltrétegek vastagságának roncsolásmentes meghatározása. Közlekedésépítési szemle 60 (8): 15–19.



# Visszanyert aszfaltot tartalmazó aszfaltkeverék tervezése lágyabb bitumen felhasználásával

## Rosta Szabolcs, Zvekán Fanni

Duna Aszfalt Út és Mélyépítő Zrt.

E-mail: [rosta.szabolcs@dunaaszfalt.hu](mailto:rosta.szabolcs@dunaaszfalt.hu), [zvekan.fanni@hodut.hu](mailto:zvekan.fanni@hodut.hu)

DOI: [10.36246/UL.2022.1.05](https://doi.org/10.36246/UL.2022.1.05)

### KIVONAT

Útpályaszerkezeti aszfaltrétegek esetén a visszanyert aszfalt használata a hazai gyakorlatban jóval alacsonyabbra adódik a nyugat-európai gyakorlathoz képest. Az utóbbi években érvényben lévő útügyi műszaki előírások szerint a maximálisan adagolható visszanyert aszfalt (RA) mennyisége fokozott forgalmi terhelésű (C, D, E) útkategóriában útépítési bitumenekkel készült alap és kötőrétegek esetén 20% volt. Az egyik legnagyobb korlátját ennek a határértéknek az jelentette, hogy a visszanyert aszfaltban lévő kötőanyag az évek folyamán már olyan mértékű előregedésen megy keresztül, hogy nagyobb mennyiségben az aszfaltkeverék tulajdonságára kontroll lépések nélkül mértékadóan képes hatni. A hazai gyakorlatban a normál és fokozott igénybevételi kategóriában alkalmazott útépítési bitumenek fokozatát szinte kizárólag B 50/70 típusra szokás megválasztani. Az ilyen kategóriájú bitumen tulajdonságait a visszanyert aszfaltban lévő kötőanyag tulajdonsága nagyobb adagolási mennyiségeknél képes annyira befolyásolni, hogy a bitumenelegy legfontosabb jellemzői (lágyuláspont, penetráció) már egy keményebb kategóriájú útépítési bitumen paramétereinek felelnének meg.

Az előregedett kötőanyag tulajdonságainak kompenzálására magas RA adagolás esetén ilyen esetekben célszerű lágyabb kategóriájú bitument alkalmazni. Magyarországon ilyen bitumenkategória ugrással történő laboratóriumi keveréktervezésre korábban még nem volt gyakorlat.

Jelen cikkünkben bitumenkategória ugrással történő keveréktervezés folyamatát mutatjuk be egy AC 22 kötő (F) keverék esetén B 50/70 bitumenelegyet figyelembe véve. A keveréket 40 % RA adagolással és B 70/100-as bitumen felhasználásával terveztük meg, és aszfaltmechanikai vizsgálatok alapján értékeltük annak teljesítményét.

*Kulcsszavak:* visszanyert aszfalt, bitumen-fokozat ugrás, keveréktervezés, lágyuláspont, penetráció

### ABSTRACT

In the case of asphalt pavement layers, the use of reclaimed asphalt (RA) is lower in Hungary compared to Western European practice. According to the Hungarian technical specification valid in recent years, the allowable maximum amount of reclaimed asphalt on medium volume roads (C, D, E category) for asphalt mixtures with normal bitumens was 20% for base and binder layers. One of the biggest limitations of this threshold is that the binder in the reclaimed asphalt to such an extent that it is able to have a significant effect on the properties of the asphalt mix in if RA is used in larger quantities. The bitumen type of asphalt mixtures used in the normal and increased stress category used in Hungary is almost exclusively chosen for type B 50/70. The properties of this category of bitumen can be so influenced by the properties of the binder in the reclaimed asphalt to such an extent that the most important characteristics of the bitumen blend (softening point, penetration) correspond to the parameters of a more rigid category of road bitumen.

In such cases, it is advisable to use a softer category of bitumen to compensate for the properties of the aged binder. Designing asphalt mixes using the binder grade bump method has never been used in Hungary before.

In this paper, we present the process of mixture design for bitumen grade bump for an AC 22 binder (F) mixture. The mixture with a base binder properties of B50/70 was designed with 40% RA and B 70/100 bitumen and its performance was evaluated based on asphalt mechanical tests.

*Keywords:* reclaimed asphalt, bitumen grade-bump, asphalt mix design, softening point, penetration

**Rosta Szabolcs**

*Széchenyi István Egyetem Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola PhD hallgatója (Közlekedésépítési és Vízmérnöki Tanszék). A Duna Csoport innovációs főmérnöke.*

**Zvekán Fanni**

*A Duna Csoport innovációs mérnöke.*

---

## 1. BEVEZETÉS

Napjainkban egyre jelentősebb problémát okoz a világon szinte mindenhol a hulladékok keletkezése és kezelése, a környezetszennyezés, valamint a nem megújuló energiaforrások mennyiségének rohamos csökkenése. Mindezek mellett nem szabad elfeledkeznünk a globális felmelegedésről, a magas széndioxid kibocsátásról, valamint arról a tényről, hogy a Föld nyersanyagkészletei is csak véges mennyiségben állnak a rendelkezésünkre. Számptalan kutatási terület foglalkozik ezekkel a kérdésekkel, hogy mielőbbi megoldást találjanak a felmerült problémákra.

Az elmúlt évtizedekben az építőipar is elkezdett nyitni a környezetbarát megoldások irányába. Bár a visszanyert aszfaltot 1915 óta használják fel aszfaltkeverékekben, az újrahazsnálat különösen népszerűvé vált az 1970-es években, amikor - az arab olajkorlátozás következtében létrejövő magas olajárak miatt - igyekeztek olyan technológiai újításokat bevezetni, amelyek révén csökkent az aszfalt kötőanyag iránti kereslet, és ezáltal az aszfaltburkolatok aszfalt keverékeinek költségei is. Az ekkor kifejlesztett módszereket számos új technológia mellett a mai napig használjuk az útéépítésben [1]. A visszanyert aszfalt útéépítésben történő felhasználását biztosító technológiák között megkülönböztetünk helyszíni és keverőtelepi, hideg és meleg eljárásokat [2] [3]. Ezek közül kiemelendő a keverőtelepi meleg eljárás, amely nagy mennyiségben teszi lehetővé a visszanyert aszfalt felhasználását az egyes útszakaszok rekonstrukciója során olyan módon, hogy az annak eredeti funkcióját megtartva, ismét pályaszerkezeti aszfalttrétegbe kerül. Ahogy azt már többen is bemutatták, a keverőgép felépítése, kialakítása, és ezáltal az eltérő beadagolási módok jelentős mennyiségi korlátokat szabnak a visszanyert aszfalt felhasználás tekintetében [4] [5]. Az adagolási módok között a fő különbséget az jelenti, hogy a visszanyert aszfalt még hidegen, vagy már melegen találkozik a forró kőanyagokkal, vagyis a forró adalékok által, azoktól elkülönítve egy másik létesítményben, vagy esetleg azokkal együtt, egy helyen kerül felmelegítésre. Az elérhető kialakítások közül a paralleldobos, vagy felső dobos RA adagolási rendszer már igen nagy hatékonyságúnak tekinthető, optimális esetben akár 50-70 %-os visszaadagolást is lehetővé tesz. Az ilyen típusú aszfaltkeverők főként Nyugat-Európában terjedtek el. Hazai megjelenésük, illetve elterjedésük a jövőben nagyban elősegítheti az e-UT 05.02.11 számú útügyi műszaki előírás 2021. évi módosításának megfelelő, a korábbi évek gyakorlatánál jóval magasabb visszaadagolások megvalósítását.

Az EAPA 2020. évi felmérése alapján az európai országok visszanyert aszfalt felhasználása meleg aszfaltkeverékekbe igen változó mértékű [6]. Amíg Németországban, Franciaországban vagy Finnországban a keletkező éves visszanyert aszfalt mennyiségének több, mint 75 %-a kerül ismét meleg eljárással gyártott aszfaltkeverékekbe, tehát újrahazsnálatra, addig Olaszországban vagy Norvégiában a 35 %-ot sem éri el ez az érték. Ezekben az országokban nagyobb mértékben újrahazsnosítják az anyagot helyszíni hideg, telepi hideg eljárással, vagy szemcsés anyaggal keverve burkolatalap rétegekhez.

A visszanyert aszfalt újrahazsnálat hatékonyságát legjobban jellemző mérőszámát úgy fejezhetjük ki, hogy az adott országban leggyártott összes aszfaltkeverék mennyiségében mennyi visszanyert aszfaltot használtak. Európában az EAPA adatai alapján ebben legelő jár Belgium, Dánia, Svájc, Finnország, Németország, ahol 25-30%-os az arány. Ezzel szemben Magyarországon ez az arány mindössze 2,1%-ra adódott a felmérés szerint.

Hazánkban az útépités azon területek közé sorolható, ahol még nem terjedtek el kellő mértékben a környezetet kímélő technológiák, azon belül is az olyan aszfaltkeverékek gyártását célzóak, amelyek nem csupán elsődleges nyersanyagot, hanem másodlagos nyersanyagként az aszfalt pályaszerkezeti rétegbe egyszer már beépített anyagot (visszanyert aszfaltot) is használnak. Ennek két fő oka, hogy az eddig érvényben lévő szabályozás szerint sajnos könnyedén hulladék státuszba sorolható a visszanyert aszfalt, ami nagyban megnehezíti az újrafelhasználás vagy az újrahasznosítás folyamatát, valamint a környezetet jobban kímélő módszerek a megszokottól eltérő aszfalt előállítási technológiát igényelnek. Ezen területek fejlesztése és a korlátok felülvizsgálata azonban egyre fontosabbnak látszik figyelembe véve, hogy hazánk kövagyron helyzete nem túl biztató. Aszfalt alapanyagként megfelelő kőanyagot jelenleg 10-15 kőbánya termel ki, amelyekben a még hozzáférhető kő mennyisége összesen kb. 300 millió tonnára tehető. A szükséges évi aszfaltalapanyag és az emellett képződő egyéb anyagok össz mennyisége 10 millió tonna feldolgozást jelent a bányákban évente, amely alapján a jelenlegi ásványvagyron Magyarországon maximum 30 évre tehető [7]. Ennek fényében törekedni kell arra, hogy minél több területen újrafelhasználjuk az útépitési célra megfelelő anyagokat.

Jelenlegi kutatásunk célja olyan aszfaltkeverékek tervezése, amelyek a korábbi évek gyakorlatát meghaladó mennyiségben tartalmaznak visszanyert aszfaltot és tulajdonságaikat, teljesítményüket tekintve megfelelnek a vonatkozó előírásokban meghatározott, visszanyert aszfaltot nem tartalmazó, meleg eljárással készített aszfaltkeverékek felé támasztott követelményeknek. Az ilyen típusú keverékek tervezése és laboratóriumi vizsgálata lehet az első lépés a magas újrahasználat hazai elterjedése felé vezető úton, melyet a telepi meleg újrahasználatot biztosító keverőtelepi és gépészeti újítások követhetnek majd.

## 2. A VIZSGÁLT ASZFALTKEVERÉKEKHEZ FELHASZNÁLT ANYAGOK, VALAMINT A KEVERÉKEK BEMUTATÁSA

Kutatásunk során kétféle aszfaltkeveréket terveztünk, majd ezeket laboratóriumi keverés útján legyártottuk, és vizsgálatokat végeztünk az egyes tulajdonságaik összehasonlítása érdekében. Az egyik keverék minden tekintetben megfelel AC 22 kötő (F) B 50/70-es aszfaltkeverékekre vonatkozó jelenlegi előírásoknak. Munkánk során ez szolgált referencia gyanánt. A másik vizsgált keverék azonban nem szabványos keverék: ezt 40 % visszanyert aszfalt felhasználásával terveztük, valamint úgy, hogy teljesítse az AC 22 kötő (F) B 50/70-es aszfaltkeverékek felé támasztott követelményeket B 70/100 bitument használva.

A keverékek során felhasznált alapanyagok a következők: mészköliszt, három különböző frakciójú, gánti származású kőanyag (NZ 0/4, NZ 4/11, NZ 11/22), kétféle visszanyert aszfalt (11 RA 0/8, 22 RA 0/16) és két típusú útépitési bitumen (B 50/70, B 70/100). A mészköliszt és a kőanyagok összetételét, valamint a friss bitumenek lágyuláspont és penetráció értékeit a vonatkozó szabványoknak megfelelően határoztuk meg.

A felhasznált visszanyert aszfalt egy körülbelül 18 éves, két számjegyű főút rétegeinek marásából származik. Az Országos Közúti Adatbank (OKA) adatbázisa alapján az alapanyagot szolgáltató szakasz alaprétegében előfordulhat nem zúzott szemcséjű kavics, azonban a keverékek pontos összetétele, tulajdonsága nem ismert (1. táblázat).

1. táblázat. Az OKA pályaszerkezeti adatai a visszanyert aszfaltot biztosító két számjegyű főút megfelelő szakaszáról.

Építés dátuma	Vastagság	Réteg tetejének mélysége (mm)	Réteg anyaga az OKA szerint
2003.05.25.	45 mm	0	B213: aszfaltbeton (AB-8, -11,-11/F,-16,-16/F; AC-8,-11,-11/F,-16, -16/F kopó)
2003.05.22.	60 mm	45	K610: kötőréteg (K-11,-12,-20,-22,-20/F,-22/F; AC-11, -16/NM, -22, -22/F, 22/NM kötő)
2003.05.19.	90 mm	105	K620: kötőréteg (JU-11, JU-16, JU-20, JU-22,

			JU32, JU32/F, JU-35, JU-35/F, JU-45/F)
2003.05.16.	200 mm	195	A741: cement kötőanyaggal stabilizált szemcsés anyag telepen keverve (CK <sub>t</sub> , PK <sub>t</sub> )

A kapott adatok alapján úgy döntöttünk, hogy az útszakasz felső 105 mm-ének marásából származó anyagot használjuk a kutatás során, ezért egy rövidebb szakaszon az egybemart kopó és kötőrétegből mintát gyűjtöttünk. A laboratóriumba beérkező visszanyert aszfaltot 0/11 és 11/22 frakciókra osztottuk, a 22,4 mm-nél nagyobb szemeket pedig elkülönítettük. Az így kapott két frakció esetében meghatároztuk az alkotó kőanyagok szemmegoszlását és a bitumentartalmat, majd kellő mennyiségű bitument nyertünk vissza az MSZ EN 12697-3 szabványnak megfelelően, az előregedett bitumenek vizsgálatához.

Az alapanyagok szükséges vizsgálatának elvégzése után megkezdődhetett a keveréktervezés, azt követően pedig a laboratóriumi keverések és a kész aszfaltok vizsgálatai. Az alapanyagok összetételét a 2. táblázat mutatja be, míg az elkészített keveréktervek szerinti adagolásokat a 3. táblázatban láthatjuk.

2. táblázat. A bemutatott két aszfaltkeverékhez felhasznált alapanyagok szemmegoszlása és bitumentartalma.

Alapanyag megnevezése	Mészköliszt	Gánt NZ 0/4	Gánt NZ 4/11	Gánt NZ 11/22	11 RA 0/8	22 RA 0/16
<b>Szitaméret (mm)</b>	<b>Kőanyag szemmegoszlás, átesett rész [tömeg%]</b>					
41,5	100	100	100	100	100	100
32	100	100	100	100	100	100
22,4	100	100	100	98	100	100
16	100	100	100	49	100	92
11,2	100	100	96	2	100	54
8	100	100	61	0	93	36
5,6	100	100	29	0	81	30
4	100	70	7	0	68	26
2	100	29	3	0	51	21
1	100	21	3	0	37	17
0,5	100	16	2	0	28	13
0,25	99	12	2	0	22	11
0,125	97	10	2	0	17	9
0,063	79,4	7,6	1,9	0,3	15,7	8,0
<b>Kötőanyag-tartalom [tömeg%]</b>	-	-	-	-	5,06	2,90

3. táblázat. A referencia keverék és a 40 % visszanyert aszfalt tartalmú keverék keverékterv szerinti adagolási mennyiségei tömeg%-ban.

Alapanyag megnevezése	Adagolási mennyiségek keverékterv szerint (%)	
	AC 22 kötő (F) B 50/70	AC 22 kötő (F) B 50/70 (er) RA40
Mészköliszt	4	2
Gánt NZ 0/4	30	20
Gánt NZ 4/11	27	7



Gánt NZ 11/22	39	30
11 RA 0/8	0	17
22 RA 0/16	0	23
B 50/70	4,4	0
B 70/100	0	2,9

### 3. A VISSZANYERT ASZFALT ÉS AZ AZZAL GYÁRTOTT ÚJ ASZFALTKEVERÉK BITUMENTULAJDONSÁGAINAK ÖSSZEFÜGGÉSEI

A visszanyert aszfalt tartalmú aszfaltkeverékek kötőanyagának tulajdonságai nem csak a friss bitumen tulajdonságaitól, hanem az RA-ban lévő bitumen tulajdonságaitól is függenek: penetráció és lágyuláspont értékei meghatározhatók az MSZ EN 13108-1 szabvány 'A' mellékletében foglalt képletek alkalmazásával. Ezáltal előre becsülhető, hogy a visszanyerés útján megismert régi bitument és a friss bitument összekeverve milyen eredményekre számíthatunk, az megfelel-e majd a követelményeknek. A vonatkozó szabvány szerint az említett számításokat akkor kell alkalmazni, ha a visszanyert aszfalt kötőanyaga és a hozzáadott kötőanyag is útépitési bitumen. A keverékekben lévő kötőanyag penetrációjának, valamint lágyuláspontjának számítását a következő képletek (1) és (2) szerint lehet elvégezni:

$$a \lg pen_1 + b \lg pen_2 = (a + b) \lg pen_{mix} \tag{1}$$

$$a \times T_{R\&B\ 1} + b \times T_{R\&B\ 2} = T_{R\&B\ mix} \tag{2}$$

ahol:

$pen_{mix}$ : a visszanyert aszfaltot tartalmazó keverék kötőanyagának számított penetrációja;

$pen_1$ : a visszanyert aszfaltból kinyert kötőanyag penetrációja;

$pen_2$ : a hozzáadott kötőanyag penetrációja;

$T_{R\&B\ mix}$ : a visszanyert aszfaltot tartalmazó keverék kötőanyagának számított lágyuláspontja;

$T_{R\&B\ 1}$ : a visszanyert aszfaltból kinyert kötőanyag lágyuláspontja;

$T_{R\&B\ 2}$ : a hozzáadott kötőanyag lágyuláspontja;

$a$  és  $b$ : a visszanyert aszfaltból származó kötőanyag tömegaránya  $a$ , és a hozzáadott bitumen tömegaránya  $b$ , a keverék teljes kötőanyagának arányában;  $a + b = 1$ .

Kutatásunk során a laboratóriumi aszfaltkeverések előtt, az elkészült keveréktervek alapján elvégeztük a fent leírt számításokat annak érdekében, hogy meghatározzuk a készítendő visszanyert aszfalt tartalmú keverék bitumentulajdonságait, és kiválasszuk a keveréshez megfelelő friss bitument. A számítások elvégzéséhez négyféle bitumen - két normál útépitési bitumen és két, különböző visszanyert aszfalt frakcióból visszanyert bitumen - penetráció és lágyuláspont értékeit állapítottuk meg és használtuk fel (**Hiba! A hivatkozási forrás nem található.**). A hozzáadott és a visszanyert aszfaltból kinyert kötőanyag penetrációját az MSZ EN 1426 szabvány, lágyuláspontját pedig az MSZ EN 1427 szabvány szerint határoztuk meg. A vizsgálatokhoz szükséges előregedett bitument az MSZ EN 12697-3:2013+AI:2019 szabványban leírtakat követve nyertük vissza.

4. táblázat. A felhasznált normál útépitési bitumenek és a visszanyert aszfalt frakciók bitumenjeinek mért lágyuláspont és penetráció értékei.

Tulajdonság megnevezése	B 50/70	B 70/100	11 RA 0/8	22 RA 0/16
Lágyulás pont (°C)	50,8	45,2	68,1	71,7
Penetráció (0,1 mm, 25°C)	56	82	30	27

Két lehetséges keverék tulajdonságait számítottuk ki a kapott eredmények fényében. Mindkét esetben azonos volt a keverékbe kerülő visszanyert aszfalt mennyisége (40 %), és ezáltal a hozzáadott és a

viSSZanyert aszfaltban lévő bitumenek aránya is. A különbséget egyedül a friss bitumen típusa jelentette: az első keverékbe (AC 22 kötő (F) B 50/70 RA40) a referenciakerékkel megegyező bitument, B 50/70-es normál útépítési bitument terveztünk, míg a második esetben (AC 22 kötő (F) B 50/70 (er) RA40) egy lágyabb bitumen alkalmazásával, B 70/100-as normál útépítési bitumennel számítottuk ki a keverék bitumen elegyének tulajdonságait (5. táblázat).

5. táblázat. A két elméleti aszfaltkeverék bitumen keverékének számolt lágyuláspont és penetráció értékei.

Tulajdonság megnevezése	AC 22 kötő (F) B 50/70 RA40	AC 22 kötő (F) B 50/70 (er) RA40	B 50/70 határérték
Lágyuláspont (°C)	57,3	53,6	46-54
Penetráció (0,1 mm, 25°C)	44	57	50-70

A kapott eredmények alapján megállapítható, hogy a B 50/70-es hozzáadott bitumen használatakor sem a keverék penetráció, sem a lágyuláspont értéke nem esik a B 50/70-es bitumen megengedett határértékei közé amennyiben 40% RA-t adtunk a keverékhez. A második keverék esetében, B 70/100-as hozzáadott bitumen alkalmazásakor a lágyuláspont és a penetráció értékek viszont már megfelelnek a B 50/70-es bitumennel készített AC 22 kötő (F) típusú keverékek felé támasztott követelményeknek. A számításokból levonható a következtetés, miszerint a felhasználni kívánt viSSZanyert aszfalt frakciókhoz (a megfelelő kőanyagokon kívül) a lágyabb, B 70/100-as bitument kell felhasználni a tervezett AC típusú keverék elkészítéséhez. Ekkor az új és a viSSZanyert aszfaltban lévő előregedett bitumen keverékének tulajdonságai meg fognak felelni a B 50/70-es útépítési bitumen követelményeinek, amely felhasználásával készítjük a referencia aszfaltkeveréket is.

Az elvégzett számítások helyességét igazolják a laboratóriumi keverésből származó RA tartalmú aszfaltból viSSZanyert bitumenkeverék vizsgálati eredményei (6. táblázat). A vizsgálat során megállapított értékek csak kis mértékben térnek el a számítottaktól, vagyis az alapanyagok tulajdonságainak meghatározása kellően pontosra sikerült ahhoz, hogy akár az elvégzett számításokkal jellemezzük a készített új aszfaltkeveréket, ezzel megtakarítva a keverékből történő bitumenviSSZanyerés idejét és energiabefektetését.

6. táblázat. A 40 % RA tartalmú AC 22 kötő (F) B 50/70 (er) RA40 aszfaltkeverék bitumenjének szabvány szerint számított és viSSZanyerés után mért lágyuláspont és penetráció értékei.

Tulajdonság megnevezése	Számolt értékek	Mért értékek	B 50/70 határérték
Lágyuláspont (°C)	53,6	55,2	46-54
Penetráció (0,1 mm, 25°C)	57	51,2	50-70

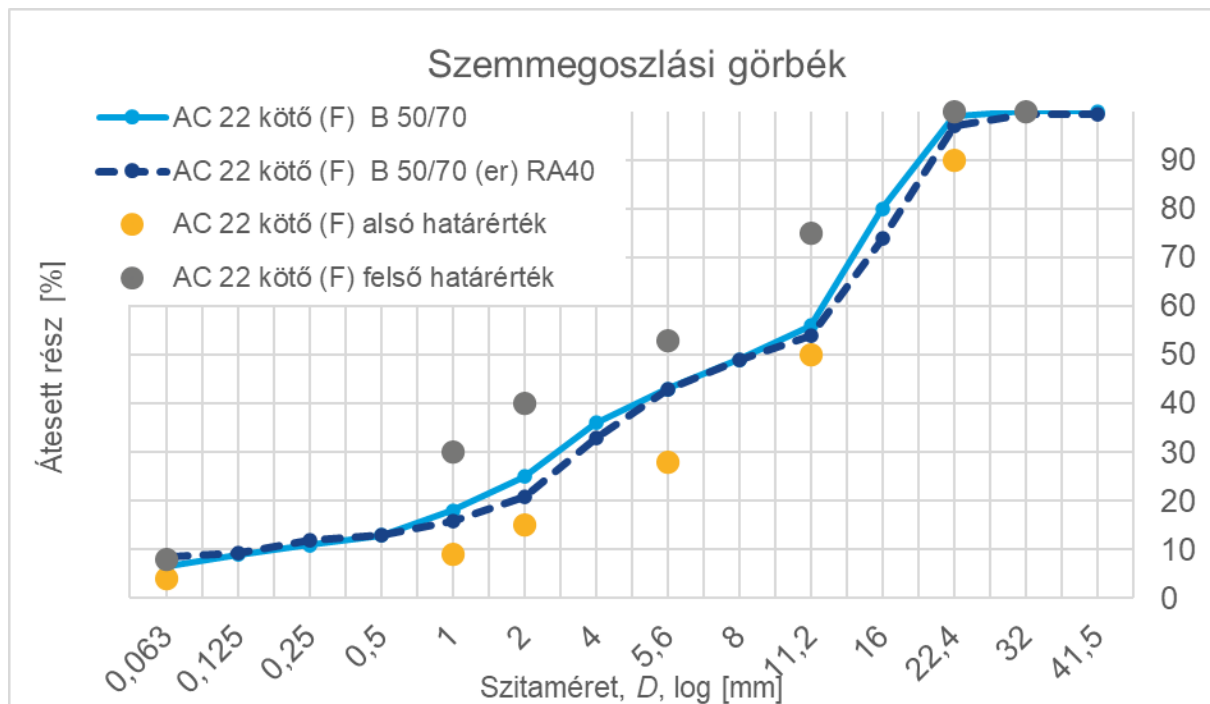
#### 4. A REFERENCIA ÉS A VISSZANYERT ASZFALTOT TARTALMAZÓ KEVERÉK VIZSGÁLATI EREDMÉNYEINEK BEMUTATÁSA

Az elkészített aszfaltkeverékeken először szemmegoszlás és oldható kötőanyagtartalom meghatározást, majd számos aszfaltmechanikai vizsgálatot végeztünk azok teljesítőképességének összehasonlítására, valamint annak megállapítására, hogy a 40 % RA tartalmú, B 70/100-as bitumennel készített AC 22 kötő (F) B 50/70 (er) RA40 jelű aszfaltkeverék teljesíti-e a referenciakerékként is alkalmazott keverékre (AC 22 kötő (F) B 50/70) vonatkozó előírások követelményeit.

##### 4.1. SZEMMEGOSZLÁS ÉS OLDHATÓ KÖTŐANYAGTARTALOM

Az aszfaltkeverékek egyik legfontosabb jellemzője a szemmegoszlás, amelyre szigorú előírások vonatkoznak. Ebből kifolyólag először ezt a tulajdonságot határoztuk meg mind a referencia keverék, mind pedig a viSSZanyert aszfalt tartalmú keverék esetén, hiszen csupán ezek megfelelésekor érdemes vizsgálni az aszfaltkeverék további jellemzőit.

A megállapított szemmegoszlásokat és az *e-UT 05.02.11* előírás által meghatározott határértékeket összevetve elmondható, hogy mindkét keverék teljesíti az ilyen irányú követelményeket (1. ábra). A visszanyert aszfalt frakciókból vételezett mintákkal kellőképpen jellemezni lehetett azok szemmegoszlását a keveréktervezéshez. Megfelelően homogénnek bizonyultak, mivel azokat a keverés során nagy mennyiségben felhasználva sem okozták a keverék szemmegoszlásának jelentős megváltozását (pl. túlzott finomodás). Ennek eredményeként sikerült olyan RA tartalmú keveréket létrehozni, amely szemmegoszlását tekintve hasonlít a referencia keverékhez. Ezzel lehetővé vált a további tulajdonságok összehasonlítása is, mivel ezek alapján az esetleges különbségek nem a szemmegoszlások közötti jelentős eltérésekből adódnak, ha lesznek.



1. ábra. A vizsgált két keverék szemmegoszlás görbéinek viszonya a vonatkozó határértékekhez.

#### 4.2. TESTSŰRŰSÉGEK ÉS HÉZAGTARTALOM

Az elkészített kétféle aszfaltkeverék összehasonlításának következő lépcsőjeként azok testsűrűségét és hézagjellemzőit vizsgáltuk a vonatkozó szabványok szerint (*MSZ EN 13 108-20 C.1.2, 2x50 ütés, MSZ EN 12697-6, MSZ EN 12697-5, MSZ EN 12697-8*). Az eredményeket a 7. táblázat foglalja össze. A két keverék között a vizsgált paraméterekben nincs különbség, testsűrűségük és hézagmentes testsűrűségük közel azonos, szabadhézag-tartalmuk között pedig csekély 0,4 %-os eltérés mutatkozott meg, ami elhanyagolhatónak mondható. Az adatok alapján megállapítható, hogy mindkét keverék teljesíti a hézagjellemzők felé támasztott követelményeket, megfelelnek az *e-UT 05.02.11*-ben foglaltaknak (szabadhézag-tartalom 3-5 % között). Ezen mérési eredményekkel is alátámasztható a sikeres keveréktervezés és laborkeverés, hiszen a precíz munkának és a gondos alapanyagválasztásnak, vizsgálatoknak köszönhetően érték el ezeket a közel azonos jellemzőket.

7. táblázat. A referencia keverék és a 40 % visszanyert aszfalt tartalmú keverék testsűrűsége, hézagmentes testsűrűsége és szabadhézag-tartalma.

Minta megnevezése	AC 22 kötő (F) B 50/70	AC 22 kötő (F) B 50/70 (er) RA40
Testsűrűség, $\rho_{tSSD, \text{átl}}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,497	2,494

Hézagmentes testsűrűség átlag, $\rho_{mv, \text{átl}} [\text{Mg/m}^3]$	2,615	2,624
Szabadhézag-tartalom, $V_m [\%]$	4,5	4,9

### 4.3. VÍZÉRZÉKENYSÉG

A keverékek vízérzékenységét (ITSR) 3-3 száraz, illetve nedves próbatest hasító-húzó szilárdsági értékeiből állapítottuk meg. AC 22 kötő (F) jelű keverékek esetén az *e-UT 05.02.11* alapján a vízérzékenység alsó határértéke  $\text{ITSR}=80\%$ . A 8. táblázatban bemutatott eredményeken jól látszik, hogy a referencia és az RA tartalmú keverék vízérzékenysége egyaránt teljesíti ezt a követelményt. Az ITSR érték ugyanolyan jónak mondható mindkét esetben, az ásványi anyag és az aszfalt kötőanyag közötti tapadás kiváló.

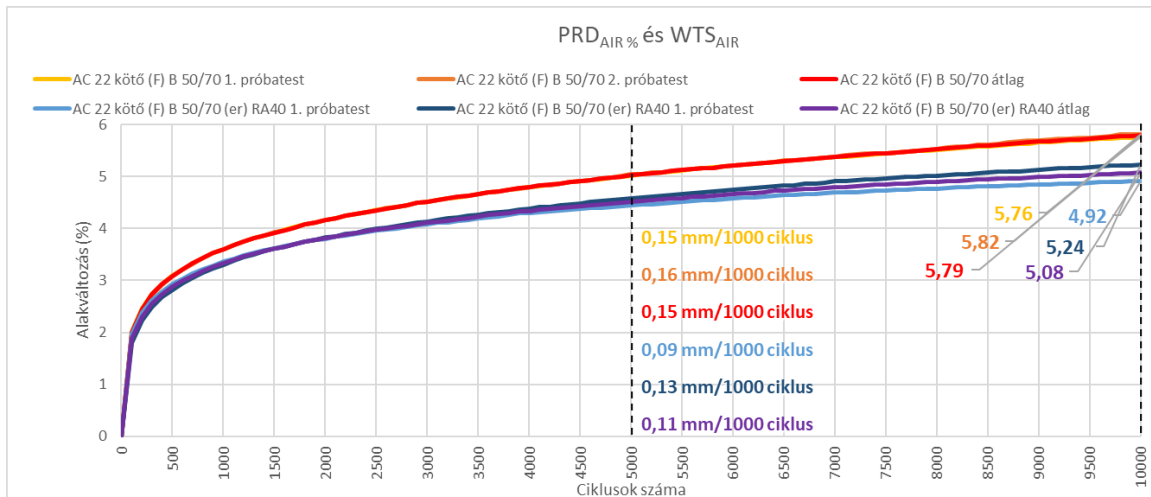
8. táblázat. A referencia keverék és a 40 % visszanyert aszfalt tartalmú keverék vízérzékenységének meghatározása.

Minta megnevezése	AC 22 kötő (F) B 50/70	AC 22 kötő (F) B 50/70 (er) RA40
Vizsgálati hőmérséklet [°C]	25	25
ITSR [%]	84,3	85,5

### 4.4. MARADÓ ALAKVÁLTOZÁSSAL SZEMBENI ELLENÁLLÁS BEMUTATÁSA

Az AC 22 kötő (F) jelzetű aszfaltkeverékek egyik fontos követelménye a maradó alakváltozási ellenállás, előírás szerinti felső határértéke  $\text{PRD}_{\text{AIR}} = 7\%$ . A készített keverékek esetén 2-2 mintán végeztük el a vizsgálatot 10 000 terhelési cikluson keresztül az *MSZ EN 12697-22* szabványnak megfelelően, kiskerekes berendezéssel. A 2. ábra a levegőn vizsgált anyagoknak a mérő program által meghatározott fajlagos nyommélységét, valamint azok átlagait mutatja adott terhelési ciklusban. A visszanyert aszfalt tartalmú keverék jobb maradó alakváltozási hajlamot mutat ( $\text{PRD}_{\text{AIR}}$ , átlag = 5,08%), mint a referencia keverék ( $\text{PRD}_{\text{AIR}}$ , átlag = 5,79%), ám a kettő közötti eltérés viszonylag kisméretű. A kapott adatok alapján a  $\text{WTS}_{\text{AIR}}$  értékeket megvizsgálva elmondható (2. ábra), hogy a keréknyomképződési görbe hajlásszöge (vagyis a terhelt kerék ismételt áthaladása alatti nyommélység növekedés átlaga 1000 terhelési cikluson levegőn vizsgálva) az RA tartalmú keverék esetén kisebb (átlagban 0,11 mm/1000 ciklus), mint a referencia keverék esetén (átlagban 0,15 mm/1000 ciklus).

A két keverék plasztikus deformációs hajlama közötti különbségek kismértékűek, a vizsgált tulajdonság szempontjából közel azonosnak mondhatóak. A mérések azt mutatják, hogy a 40 % visszanyert aszfalt felhasználása esetén jól megválasztott hozzáadott bitumennel a referencia keverékkel egyenértékű keveréket sikerült tervezni.



2. ábra. Plasztikus deformációs hajlam vizsgálata kiskerekű berendezéssel levegőn AC 22 kötő (F) B 50/70 és AC 22 kötő (F) B 50/70 (er) RA40 aszfaltkeverékek esetén.

#### 4.5. MEREVSÉG BEMUTATÁSA

A keverékek laboratóriumi jellemzése során hasító-húzó vizsgálatot végeztünk henger alakú aszfalt próbatesteken (IT-CY) az MSZ EN 12697-26 szabványban leírtaknak megfelelően.

A merevségi modulus függ a kötőanyag tartalomtól, annak tulajdonságaitól, a fázisos összetételtől, hézagtartalomtól. A referencia keverék merevségi modulus értéke 4810 MPa, míg a visszanyert aszfaltot tartalmazó 5805 MPa (9. táblázat). A visszanyert aszfaltban lévő bitumen merevebb, magasabb lágyuláspontú, mint a referencia keverékben használt B 50/70-es bitumen, ami magyarázhatja a kis mértékű eltérést a merevségi modulusok között. Az eredmények alapján megállapítható továbbá, hogy a 40 % RA tartalmú keverék készítésekor felhasznált B 70/100-as bitumen lágyító hatása megmutatkozott, közepes hőmérsékletű tartományban az RA-s keverék merevsége kis mértékben magasabbnak adódott, mint a referencia keverék.

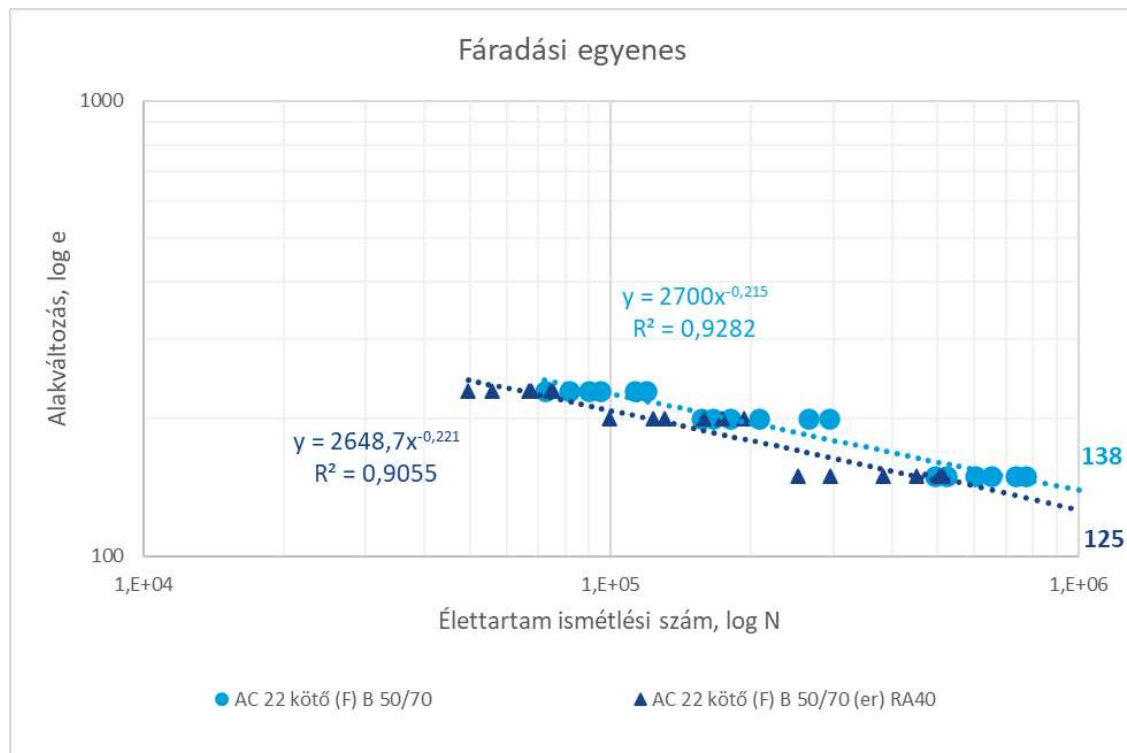
Az eddig bemutatott vizsgálati eredmények alapján elmondható, hogy a két keverék hézagtartalma azonos, a laborkeverések elvégzése, valamint a próbatestek készítése is azonos körülmények között történt, így a merevségi modulus közötti kis mértékű különbséget a kötőanyagok közötti eltérés és a mérési bizonytalanság is okozhatta.

9. táblázat. A referencia keverék és a 40 % visszanyert aszfalt tartalmú keverék hasító-húzó vizsgálat során kapott merevségi modulus értékei.

Vizsgálati jellemzők	AC 22 kötő (F) B 50/70	AC 22 kötő (F) B 50/70 (er) RA40
Terhelés-felület faktor	0,66	0,66
Vízszintes deformáció [µm]	5,95	5,95
Felfutási idő [ms]	125	125
Mért merevség [MPa]	4645	5567
Merevségi modulus [MPa]	4810	5805

#### 4.6. FÁRADÁSI ELLENÁLLÁS BEMUTATÁSA

Az elkészített, AC 22 kötő (F) B 50/70 és AC 22 kötő (F) B 50/70 (er) RA 40 jelű keverékek fáradási ellenállását az *MSZ EN 12697-24* szabványban leírtak szerint négyponthoz tartozó hajlítóvizsgálattal határoztuk meg hasáb alakú próbatesteken. A kapott eredmények kiértékeléséhez készített fáradási egyeneseket a 3. ábra mutatja. Megállapítható, hogy a két egyenes hasonló lefutású, a  $10^6$  ciklushoz tartozó alakváltozás értékek (138  $\mu$ strain és 125  $\mu$ strain) pedig közelítőleg egyeznek, vagyis az előállított keverékek fáradási ellenállásukat tekintve közel azonosnak tekinthetők. A fáradási ellenállásra a vonatkozó útügyi műszaki előírás nem ad meg határértéket, mégis a tapasztalatok alapján elmondható, hogy AC 22 kötő (F) jelzetű keverékekre a 100-150  $\mu$ strain közötti  $10^6$  ciklushoz tartozó fajlagos megnyúlás érték a jellemző, ami arra enged következtetni, hogy az elkészített keverékek fáradási ellenállása megfelelő.



3. ábra. A referencia keverék és a 40 % visszanyert aszfalt tartalmú keverék fáradási egyenese a négyponthoz tartozó hajlítóvizsgálat eredményeiből meghatározva.

## 5. ÖSSZEFOGLALÁS

Az itt bemutatott kutatás középpontjában a korábbi évek gyakorlatát meghaladó mennyiségű visszanyert aszfaltot tartalmazó aszfaltkeverékek tervezése, valamint ezek keverése és tulajdonságainak referencia keverékkel történő összehasonlítása áll.

A tervezés folyamán a visszanyert aszfalt kőanyagának szemmegoszlás meghatározása mellett az abban található bitumen vizsgálatát is el kell végezni. Ez utóbbit figyelembe véve kell eldönteni, hogy a keveréket milyen kategóriájú útépitési bitumennel kell elkészíteni ahhoz, hogy az új aszfaltkeverékben lévő kevert bitumen megfeleljen az adott aszfaltkeverék típusához felhasználható friss bitumen követelményeinek. Kutatásunk során megállapítottuk, hogy kellően pontos alapanyagvizsgálat esetén a készítendő új aszfaltkeverék tulajdonságait megbízhatóan jellemezhetjük az *MSZ EN 13180-1* szabványban foglalt számításokkal, melyek alapján eldönthetjük, hogy milyen keménységű bitumen használandó a keverékben.

Az itt ismertetett kutatásban egy magas %-ban visszanyert aszfaltot tartalmazó és egy referencia keverék tulajdonságait vizsgáltuk (AC 22 kötő (F) B 50/70 (er) RA 40 és AC 22 kötő (F) B 50/70). Az eredményeket a következőkben összegezzük:

- Mindkét keverék szemmegoszlása megfelel az AC 22 kötő (F) típusú aszfaltkeverékek az *e-UT 05.02.11* előírásban foglaltak szerinti követelményeinek. Nem okozott problémát az, hogy a kőanyag jelentős része visszanyert aszfaltból származik: a frakciók homogénnek bizonyultak, így a keverékterveknek megfelelő aszfaltkeverékek voltak előállíthatóak.
- A vizsgált keverékek testsűrűsége, hézagmentes testsűrűsége és szabadhézag-tartalma között elhanyagolható mértékű különbségek mérhetőek, és teljesítik a hézagjellemzők felé támasztott követelményeket.
- A vízérzékenység vizsgálat alapján elmondható, hogy az ásványi anyag és az aszfalt kötőanyag közötti tapadás nem csak a referencia keverék, hanem a 40 % visszanyert aszfaltot tartalmazó keverék esetén is megfelelő. Az ITSR érték ugyanolyan jónak és megfelelőnek mondható mindkét keveréktípusnál.
- A maradó alakváltozási hajlamok között csak kisméretű különbség figyelhető meg. A vizsgált tulajdonságok ( $PRD_{AIR}$ ,  $WTS_{AIR}$ ) szempontjából közel azonos a két keverék, a 40 % visszanyert aszfalt felhasználása csak csekély mértékben befolyásolja az aszfalt maradó alakváltozási hajlamát.
- A két keverék merevsége már nem tekinthető teljesen azonosnak, közöttük kb. 1000 MPa eltérés mérhető 20 °C-on. Ez alapján megállapítható, hogy a B 70/100-as bitumen a visszanyert aszfalt bitumenjének merevségét kompenzálja, azonban ez a lágyuláspont változásának mértékével nem feltétlenül arányos.
- A 40 % visszanyert aszfalt tartalmú keverék fáradási ellenállása azonosnak tekinthető a referencia keverék fáradási ellenállásával, a két keverék fáradási egyenese hasonló lefutású.

A vizsgálatok alapján megállapítható, hogy az előregedett útépítési bitumen teljesítményét lehetséges egy lágyabb útépítési bitumennel kompenzálni, mivel a visszanyert aszfalttal készült keverék teljesítményét tekintve az elvégzett vizsgálatok során nem mutatkozott szignifikánsan alacsonyabbnak, mint a visszanyert aszfaltot nem tartalmazó referencia keverék. Az eredmények alátámasztják, hogy a megfelelő előkészítés és feldolgozás lehetővé teszi a visszanyert aszfalt felhasználását aszfaltkeverékekben az eddigi gyakorlatot meghaladó mennyiségben is.

## 6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A 2020-1.1.2-PIACI-KFI-2020-00060 számú projekt az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2020-1.1.2-PIACI KFI pályázati program finanszírozásában valósult meg.

A kutatás a Hódmezővásárhelyi Útépítő Kft. központi laboratóriumában valósult meg, a szükséges alapanyagokat a Hódút Freeway Kft. biztosította.

## 7. IRODALOMJEGYZÉK

[1]: Milad, A., M. A. Taib, Ahmeda, A., M. Solla, N. & I. Md. Yusoff. 2020: A Review of the Use of Reclaimed Asphalt Pavement for Road Paving Applications, *Jurnal Teknologi*, (pp. 36-37), <https://doi.org/10.11113/jt.v82.14320>.

[2]: HAPA. 2014: Visszanyert aszfalt felhasználása aszfaltkeverékekben, A Magyar Aszfaltipari Egyesülés (HAPA) Környezetvédelmi Munkacsoportja.

[3]: EAPA (European Asphalt Pavement Association). 2018: Recommendations for the use of rejuvenators in hot and warm asphalt production.

[4]: NAPA (National Asphalt Pavement Association). 1996: Recycling Hot Mix Asphalt Pavements, Information Series 123.

[5]: Visnyovszky, Á. 2016: Benninghoven: Törtaszfalt visszaadagoló rendszerek, *Az Aszfalt XX. évfolyam*.

[6]: EAPA (European Asphalt Pavement Association): Asphalt in figures 2020.

[7]: Somogyvári, L. 2021: Visszanyert aszfalt keverőtelepi újrahasznosítása hideg eljárással, Az Aszfalt XXVIII. évfolyam, pp.:50-51.