

Magyarország földradar- (GPR) alkalmazhatósági térképe, fizikai és talajtani paraméterek alapján

NÁDASI E.^{1,®}, DOBOS E.², PECSMÁNY P.², TURAI E.¹

¹Miskolci Egyetem, Geofizikai és Térinformatikai Intézet, 3515 Miskolc-Egyetemváros

²Miskolci Egyetem, Földrajz-Geoinformatika Intézet, 3515 Miskolc-Egyetemváros

®E-mail: gfne@uni-miskolc.hu

A földradar- (GPR – Ground Penetrating Radar) mérések hatékonysága erősen függ a talaj fajlagos vezetőképességétől. A nagy fajlagos vezetőképességű talajokban gyorsan csillapodik a radarhullámok energiája, ami korlátozza az elérhető behatolási mélységet, és ezáltal határt szab a GPR-mérések használhatóságának. Magyarország földradar-alkalmazhatósági térképét készítettük el, melyen öt osztály került elkülönítésre. Az I-es osztály a legalkalmasabb, míg az V-ös osztály az alkalmatlan talajokat tartalmazza. A kategóriákat az 1:100 000-es méretarányú agrotopográfiai adatbázis alapján alakítottuk ki. A fajlagos vezetőképesség mellett textúra-, kémhatás- (pH-) és talajtípus-információkat használtunk fel az alkalmazhatósági térkép elkészítéséhez. Bár Magyarországon megtalálhatók a GPR-mérések alkalmazhatósága szempontjából „jó” (I-es) természetes talajtakarók, többségében közepes (III-as) vagy annál rosszabb területek jellemzőek. Az alkalmazhatóság mértéke időben nem tekinthető állandónak, hiszen a fajlagos vezetőképesség és az ezt kialakító paraméterek dinamikusan változnak, függenek az aktuális évszaktól és az időjárástól is. Viszont a relatív alkalmazhatósági skála létrehozása külföldi példák alapján is megalapozott. A bemutatott térkép támpontot nyújthat a Magyarországon GPR-méréseket tervező szakemberek számára.

Nádasi, E., Dobos, E., Pecsmany, P., Turai, E.: Ground Penetrating Radar (GPR) soil suitability map of Hungary based on physical and pedological parameters

The efficiency of Ground Penetrating Radar (GPR) measurements strongly depends on the soil conductivity. The energy of the radar waves attenuates quickly in high conductive soils which limits the achievable penetration depth and the applicability of GPR measurements. The soil suitability map of Hungary has been created which differentiates five classes. Class I contains the most suitable, class V contains the unsuitable soils. The categories have been created based on the biggest soil database, the 1:100 000 scale agrotopographical database of Hungary. Besides conductivity, soil texture, pH and soil type information have been used to prepare the suitability map. However, the “good” (I) natural soils can be found in Hungary in terms of GPR applicability, mostly moderate (III) or worse areas are frequent. The suitability cannot be considered as constant in time, because conductivity and the connecting parameters change dynamically and depend on the current season and weather. But the relative suitability scale is well-founded based on international examples. The presented map can be a reference for professionals who design their GPR projects in Hungary.

Beérkezett: 2021. január 20.; *elfogadva:* 2021. február 24.

Bevezetés

A földradar (GPR – Ground Penetrating Radar), illetve a magyar műszaki gyakorlatban gyakran talajradarnak is nevezett eljárás egy aktív gerjesztésű elektromágneses geofizikai kutatómódszer. A sekély mélységű kutatásokban használható eredményesen, hiszen az antennából kibocsátott hullámok a vizsgált közegbe (talaj, kőzet, beton stb.)

érve viszonylag gyorsan csillapodnak. Az alkalmazott frekvenciatartomány a kutatási céltól függően tág, mintegy 10 MHz és 2 GHz között mozog. Nagy előnye a roncsolásmentesség és a gyors képalkotás. Mára az üregkutatástól (Lyu et al. 2020) a mérnöki létesítmények vizsgálatán át (Pajewski et al. 2013) a régészeti kutatásokig (Trinks et al. 2012) számos területen nyert alkalmazást. Jelen tanulmány a természetes talajtakarón elvégezni kívánt GPR-

mérések tervezéséhez nyújt támpontot a hazai szakemberek számára.

A földradar (GPR) módszer hatékonysága nagymértékben területspecifikus, és a talaj fizikai paramétereitől függ. A mérést végző szakember egyik legfontosabb kérdése a felhasználást megelőzően, hogy az adott területen mennyire alkalmazható sikerrel az eljárás. Vagyis, hogy elérhető-e a kívánt kutatási mélység és felbontóképesség. Ezek mellett persze a megfelelő kontrasztra is szükség van a kimutatni kívánt objektum és a háttér között. A behatolási mélységet és a felbontóképességet a frekvencián kívül a vezetőképesség, a relatív permittivitás és a relatív mágneses permeabilitás határozzák meg, tehát az „alkalmasságot” ez a három fizikai paraméter alakítja ki. Ezek persze gyakran tág határok között mozognak, és összetett kapcsolatban állnak a talaj ásványi összetételével, nedvességtartalmával, az agyagtartalommal, a pH-val, a hőmérséklettel stb. Tovább árnyalja a képet, hogy beszélhetünk statikus és dinamikus talajtani paramétereikről is. Utóbbiak időben változnak, tehát ilyen módon az „alkalmasság” sem állandó időben.

Az Amerikai Egyesült Államok területére létezik ún. GPR talajalkalmassági térkép (GPR Soil Suitability Map), melyet időről időre felülvizsgálják és finomítanak (Doolittle et al. 2002, 2003, 2006, 2007, 2010). Ehhez hasonló térképi állományt mutat be jelen tanulmány Magyarország területére. Az alkalmassági osztályok kialakítása a helyi talajtani adottságok figyelembevételével, valamint a rendelkezésre álló adatok és információk alapján történt.

Természetesen a bemutatott térkép akkor alkalmazható, ha a tervezett GPR-mérések célpontja az eredeti talajtakaró alatt található. Tehát amennyiben nem mesterséges fel-

töltésről, gátról, út- és vasúti töltésről vagy egyéb épített struktúráról van szó.

Fizikai alapok

A földradar módszer alapösszefüggései az elektromágneses (EM) hullámelméletben ismert Maxwell-egyenletekből vezethetők le. A radarhullámok diffúzióval terjednek a szilárd közegben, így a talajban is. Itt energiájuk és amplitúdójuk exponenciálisan csillapodik, ennek mértéke a csillapodási tényező (a) segítségével adható meg:

$$a = \left\{ \frac{\mu\epsilon}{2} \left[\left(1 + \frac{\sigma^2}{\epsilon^2 \omega^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \right\}^{1/2}, \quad (1)$$

ahol

a – a csillapodási tényező,

ω – a körfrekvencia,

μ – a mágneses permeabilitás,

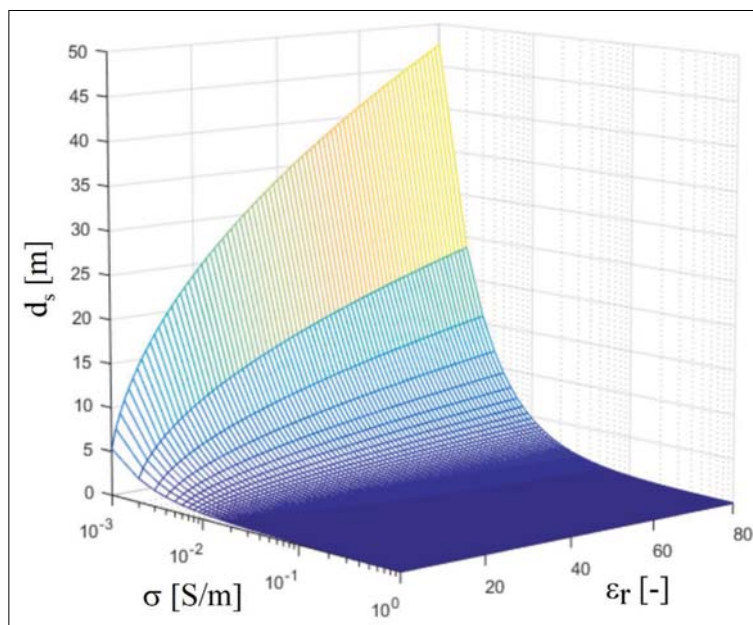
ϵ – a permittivitás (v. dielektromos állandó),

σ – a fajlagos vezetőképesség.

A hullámok behatolási mélységét jellemezhetjük a szkinmélység (d_s) segítségével, mely a csillapodási tényező reciprokával egyezik meg. Definíció szerint azt a mélységet jelenti, amelynél az EM hullám energiája a felszíni értékéhez képest e -ad részére csökken

$$d_s = 1/a. \quad (2)$$

A fajlagos vezetőképesség növekedésével a szkinmélység jelentősen csökken. A relatív dielektromos állandó nö-



1. ábra A szkinmélység (d_s) változása a fajlagos vezetőképesség (σ) és a relatív dielektromos állandó (ϵ_r) függvényében, 100 MHz antennafrekvencia mellett

Figure 1 The change of skin depth (d_s) as a function of conductivity (σ) and relative dielectric constant (ϵ_r), in case of 100 MHz antenna frequency

vekedésével, állandó fajlagos vezetőképesség mellett, nő a szkinmélység. E két paraméter behatolási mélységre gyakorolt hatását mutatja be az 1. ábra, 100 MHz frekvencia esetére. A szkinmélység EM paramétereiktől való függését Nádasi és Turai (2018) mutatja be részletesen.

Egy hullám visszaverődésének mértéke, egyúttal a beérkező jel amplitúdója a reflexiók együttható (R) nagyságával arányos. A reflexiók együtthatót az impedanciakontraszt befolyásolja, amely szintén a három elektromágneses közfizikai paramétertől, elsősorban a dielektromos állandótól függ.

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{(\omega\mu_2/k_2) - (\omega\mu_1/k_1)}{(\omega\mu_2/k_2) + (\omega\mu_1/k_1)} \quad (3)$$

$$\approx \frac{\sqrt{\varepsilon_{r1}} - \sqrt{\varepsilon_{r2}}}{\sqrt{\varepsilon_{r1}} + \sqrt{\varepsilon_{r2}}},$$

ahol

R – a reflexiók együttható,

Z_1 – az első közeg impedanciája,

Z_2 – a második közeg impedanciája,

μ_1 – az első közeg mágneses permeabilitása,

μ_2 – a második közeg mágneses permeabilitása,

k_1 – az első közeg hullámszáma,

k_2 – a második közeg hullámszáma,

ε_{r1} – az első közeg relatív dielektromos állandója,

ε_{r2} – a második közeg relatív dielektromos állandója.

A fajlagos vezetőképesség (illetve annak reciproka, a fajlagos ellenállás) kulcsszerepet játszik a földradarméréseknél. Minél nagyobb a fajlagos vezetőképesség egy adott közegben, annál gyorsabban csillapodnak és abszorbeálódnak az EM hullámok. A talajok fajlagos ellenállása tág határok között, néhány Ωm -tól több száz Ωm -ig változhat, több nagyságrendet is lefedve. A talaj ásványi összetételén túl elsősorban a porozitás, a nedvességtartalom, a sótartalom, az agyagtartalom, de a hőmérséklet és a pH is befolyásolja. A hullámok behatolási mélységére és ezáltal a GPR használhatóságára leginkább a fajlagos vezetőképesség van hatással.

A permittivitás (dielektromos állandó) szintén kritikus paraméter a földradarméréseknél, mivel nagymértékben befolyásolja a hullámok terjedési sebességét, a reflexiók együtthatókat, valamint hatással van a felbontóképességre is. Elsősorban az ásványi összetétel, a porozitás, a nedvesség és a sótartalom függvénye. Utóbbi kettőt az ásványi és szerves kolloidok mennyisége is befolyásolja. Komplex mennyiségről van szó, mely az elektromos télerősségvektor és az elektromos eltolásvektor közötti kapcsolatot írja le, és a közeg jellemzőitől függ. Valós része a relatív dielektromos állandó, mely egy anyag elektromos télerősségtárolási kapacitását adja meg a vákuumhoz viszonyítva. A képzetes rész a csillapodást és az abszorpciót fejezi ki, a veszteségekkel kapcsolatos (Martinez, Byrnes 2001). A vákuum permittivitása $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m. A levegő relatív dielektromos állandója egy ($\varepsilon_{r, \text{levegő}} = 1$), a legtöbb ásványé kisebb mint húsz ($\varepsilon_{r, \text{ásvány}} < 20$), a vízé nyolcvan ($\varepsilon_{r, \text{víz}} \sim 80$).

A gyakoribb ásványok közül néhány szulfid (galenit, pirrotin), a montmorillonit és a grafit rendelkezik 80-nál nagyobb relatív dielektromos állandóval (Olhoft 1989). A talajok relatív dielektromos állandója 1 és 80 közé esik, és leginkább a nedvességtartalomtól függ. A dielektromos állandó kevésbé mozog tág határok között, mint a fajlagos ellenállás.

A mágneses permeabilitás, mely a mágneses indukció és a mágneses télerősséget összekapcsoló arányossági tényező, nem befolyásolja jelentősen a radarhullámok terjedését, amennyiben a közeg nem ferromágneses anyag. A vákuum abszolút mágneses permeabilitása $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am. A földradarmérések során jellemző közegek relatív mágneses permeabilitása többnyire 1-hez közeli ($\mu_r = 1$), vasbeton szerkezeteknél emelkedik meg ez az érték jelentősen. Talajok esetében a permeabilitás megváltozása nem jellemző, ez alól bizonyos gyevasércek lehetnek kivételek.

A GPR gyakorlatában gyakran dielektrikumként kezelik a vizsgált közeget, és ennek alapján becsülnek bizonyos paramétereket (hullámterjedési sebesség, felbontóképesség, behatolási mélység stb.). A talajok esetében azonban nem célszerű ezt a közelítést használni, hanem a veszteséges közeg általános formuláival ajánlott végezni a becsléseket. Így elkerülhető az egyébként jelentős mértékű becslési hiba (Nádasi, Turai 2017, 2018) megjelenése.

Módszertan

Az Amerikai Egyesült Államok területére kidolgozott (NRCS – Natural Resources Conversation Service, USDA – United States Department of Agriculture) módszertan hat csoportot alakított ki a megfelelőségi index (SI – Suitability Index) alapján. A gyakorlatilag kontinens méretű ország hazánkhoz képest rendkívüli változatosságot mutat a talajok terén. Ez persze a jóval nagyobb kiterjedésnek és ezzel összefüggésben a változatos földtani, éghajlati, domborzati viszonyoknak köszönhető.

Az amerikai módszer az SI-index alapján kategorizál, melyek különböző attribútumindex-értékek (AIV – Attribute Index Value) összegzésével állnak elő. Az alacsonyabb attribútumindex-értékek kisebb mértékű jelcsillapodást és nagyobb várható behatolási mélységet jeleznek előre. Az SI számítása a textúra, agyagtartalom, agyagfelhalmozódási szint jelenléte, agyagásványok típusa, pH és a kilúgozottság, a sótartalom és a Ca-karbonát- vagy Ca-szulfát-tartalom alapján történik. Az agyagtartalomra 1-től 5-ig változnak az attribútumindex-értékek. 10% alatti agyagtartalom esetén AIV = 1, 10–18% esetén AIV = 2, 18–35% között AIV = 3, 35–60% között AIV = 4, 60% feletti AIV = 5 (Doolittle 2007). A felszíntől szikes talajoknak 6-os értéket adtak. Ez az 1–6-ig terjedő skála a többi paraméterhez rendelt pozitív vagy negatív előjelű korrekciós értékkel tovább módosul az 1. táblázat alapján. Az attribútumindexekhez hasonlóan az SI-érték is annál alacsonyabb, minél megfelelőbbek a talaj tulajdonságai a földradarmérések kivitelezéséhez.

I. táblázat | Módosító talajtényezők és a hozzájuk rendelt korrekciós érték (Doolittle et al. 2010)
Table 1 | Modifying soil factors and the assigned correction value (Doolittle et al. 2010)

Talajparaméter	Korrekciós érték
Kandic- vagy Oxicszint jelenléte (erősen mállott, kilúgozott szintek)	-1
Savanyú tőzeganyag jelenléte	1
Lúgos tőzeganyag jelenléte	2
50 cm alatt szikesedés	1
Magas mész- vagy gipsztartalom 1 méteren belül	1
Egyszerre meszes és szikes 0,5–1 méter mélységben	1

Első közelítésben Magyarország területére is egy ehhez hasonló relatív alkalmassági besorolást hoztunk létre. A földradarmérések hatékonyságát a közeg növekvő fajlagos vezetőképessége korlátozza, így egyértelműen ez a kulcsparaméter az alkalmassági osztályok kialakításánál. A fajlagos vezetőképességet növeli a növekvő agyagtartalom, nedvességtartalom és oldott ionkoncentráció is. Fontos tényező a kilúgozottság mértéke, amely meghatározza az oldott ion koncentrációját és együtt változik a kémhatással. E változók ismeretében hozhatók létre a GPR-alkalmassági osztályok.

Magyarország GPR-alkalmassági térképének megalkotásánál Doolittle et al. (2010) módszertanát alkalmaztuk, adaptálva a magyarországi viszonyokra és az adatbázisokban elérhető információra. Az alkalmasságot magyarországi viszonyok között a vízmegkötést befolyásoló agyagtartalom és agyagásvány-összetétel, a vezetőképességet erősen befolyásoló só-, mész- és gipsztartalom, illetve a kilúgozottság mértéke határozza meg. Ez utóbbi információk részben a talajtípusból, részben a talajok kémhatásából vezethetők le. A GPR-alkalmassági térképet az AGROTOPO talajtani adatbázis (Várallyay et al. 1980) felhasználásával készítettük el.

Módszertanunk a talajok fizikai féleségéből indult ki, hiszen ez a tényező alapvetően befolyásolja az alkalmazhatóságot. Doolittle (2007) módszertana alapján az agyagtartalom szerint 1-től 5-ig csoportosítottuk a textúrát. Az így kapott alapskála a relatív fajlagos ellenállás csoportosításának felel meg, ahol az 1-es osztály (homok) a legnagyobb, míg az 5-ös (agyag) a legkisebb fajlagos ellenállással rendelkezik (2. táblázat). A fizikai féleség esetében a „tőzeg és kotu”, valamint a „nem vagy részben mállott kőzetek” csoportot nem vettük figyelembe, ezeket a végleges térképen is külön kategóriában jelenítettük meg. A lápos területeken a talajok a felszínig vízzel telítettek, így alkalmatlanok GPR-vizsgálatokra. A szilárd kőzeteket fedő törmelék szintén erősen szórja a radarhullámokat, így ezek a felszínnek sem igazán alkalmasak talajradarmérésekre. A szálban álló kőzetek esetén a módszer hasznos adatokat tud szolgáltatni, ez utóbbi közeg jellemzése viszont ebben a munkában nem volt célunk.

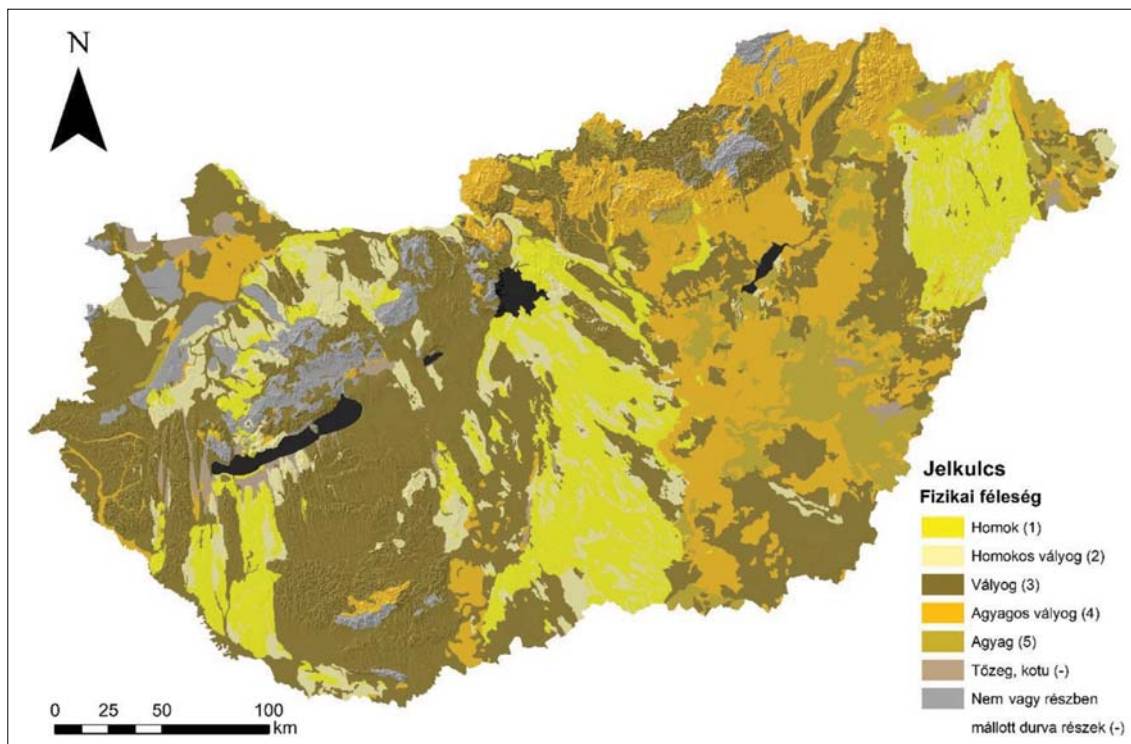
A fizikai féleséget követően a talajokat kémhatásuk és mészállapotuk alapján is osztályokba soroltuk, és alkalmazhatósági értékkel újrakódoltuk ezeket (2. táblázat). Általánosságban elmondható, hogy a savanyú kémhatású, alacsony pH-val rendelkező talajoknak az erős kilúgozás miatt kisebb a vezetőképessége (50–150 dS/m). A gyengén savanyú, illetve semleges kémhatású talajok vezetőképessége 150–200 dS/m, míg az enyhén lúgos (7–8,5 pH) talajok már meszesek, így vezetőképességük is 250–300 dS/m-re emelkedik. 8,5 pH feletti értékeket csak szikes talajok esetén kapunk, ahol a vezetőképesség természetesen emelkedik, 500–600-tól több ezer dS/m vezetőképességet is elérhet. Ezeket szem előtt tartva rendeltünk a kémhatáshoz korrekciós értéket.

Az Agrotopográfiai adatbázisból a textúra (2. ábra), a pH (3. ábra) és a talajtípusok (4. ábra) változóit emeltük ki, ezeket használtuk az alkalmassági térkép elkészítéséhez a 2. táblázatban bemutatott paraméterek alapján. Az első két változó esetén az eredeti osztályokat hagytuk meg és használtuk fel, míg a talajtípusok esetén a talajradar-alkalmazhatósági kritériumok alapján csoportosítottuk az ere-

2. táblázat | A fizikai féleség (FFI), a kémhatás és mészállapot (PHI), valamint a talajtípus- (TTI) indexek összefoglalása, melyek együttesen határozzák meg a földradar-alkalmazhatósági indexet (SI)

Table 2 | Summary of the texture (FFI), pH (PHI) and soil type (TTI) indexes which jointly determine the GPR suitability index (SI)

Fizikai féleség (FFI)		Kémhatás és mészállapot (PHI)		Talajtípus (TTI)	
Név	Index	Érték	Index	Név	Index
Homok	1	<5,5	-1	Homok szövetű fejletlen talajok	0
Homokos vályog	2	5,5–7	0	Közethatású talajok	0
Vályog	3	7–8,5	1	Felszínhez közel agyagfelhalmozódás	1
Agyagos vályog	4	8,5<	2	Erős agyagfelhalmozódás és pangóvíz	2
Agyag	5			Csernozjom talajok	0
				Réti csernozjomok	1
				Szikes talajok	2
				Réti és láptalajok	3

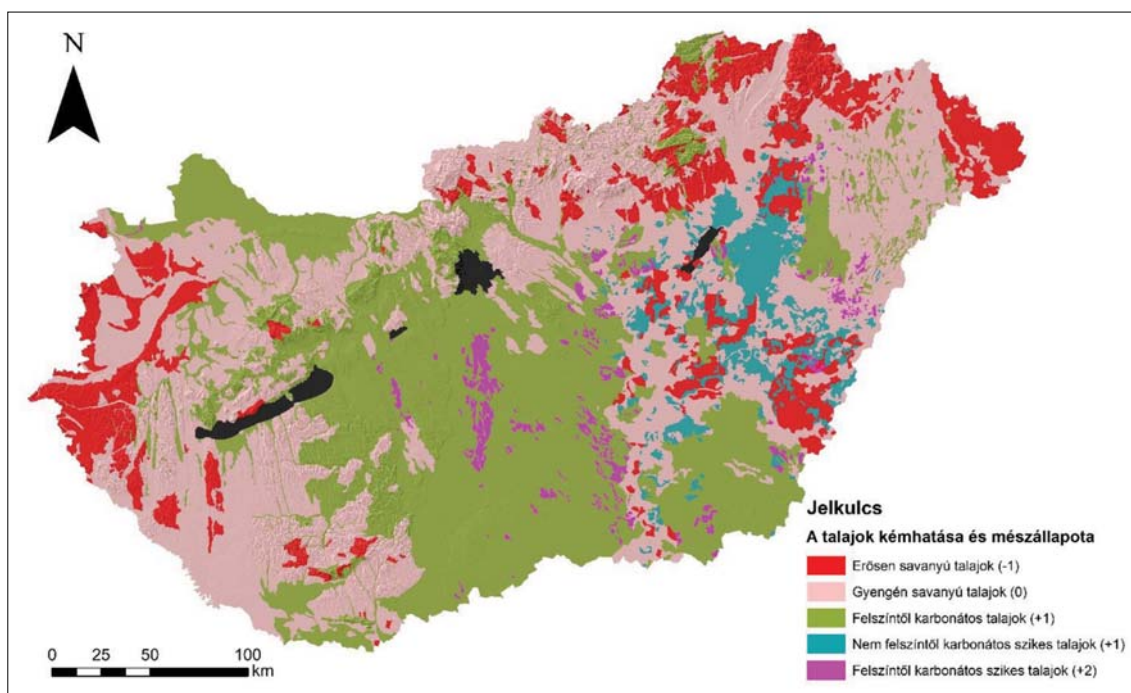


2. ábra | Magyarország talajai fizikai féleség alapján (az 1:100 000-es Agrotopográfiai adatbázis alapján szerkesztve)
 Figure 2 | The soils of Hungary based on texture (edited based on the 1:100 000 agrotopographical database)

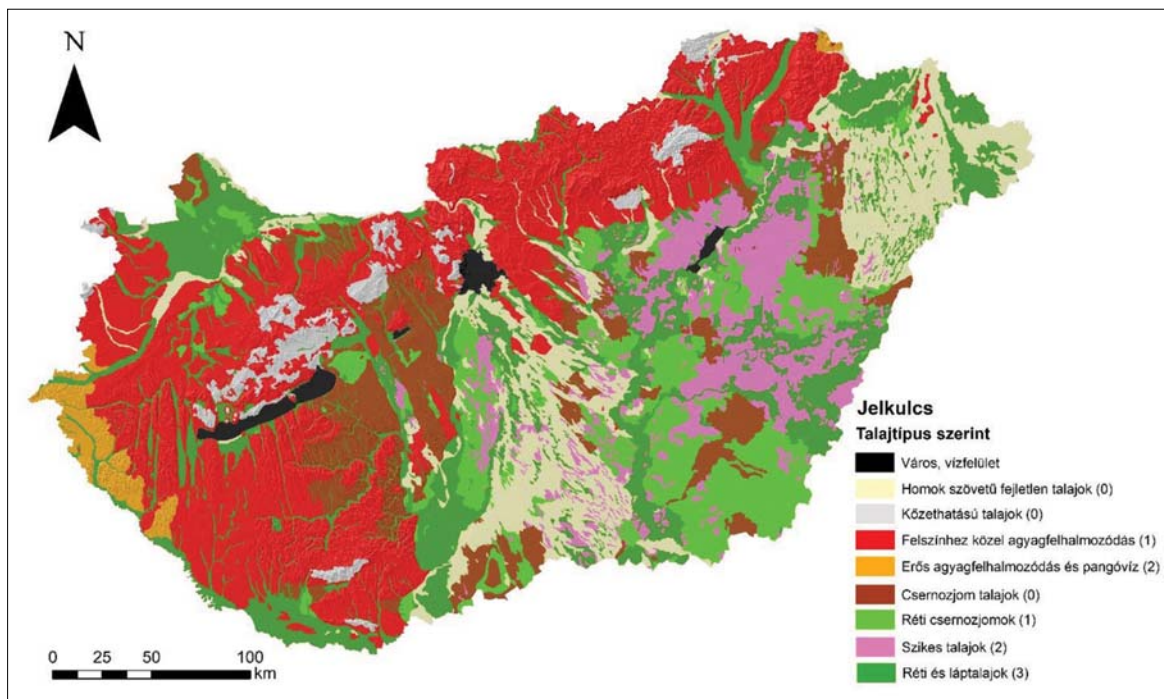
deti típusokat típuscsoportokba. Itt elsősorban a vízhatás meglétét, illetve mélységét, az agyagfelhalmozódási szintek meglétét és kifejezettségét, a szikesedést, a homokos

szövetet és a felszínhez közeli szilárd kőzettel rendelkező talajokat vettük egy csoportba.

A méretarányból fakadóan a térképek csoportjai, foltjai a valóságban nem teljesen homogének, változatosságot



3. ábra | Magyarország talajainak kémhatása és mészállapota (az 1:100 000-es Agrotopográfiai adatbázis alapján szerkesztve)
 Figure 3 | The soils of Hungary based on pH and calcium-carbonate content of the soils of Hungary (edited based on the 1:100 000 agrotopographical database) texture (edited based on the 1:100 000 agrotopographical database)



4. ábra Magyarország egyszerűsített talajtérképe (az 1:100 000-es Agrotopográfiai adatbázis alapján szerkesztve)
 Figure 4 Simplified soil map of Hungary (edited based on the 1:100 000 agrotopographical database)

mutatnak, viszont a csoport neve jól jellemzi az átlagos, illetve az adott területen legnagyobb valószínűséggel megjelenő talajtípust. A földradar-alkalmasság megjelenítéséhez nem tartottuk szükségesnek az ennél részletesebb, finomabb beosztású térképi állományból való kiindulást. A 4. ábrán bemutatott talajtípusok közül a homok szövetű fejletlen talajok és a közethatású talajok rendelkeznek a legnagyobb várható fajlagos ellenállással. Ezek, valamint a csernozjom talajok is 0 indexet kaptak, tehát nem befolyásolják tovább az első két szempont alapján létrejött alkalmassági osztálybesorolást. 1-es talajtípusindex került a felszínközeli agyagfelhalmozódáshoz és a réti csernozjomokhoz, melyeknél növekszik a fajlagos vezetőképesség, ezáltal rontják a GPR-alkalmazhatóságot. Az erős agyagfelhalmozódást mutató és pangóvízes talajok, valamint a szikes talajok 2-es talajtípusindexet kaptak, mivel jelentősen csökkentik az alkalmazhatóságot. 3-as index került a réti és láptalajokhoz, mivel itt a magas talajvízszint nagyon megnehezíti, nagy valószínűséggel alkalmatlanná teszi a GPR-mérések elvégzését.

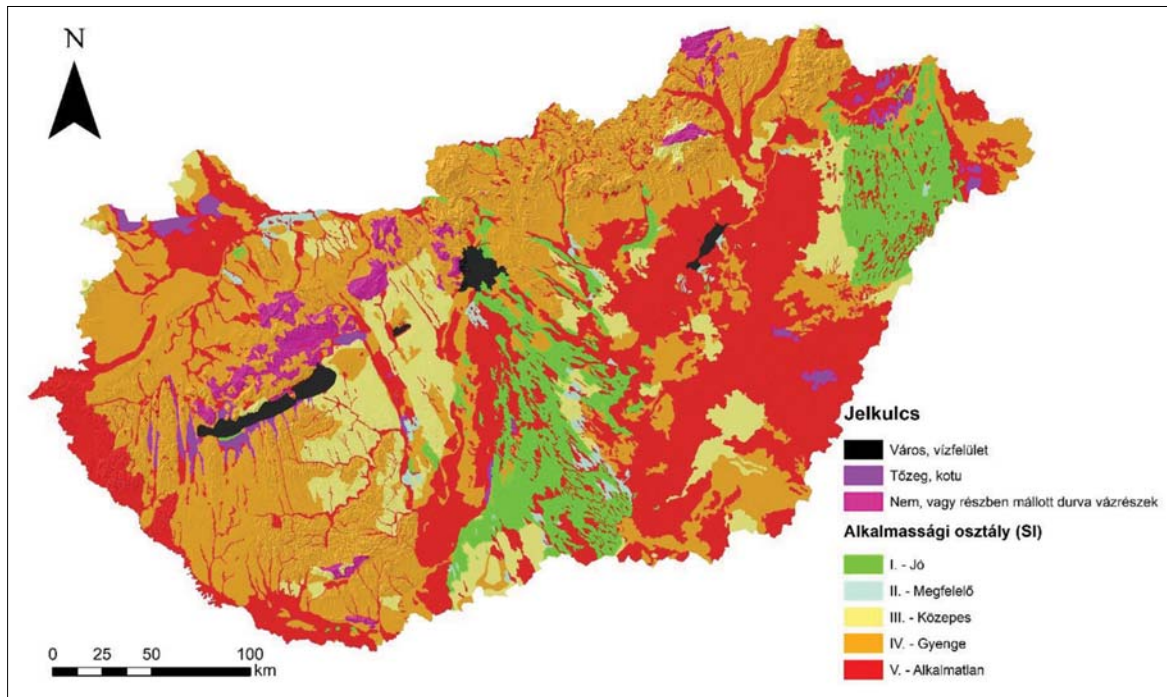
A GPR talajalkalmassági térkép

A földradar-talajalkalmassági osztályokat a fizikai féleség index (FFI), a kémhatás és mészállapot index (PHI) és a talajtípusindex (TTI) összegzésével kaptuk meg. Az így kialakult skála elméletileg 0-tól 10-ig terjedő lehet. A 0 vagy 1 skála értékeket az I-es osztályba, az 5, vagy a feletti összegeket az V-ös osztályba soroltuk a 3. táblázat szerint.

3. táblázat Az alkalmassági index (SI) és az alapindexek (FFI, PHI, TTI) kapcsolata
 Table 3 The connection between the suitability index (SI) and the basic indexes (FFI, PHI, TTI)

FFI+PHI+TTI	Alkalmassági index (SI)
0	I – Jó
1	
2	II – Megfelelő
3	III – Közepes
4	IV – Gyenge
5	V – Alkalmatlan
6	
7	
8	
9	
10	

Közép-Európa, így hazánk is változatos tájegységekkel, ezzel együtt különféle talajtípusokkal rendelkezik. A talajképző kőzet az ország legnagyobb részén folyóvízi üledék, lösz, áthalmazott lösz. Az alkalmassági térképen (5. ábra) látható, hogy hazánkban többségben vannak a földradar-mérésekre közepesen vagy kevésbé alkalmas területek. Jó területeknek számítanak azonban a Duna-Tisza köze, illetve a Nyírség homok szövetű taljai. Az Alföld közel felét finom szövetű, agyagos vályog, agyag textúrájú alluviális üledékek fedik, melyek az esetek jelentős részében mélyfekvésűek, magas kapilláris vízemeléssel jellemez-



5. ábra Magyarország földradar- (GPR) talajalkalmassági térképe. Öt alkalmassági osztályt (I-V) különítünk el az alábbiak szerint: I – Jó; II – Megfelelő; III – Közepes; IV – Gyenge; V – Alkalmatlan. A városok területei, a vízfelületek és a műtárgyak nem kerültek besorolásra egyik osztályba sem

Figure 5 Ground penetrating radar soil suitability map of Hungary. Five suitability classes are distinguished: I – Good; II – Appropriate; III – Moderate; IV – Weak; V – Unsuitable. The areas of cities, lakes are not classified

hetők, így nemcsak a magasabb agyagtartalom, de a felszínhez közeli víz is jelentősen csökkenti a talajradar-alkalmazhatóságot. A hátságok löszfelszínei, illetve a rajtuk képződött csernozjom talajok közepesnek értékelhetőek. A nyugati országrészre hullott löszök sokkal intenzívebb málláson mentek keresztül, ezeken agyagbemosódásos barna erdőtalajok képződtek. Az agyagfelhalmozódási szint átlagosan 20–30 cm-től 1 méteres mélységig terjed. Ez a vastag agyagos szint – ami általában nedvesebb a magasabb csapadék miatt – erősen korlátozza a radarhullámok behatolását. A vulkáni (pl. Börzsöny, Mátra) és karsztos mészkőhegységi területek (pl. Bükk, Budai-hegység, Mecsek) is kutatásra alkalmasak lehetnek, amennyiben a kőzet a felszínhez közel van, és nem alakultak ki agyagos szintek a felszínen. Ebből a szempontból a savanyú kőzetek kedvezőbbek, mert a bázikus szilikátos kőzetek mállása sok agyagot eredményez. A savanyú kőzetek fajlagos ellenállás szempontjából kiválóak is lehetnek, viszont figyelembe kell vennünk ezek heterogenitását, töredezettségét, különböző mállottsági fokát.

Összefoglalás

A földradar (GPR) módszer fizikai törvényszerűségeinek ismeretében – az agrotopográfiai talajtani adatbázist felhasználva – megpróbáltunk a valóságot minél jobban leíró GPR-alkalmazhatósági térképet összeállítani Magyarország területére. Az osztályozás módszertanát az Amerikai Egyesült Államok területére készített alkalmassági térkép-

hez kidolgozott rendszer adaptációjával készítettük el a hazai talajtani adottságok és a talajtani adatbázisokból elérhető változók figyelembevételével. Öt alkalmassági osztályt hoztunk létre I-től („Jó”) V-ig („Alkalmatlan”), bizonyos területeket (városok, vízfelületek, tőzeg, kotu és szilárd vagy mállott kőzet fizikai féleséggel rendelkező talajok) nem soroltunk be. Az alkalmassági osztályok meghatározásánál a radarhullámok terjedését gátló tényezőket vettük alapul, elsősorban a víz felszínközeli jelenlétét, az agyagtartalmat, illetve az oldott ionok potenciális mennyiségét a szikesedés és a kémhatás mint jelző faktorok alkalmazásával.

A Magyarországra létrehozott talajalkalmassági térkép (5. ábra) áttekintést kíván nyújtani a földradar (GPR) módszer alkalmazhatóságáról. A kialakított alkalmassági osztályok természetesen tájékoztató jellegűek. Elsődleges célunk a nemzetközileg alkalmazott minősítési rendszer meghonosítása és a módszerfejlesztés elindítása. A módszer, illetve a súlyozó faktorok a későbbiekben tovább finomíthatók, terepi mérésekkel ellenőrizhetők, pontosíthatók.

Az alkalmassági térkép a földradarméréseket végző szakemberek számára nyújthat támpontot az egyes projektek megtervezése során.

Köszönetnyilvánítás

A cikkben/előadásban/tanulmányban ismertetett kutatómunka az EFOP-3.6.1-16-2016-00011 jelű „Fiatalodó és Megújuló Egyetem – Innovatív Tudásváros – a Miskolci Egyetem intelligens sza-

kosodást szolgáló intézményi fejlesztése” projekt részeként – a Széchenyi 2020 keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

A tanulmány szerzői

Nádasi Endre, Dobos Endre, Pecsmány Péter, Turai Endre

Hivatkozások

- Doolittle J. A., Minzenmayer F. E., Waltman S. W., Benham E. C. (2002): Ground-penetrating radar soil suitability map of the conterminous United States. In: 9th International Conference on Ground-Penetrating Radar, Koppenjan S. K., Hua L. (eds.), Proceedings of SPIE 4158, pp. 7–12.
- Doolittle J. A., Minzenmayer F. E., Waltman S. W., Benham E. C. (2003): Ground-penetrating radar soil suitability maps. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 8/2, 49–56
- Doolittle J. A., Minzenmayer F. E., Waltman S. W., Benham E. C., Tuttle J. W., Peaslee S. (2006): State ground-penetrating radar soil suitability maps. In: Proceedings of the 11th International Conference on Ground Penetrating Radar, Daniels J. J., Chen C.-C. (eds.), Columbus, Ohio, Paper HYD; 13_mdx, pp. 1–8.
- Doolittle J. A., Minzenmayer F. E., Waltman S. W., Benham E. C., Tuttle J. W., Peaslee S. (2007): Ground-penetrating radar soil suitability map of the conterminous United States. *Geoderma*, 141/3–4, 416–421
- Doolittle J. A., Dobos R., Waltman S. (2010): Revised ground-penetrating radar soil suitability maps. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 15/3, 111–118
- Lyu Y., Wang H., Gong J. (2020): GPR detection of tunnel lining cavities and reverse-time migration imaging. *Applied Geophysics*, 17/1, 1–7
- Martinez A., Byrnes A. P. (2001): Modeling dielectric-constant values of geologic materials: An aid to ground-penetrating radar data collection and interpretation. *Current Research in Earth Sciences*, Bulletin 247, Part 1
- Nádasi E., Turai E. (2017): Elektromágneses közefizikai paraméterek vizsgálata georadarmérések esetében. *Magyar Geofizika*, 58 (4), pp. 253–258.
- Nádasi E., Turai E. (2018): Increasing the accuracy of GPR measurements. *Geoscience and Engineering*. A Publication of the University of Miskolc, 6/9, 142–150
- Olhoeft G. R. (1989): Electrical properties of rocks. In: *Physical Properties of Rocks and Minerals*, Y. S. Touloukian, W. R. Judd, and R. F. Roy (eds.): New York, New York, Hemisphere Publishing Corporation, pp. 257–329
- Pajewski L., Dérobert X., Benedetto A., Giannopoulos A. (2013): Applications of ground penetrating radar in civil engineering – COST action TU1208. In: 7th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR 2013)
- Trinks I., Kucera M., Hinterleitner A., Löcker K., Nau E., Neubauer W., Zitz T. (2012): Large-scale, high-definition ground penetrating radar prospection in archaeology. *Geophysical Research Abstracts*, 14, 13447, EGU General Assembly, April 2012.
- Várallyay Gy., Szűcs L., Murányi A., Rajkai K., Zilahy P. (1980): Magyarország termőhelyi adottságait meghatározó talajtani tényezők 1:100 000 méretarányú térképe II. *Agrokémia és Talajtan* 29, 35–76