

Szivattyús energiatároló létesítmények területalkalmassági vizsgálata az Észak-magyarországi régióban

Soha Tamás¹, Juhász Kristóf Péter², Hartmann Bálint³

¹ térinformatikus, F4STER – Future 4 Zrt. (e-mail:gis@f4ster.hu)

² doktorandusz, Villamos Energetika Tanszék, Villamosmérnöki és Informatikai Kar, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem. (e-mail:kristof.juhasz@f4ster.hu)

³ tudományos főmunkatárs, Villamos Energetika Tanszék, Villamosmérnöki és Informatikai Kar, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem. (e-mail:hartmann.balint@vet.bme.hu)

DOI:10.59258/hk.22210



Kivonat

A tanulmányt képző vizsgálat célja az volt, hogy egy Észak-magyarországi területen azonosítsa azokat a helyszíneket, ahol kisléptékű szivattyús energiatároló (SZET) létesítményeket lehet kialakítani. A vizsgálat során felszíni vizekből, külszíni és mélyművelésű bányákból, valamint zöldmezős területekből álló helyszíneket kerestünk, ahol két víztározó medencét lehet létrehozni. A tervezett energiatároló létesítmények kis kapacitásúak (1-20 MWh), és építésük, üzemeltetésük méretüknél fogva várhatóan mérsékelt környezeti hatással járna. A 2 665 km²-es területet térinformatikai (GIS) környezetben digitális domborzatmodellel és vektoros adatokkal vizsgáltuk. A GIS szoftverek és modern eljárások segítségével területalkalmassági vizsgálatot végeztünk, figyelembe véve számos kritériumot egy többszemponút döntéshozatali módszert alkalmazva. A nemzetközi összehasonlító elemzések (benchmarkok) és jó gyakorlatok figyelembevételével, valamint a SZET technológia meghatározott műszaki paramétereinek alkalmazásával a helyszíneket többlépcsős leválogatásnak vetettük alá. Végül 21 helyszínt választottunk ki, amelyeket háromdimenziós megjelenítések illusztrálnak. A vizsgálat lefutása alapján a kidolgozott módszertan megfelelő a kisléptékű SZET-ek helyszíneinek meghatározására, illetve az eredmények szerint a mintaterület kifejezetten alkalmas ezen létesítmények megvalósítására. A vizsgálatot az EB Hungary Invest Kft. megbízásából a F4STER – Future 4 Zrt. végezte a jelen közlemény szerzői által. A közlemény tartalma a megbízó hozzájárulásával és az ipari titkok tiszteletben tartásával kerül közzétételre, a potenciális létesítményi helyszínek konkrét megjelölése nélkül.

Kulcsszavak

Szivattyús energiatároló, környezeti hatás, GIS, többszemponút döntéshozatali eljárás, digitális domborzatmodell.

Site suitability assessment of pumped-hydro energy storage facilities in the Northern Hungary region

Abstract

The aim of the study was to identify sites in a Northern Hungarian area where small-scale pumped-hydro energy storage (PHES) facilities could be developed. During the study, we searched for sites consisting of surface waters, open-pit and underground mines, and greenfield areas where two water storage basins could be created. The planned energy storage facilities have a small capacity range (1-20 MWh), and their construction and operation are expected to have a moderate environmental impact due to their size. The 2 665 km² area was examined in a geographic information system (GIS) environment with a digital elevation model and vector data. Using GIS software and modern procedures, we conducted a site suitability study, taking into account several factors using a multi-criteria decision-making method. Taking into account international benchmarks and good practices, and applying the specific technical parameters of the PHES technology, the sites were subjected to a multi-stage selection. Finally, 21 locations were selected, which are illustrated by three-dimensional visualizations. Based on the course of the study, the developed methodology is suitable for determining the locations of small-scale PHES s, and according to the results, the sample area is particularly suitable for the implementation of these facilities. The study was carried out by F4STER – Future 4 Zrt. and the authors on behalf of EB Hungary Invest Kft. The content of the article is published with the consent of the client and with respect for industrial secrets, without specific designation of potential facility locations.

Keywords

Pumped-hydro energy storage, environmental impact, GIS, Multi-Criteria Decision-Making, digital elevation model.

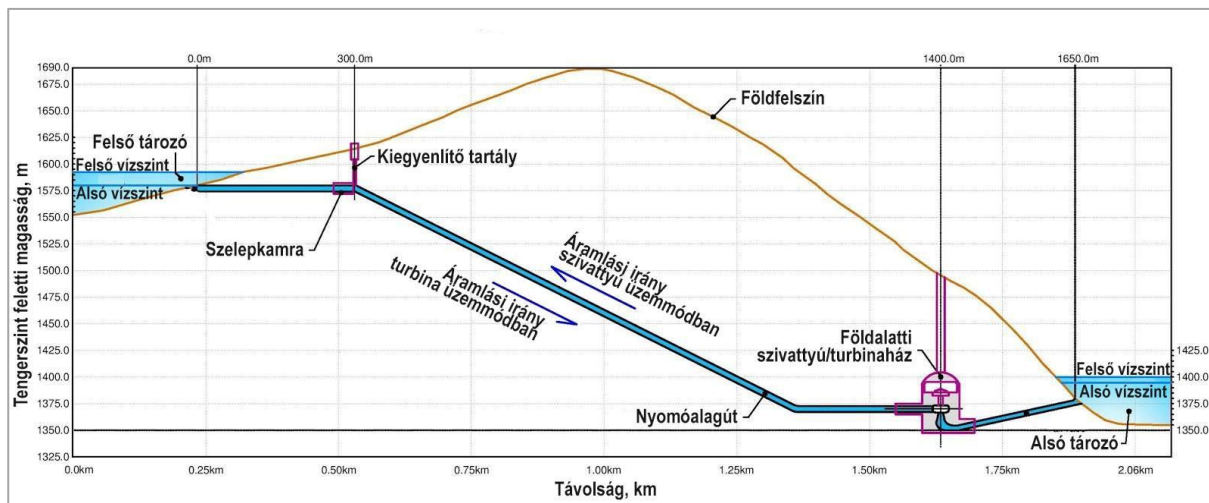
KISLÉPTÉKŰ SZIVATTYÚS ENERGIATÁROLÓK BEMUTATÁSA

A megújuló energiaforrás alapú energiatermelés arányának növekedése miatt a villamosenergia-rendszer rugalmasságának fenntartása érdekében a hálózati energiatárolás megvalósítása kiemelten fontossá vált az elmúlt években. Az energiatárolóknak két fő csoportja létezik. A közvetlen energiatárolók (szuperkondenzátorok, szupravezető mágneses energiatárolók) magát a villamosenergiát tárolják el

későbbi felhasználásra. A közvetett energiatárolók (szivattyús energiatárolók, sűrített levegős energiatárolók, lendkerekes energiatárolók, akkumulátorok, hidrogén üzemanyagcella) az energiát valamilyen más formába alakítva tárolják el. A szivattyús energiatárolók (SZET) a villamosenergiát mechanikus (helyzeti illetve mozgási) energiává alakítják át. A szivattyús-tározós vízerőművek általános felépítését az 1. ábra szemlélteti. A két víztározó – alsó és felső – között fogyasztási völgyidőszakban a felső

tározó feltöltése történik, azaz az erőmű szivattyú üzemben működik. Fogyasztási csúcsidőszakban fordított irányban, a felső tározóból az alsó tározó felé folyó víz a turbinálapátokon munkát végez, ezáltal villamos energiát

termel. Ez az erőművi generátorban megtermelt villamosenergia távozik a villamosenergia-rendszeren keresztül a fogyasztók felé (Gutiérrez-Arántegui és Lacal-Arántegui 2015).



1. ábra. Szivattyús energiatároló sematikus ábrája (Badarch 2015)

Figure 1. Schematic diagram of a pumped-hydro storage system (Badarch 2015)

Szivattyús-tározós erőműben tárolható összes energiamennyiség:

$$E = \eta \rho g H V \quad (1)$$

ahol: η : a szivattyús-tározós erőmű hatásfoka, ρ : a víz sűrűsége [kg/m^3], g : gravitációs gyorsulás [m/s^2], H : a tározók közti magasságkülönbség (esés) [m], V : szállítandó víztérfogat [m^3].

A nagyléptékű energiatárolás ma ismert leghatékonyabb módja a szivattyús energiatárolás alkalmazása. Ez azt jelenti, hogy nagyobb mennyiségű energia tárolható bennük, mint a többi ma ismert energiatárolási technológiával (akkumulátor, lendkerekes energiatároló, sűrített levegős energiatároló stb.). Ezáltal nagyon hasznos elemei hálózati tartalékként (frekvencia- és feszültség szabályozáshoz) a villamosenergia-rendszernek. Jelenleg a szivattyús energiatárolás kiforrott technológiájának számít. 2025-ben szerte a világon több mint 190 GW SZET üzemelt, és az egyre bővülő kapacitások földrajzi irányát jól szemlélteti, hogy a globálisan 150 GW építés alatt álló kapacitásból 90 GW Kínában valósul meg (URL4).

A technológia kisléptékű változata is létezik, azonban ez még további fejlesztésre, javításra szorul (Crettenand 2012). A kisléptékű szivattyús-tározós vízerőműveknek kisebb a környezeti hatása – azaz szén-dioxid ekvivalense – a nagyléptékű kialakításánál és szerepe a helyi vagy regionális területre terjed ki. Alkalmazásuk csökkenti a fogyasztási csúcsigényt, ezáltal segítségükkel elkerülhető vagy elhalasztható a hálózat megerősítése. A kisléptékű szivattyús-tározós erőművekkel a kis- és középfeszültségű vonalak feszültségproblémái is kezelhetők (Rogeaú és társai 2017).

A kisteljesítményű szivattyús tározós vízerőművi technológia a 100 kW és 10 MW közötti beépített teljesítményű szivattyús energiatárolókra vonatkozik. 2012-ben Svájc villamosenergia-termelésének 57%-át az ország vízerőműveinek termelése adta, amelyből 6% (3,8 TWh) kisteljesítményű szivattyús-tározós vízerőművekből származott. A kis vízerőművek technológiája alapvetően fejlett

megújuló energiaforrás alapú technológiának számít, azonban a környezetbe illesztés, illetve a létesítési költségek terén még további fejlesztés szükséges. A technológia egyik nagy előnye a többi megújuló energiaforráshoz képest az alacsonyabb energiatermelési ár. A másik előnye pedig az, hogy a technológia összekapcsolható más technológiákkal, például az ivóvíz vagy az öntözővíz hálózattal (Crettenand 2012).

A kisteljesítményű szivattyús-tározós vízerőművek előnyös tulajdonságain (Crettenand 2012):

- megújuló energiaforrás,
- nagyon magas hatásfok (más technológiákhoz képest, 80% feletti),
- rövid megtérülési idő (high energy payback ratio),
- nagyon alacsony szén-dioxid-kibocsátás,
- hozzájárul az ellátásbiztonsághoz,
- munkahelyteremtés (építőipari munkák),
- többcélú infrastruktúrába integrálható (öntöző- vagy ivóvízhálózat),
- hosszú élettartam.

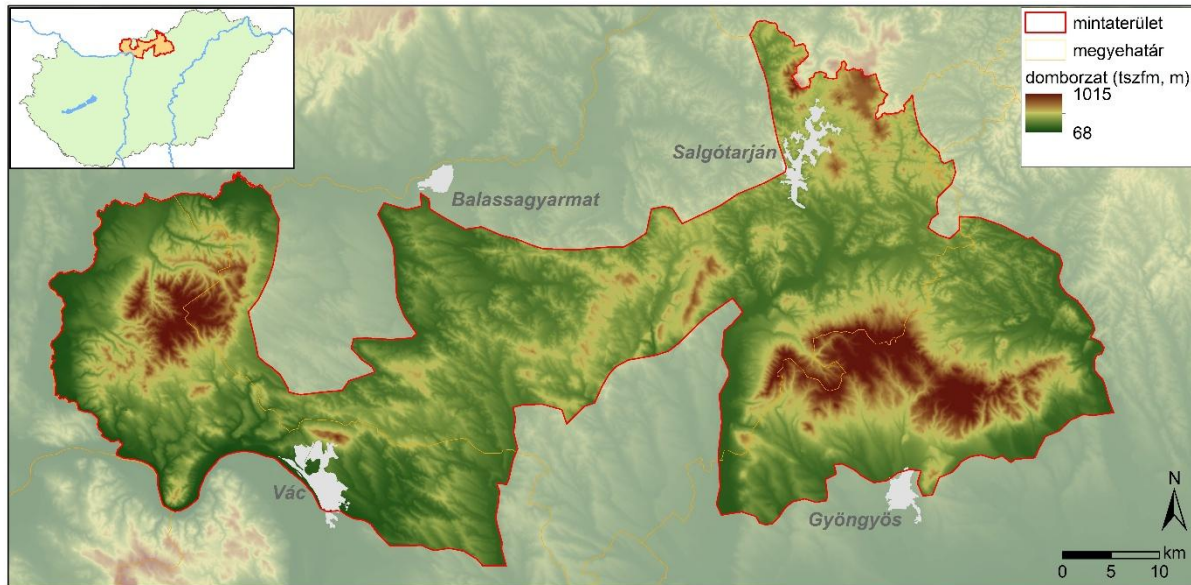
A kisteljesítményű szivattyús-tározós vízerőművek hátrányos tulajdonságai (Crettenand 2012):

- a környezetre és a tájra gyakorolt negatív hatás (megfelelő intézkedésekkel korlátozható),
- villamosenergia-termelés jelentősen függ a vízgazdálkodástól,
- hagyományos villamosenergia-termeléshez képest magasabb termelési költségek,
- jelentős társadalmi elutasítás,
- az üledékek feltölthetik a víztározókat, csökkentve ezzel a tározókapacitást és az összes eltárolható energiamennyiséget,
- néhány nagyobb teljesítményű vízerőművel gyorsabban elérhető a tagországok által vállalt Európai Unió célkitűzések, mint több, kisebb teljesítményű vízerőművel,
- regionális területtervezés nélkül feldarabolhatja, részekre oszthatja a vízgyűjtőt (csökkenő tárolható energiamennyiség).

VIZSGÁLT TERÜLET

A vizsgálati terület a megrendelő igényeinek megfelelően és a F4STER szakértőinek javaslata alapján a két fél által közösen lett kijelölve. A terület Észak-Magyarország azon vidékeit foglalja magába, melyek 1) Nógrád vármegyében találhatók vagy azzal szomszédosok, 2) a vizsgált technológia számára megfelelő domborzati adottságokkal rendelkeznek. A vizsgált terület emiatt természetföldrajzi objektumokhoz (folyók), adminisztratív határokhoz (északi országhatár) és a hazai kistájakhoz (*Dövényi 2010*) igazodik. A vizsgált terület térképét a 2. ábra mutatja be. A határok a terület nyugati végétől indulva a következők:

A Visegrádi-Dunakanyar dunai bal partja az Ipoly torkolatától a Gombás-patak torkolatáig, a Kosdi-dombság déli pereme mentén a Galgáig. Északra a Nézsa-Csővári-dombság, a Központi-Cserhát, a Zagyva-völgy északi része Lőrincig, a Mátra-lába és a Nyugati-Mátra, Magas-Mátra, a Déli-Mátra mentén a Tarna jobb partjáig, a Parádi-Recski-medence, a Felső-Tárnai-dombság nyugati pereme, a Medves-vidék az országhatárig, a Karancs, a Központi-Cserhát északi pereme az Ór-heggyel, a Terényi-dombság nyugaton a Lókos-patak mentén a Börzsönyi-peremhegységig, majd a területet lezárva az Ipoly mentén a folyó dunai torkolatáig.



2. ábra. A vizsgált terület elhelyezkedése és domborzata
Figure 2. Location and topography of the area investigated

A terület összesen 2 665 km² kiterjedésű. Domborzatát és vízrajzát tekintve nagyon változatos. A Duna Vác vízmérce magassága 98,12 mBf (mederben), legmagasabb pontja a Mátrában lévő Kékes (1 014 m). Vízrajzát tekintve megtalálható a hazánkban legmagasabb vízhozamú Dunától a közepes vízhozamú Ipolyon és Zagyván át egészen az időszakos vízfolyású völgyekig minden kategória, illetve természetes és mesterséges állóvizekben is gazdag. Diverzitásának köszönhetően alkalmas a SZET-ek fogadóképességének részletes vizsgálatára.

ADAT ÉS MÓDSZER

Felhasznált adatok

A felhasznált adatok térinformatikai szempontból alapvetően két csoportra bonthatók: raszteres és vektoros adatok. Mindkét kategória elemei a későbbiekben ismertetett megbízható, magas minőséget képviselő forrásokból származnak, előállításukat tekintve általánosan naprakésznek tekinthetők, melyeket különböző ellenőrzésekkel (ortofotós validálás, korábbi terepi ismeretek, adatszolgáltatók véleményének kikérése) biztosítottunk. Az adatkategóriák elemeit a következőkben ismertetjük.

A megrendelő által megjelölt SZET méretkategória és az ilyen lépték vizsgálatához szükséges felszíni leképezés minőségének biztosítása érdekében 10 m-es terepi felbontású digitális domborzatmodellt (DDM) alkalmaztunk. A DDM a jelen tanulmányban elvégzett térinformatikai

helyszínválasztási eljárások „lelkét” képviseli. Terepi felmérésekből származik és maradéktalanul lefedi a teljes mintaterületet. A 10 m-es felbontás azt jelenti, hogy a DDM rácshálójának minden pixele 10 m oldalhosszúságú, saját tengerszint feletti méterben (egész szám) kifejezett magassági értékkel rendelkezik. A hazánkban, ilyen nagy kiterjedésű területekhez használt domborzatmodellekhez képest kiváló minőséget képvisel.

A DDM-en előforduló esetleges rejtve maradó kisebb hibák kiküszöbölése érdekében simítást végeztünk a környezetéhez képest negatív irányban jelentősen eltérő pixelek javítására (Fill művelet az ArcMap-ben). A kevés esetben megjelenő teraszosságot és árkos leképződéseket a hibás részek kivágásával, a környezetben lévő pixelek értékeit felhasználva, interpolációval javítottuk. Az egyes természetföldrajzi és művi elemek pozíciójának ellenőrzéséhez további raszteres állományokat, így recens légi- és űrfelvételeket alkalmaztunk.

A vektoros állományok egy részét a tájékozódást segítő, ideiglenesen használt topográfiai elemek tették ki, melyek a hivatalos, 2019-es Országos Területrendezési Tervből (OTRT) származnak. További vektoros adatok a vizsgálat során ténylegesen felhasznált olyan objektumok, mint a természetes és mesterséges víztestek, a külszíni bányák és a mélyművelésű bányák. A víztestek (folyó és állóvíz egyaránt) részben hivatalos adatbázisokból (OTRT,

vízügyi igazgatóságok korábbi adatbázisaiból, Vízügyi-Törvényi Gazdálkodási Tervből, részben pedig a légi és űrfelvételek interpretációjának manuális létrehozásából származnak. A külszíni bányák az MBFSZ-től (*URL1*) és a Corine Land Cover (*URL2*) páneurópai területhasználati adatbázisából származnak. Ezen adatok és a valós lehetőségek között nagy eltérést tapasztaltunk, ezért a bányászat okozta felszíni tájsebek listáját ugyancsak űrfelvételek interpretációjával jelentősen kibővítettük. Emiatt az egyes bányák aktuális státusza, a művelési terület pontos kiterjedése és a bányagödrök mélysége bizonytalan, melynek ellenőrzésére helyileg illetékes szakértő bevonását és helyszíni szemlét javasolunk. A bizonytalanság nemcsak térfogatcsökkenést, de adott esetben a bemutatott értékhez képest nagyobb térfogatot is jelenthet, a bemutatott térfogatertékek ezért fenntartással kezelendők. A bányagödrök horizontális kiterjedése mindezek ellenére, az alkalmazott vizsgálati léptéket figyelembe véve, nagyságrendileg megbízhatónak tekinthető. A mélyművelésű bányákra vonatkozó információkat a mintaterületen Megrendelő bocsájtotta rendelkezésünkre a Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatóságának (korábban MBFSZ) adatközlése nyomán. Ez az adatbázis az aknák felszíni kibukkanási helyeit és az aknák neveit tartalmazza, azonban a mélységükről, térfogatukról, állapotukról és egyéb paramétereikről nem szolgál információval.

Ez alapján a területen azonosított és a vizsgálat szempontjából releváns objektumok:

- víztestek: 144 db, a legnagyobb (a Dunát és az Ipolyt kivéve) 160 ha kiterjedésű, átlagosan 67 154 m²;
- külszíni bányák: 72 db, a legnagyobb 20 ha területű, átlagosan 34 660 m²;
- mélyművelésű bányák: 140 db (pontoszerű objektumok).

A Zagyva, annak hossza és esése miatt több szegmensből tevődik össze, és ugyanez igaz a több kitermelési foltból halmazt alkotó bányaterekre is. A vizsgálat további lépései okán ezek külön objektumként voltak kezelve. A további vektoros állományok, illetve a domborzatmodell részletesebben a területalkalmassági vizsgálatot leíró fejezetben szerepelnek. A tényleges vizsgálatok megkezdése előtt különféle adatkezeléseket végeztünk az állományokon: hibás elemektől való tisztítás, projekció Egységes Országos Vetületi rendszerbe, fájlformátumok közötti konverziók, adatbázis-rendezer, geometriai és attribútum-hibajavítás, előkészítés a modellezésre.

Módszertan

A vizsgálatok elvégzéséhez az ArcGIS térinformatikai szoftver 10.4-es változatát, Surfer 3D grafikus szoftvert és MS Office eszközöket használtunk. Az alább bemutatott módszertan *Soha (2017)* korábbi módszertanának továbbfejlesztett és a piaci igényekhez igazított változata.

A mintaterület SZET-létesítmény fogadására való alkalmasságát meghatározó, jelen kutatásban figyelembe vett tényezők a domborzat, a területhasználat, a lakott területek elhelyezkedése, a védett természeti területek, az úthálózat és a villamosenergia-hálózat hasonló jellegű területalkalmassági és telephelyválasztási vizsgálatok során

általánosan alkalmazott kritériumok, és figyelembevételük a SZET esetében is indokolt. Jelen esetben a víztestek, külszíni és mélyművelésű bányák ugyancsak a területalkalmassági kritériumok sorát bővítik.

Az egyes területalkalmassági kritériumok térbeli aspektusát SZET létesítmény telepítési kedvezőségének szempontjából kategorizáltuk, és az egyes kategóriákat egy 1-10-ig terjedő skála értékeihez társítottuk. A skálán az 1-es érték a legkevésbé alkalmas, míg a 10-es a legalkalmasabb területeket jelöli, ezek tehát területalkalmassági pontértékek. Azon területek, melyek az adott kritérium alapján alkalmatlanok SZET befogadására („tiltott területek”), 0 értéket kaptak. A figyelembe vett kritériumokat és azok tulajdonságait, értékeléseiket a következőkben a tanulmány szövegesen ismerteti, míg a kategóriákat és azok pontértékeit együttesen, az *1. táblázat* mutatja be. A külszíni és mélyművelésű bányák és víztestek korábban bemutatásra kerültek. A területalkalmassági vizsgálat során 300 m-es távolsági osztásközöket alkalmaztunk, illetve a kivittelezési és technológiai realitásokat mérlegelve a vizsgálatból kizártuk az ilyen objektumoktól 3 000 m-nél távolabb eső lehetséges területeket.

A telephelyen való építkezéshez előnyben részesülnek a vízszintes síkhoz közeli területek. A 0° és 10° közötti meredekségű területeket vettük figyelembe, míg a 10°-nál nagyobb lejtőmeredekségű területek nem alkalmasak. A mintaterület domborzatának leképezéséhez digitális domborzatmodellt alkalmaztunk. A területhasználat szempontjából komplex szemléletmódot igényel, figyelembe véve környezeti, társadalmi és műszaki szempontokat. A Corine Land Cover 2018-as adatbázisát használtuk, bár a 25 ha-os felbontás miatt fenntartásokkal kezelendő. A zöldmezős kategóriák közül a szántóföldek és intenzív legelők kaptak a legmagasabb pontértékeket, míg a szőlők és gyümölcsösök a legalacsonyabbat. A beépített területek, erdők, hulladéklerakók és felszíni vizek kizártak. A védett természeti területek a legszigorúbb védettségben részesültek, és a beruházások számára tiltottak. A nagyobb térbeli kiterjedésű elemek, mint a természetvédelmi területek és nemzeti parkok, 100 m-es védősávot kaptak. A területalkalmassági pontérték fokozatosan növekszik a védett területektől távolodva. A SZET üzemek esetleges zajszennyezése vagy rezgése káros hatást válthat ki a lakosságra. A vizuális megjelenés miatt fellépő negatív tájképi hatás is problémát jelenthet. A települési belterületek és nem lakott, de beépített területek 0 pontértéket kaptak. A pontértékek a védőzónák peremétől távolodva növekednek. A villamosenergia-hálózathoz való közelség alapvető fontosságú a csatlakozási költségek alacsonyan tartása érdekében. A középvezettségű elosztóhálózatot vettük figyelembe, amely képes fogadni a létesítmények által termelt villamosenergiát. Az alkalmassági pontértékek fokozatosan csökkennek a villamosenergia-hálózattól távolodva. A nehéz munkagépek és szállítók számára szükséges a könnyű megközelíthetőség a kivitelezés ideje alatt. Bár később ez az igény mérséklődik, a karbantartási munkálatokhoz és üzemi balesetek esetén továbbra is szükség van a megfelelő közúti kapcsolatokra. Az OpenStreetMap (*URL 3*) burkolt közúthálózatát, dűlőutakat és erdészeti utakat vettük figyelembe, feltételezve, hogy burkolás után alkalmasság lehetnek nagy tengelyterhelésű járművek számára. A területalkalmassági besorolás az úthoz közel veszi fel a legmagasabb értékeket, majd ettől távolodva fokozatosan csökken.

1. táblázat. A vizsgálat során figyelembe vett területalkalmassági tényezők pontozása és kizárt területeik
Table 1. Scoring of site suitability factors considered and the excluded areas

	Domborzat (°)	Területhasználat (CLC kód)	Távolság (m)				
			Víztestek és bányák	Védett természeti T-ek	Lakott területek	Villamosenergia- hálózat	úthálózat
Kizárás (0)	> 10	122, 123, 124, 131, 132, 141, 142 (beépített területek)	3000 <	NP, TK, TT, Natura2000, NÖH, Ex Lege, Természeti emlékek, Ramsari T-ek, Országos Tájképvédelmi Övezet	Belterület		
Pontérték							
1	9-10	221 (szőlők)	0-300	0-100	0-150	4500 <	900 <
2	8-9	222 (gyümölcsös)	300-600	100-200	150-300	4000-4500	800-900
3	7-8		600-900	200-300	300-450	3500-4000	700-800
4	6-7	311, 312, 313, 324 (erdő és cserjés)	900-1200	300-400	450-600	3000-3500	600-700
5	5-6	242 (komplex művelésű minták)	1200-1500	400-500	600-750	2500-3000	500-600
6	4-5	243 (részben megművelt)	1500-1800	500-600	750-900	2000-2500	400-500
7	3-4	321 (Természetes gyepek)	1800-2100	600-700	900-1050	1500-2000	300-400
8	2-3		2100-2400	700-800	1050-1200	1000-1500	200-300
9	1-2	231 (legelők)	2400-2700	800-900	1200-1350	500-1000	100-200
10	0-1	131, 211, 411, 511, 512, (bányák, szántók, vizek és lápok)	2700-3000	900 <	1350 <	0-500	0-100

Az egyes területalkalmassági kritériumokat a megrendelővel közösen tartott műhelymunka során súlyoztuk az Analytic Hierarchy Process-t (AHP) segítségével (Saaty 1990). Ez a módszer a különböző többszempontú döntéshozatali eljárások között is igen egyszerűnek tekinthető, ezért gyakran használják bizonyos technológiák, akár energiaipari létesítmények telephely-alkalmassági vizsgálatainál, emiatt SZET-ek helyszínválasztása során is megfelelő.

Az AHP egy mátrixban szerepelteti a döntés során figyelembe venni kívánt szempontokat, jelen esetben a területalkalmassági tényezőket, majd a döntéshozókat támogató szakértők minden szempontot egy páros összehasonlításnak vetnek alá, melyben az egyes szempontok saját magukkal is össze vannak vetve. A relatív fontosságához megállapított értékeket a 2. táblázatban lévő mátrix szemlélteti. A mátrix készítőjének szaktudása alapján meg kell állapítania, hogy egy összehasonlításban X szempont

ennyivel fontosabb Y szempontnál (a táblázatban zöld mezők), melyet egy 1-től 9-ig terjedő skála segítségével pontoz, ahol 1=ugyanannyira fontos; 3=mérsékelten fontos; 5=fontos; 7=nagyon fontos; 9=extrém fontos. A pontozás során a 2, 4, 6 és 8-as, közbenső értékek is alkalmazhatók. A mátrixos elrendezés miatt Y szempont X-szel való összevetésére is sor kerül, ekkor értelemeszerűen az X-Y összehasonlításnál adott pontérték reciproka (a korábbi példánál maradva 0,2) jelenik meg (fehér mezők). X szempont saját magával való összevetésének értéke minden esetben 1, vagyis ugyanannyira fontos (szürke mezők). A mátrix elkészítésekor különös hangsúlyt fektettünk a társadalmi és környezeti szempontok fontosságának kiemelésére. Az AHP számítási módszertanát Saaty (1990) részletesen ismerteti. A szükséges számításokat követően eredményül kapott súlyértékek már felhasználhatók az adott tényező csoporton belüli fontosságának megállapítására (2. táblázat utolsó oszlopa).

	Domborzat	Víztestek és/vagy bányák	Területhasználat	Védett természeti területek	Lakott területek	Villamosenergia-csatlakozás	Úthálózat	Súlyérték
Domborzat	1,00	1,00	3,00	2,00	3,00	2,00	4,00	0,23
Víztestek és/vagy bányák	1,00	1,00	3,00	2,00	3,00	2,00	5,00	0,24
Területhasználat	0,33	0,33	1,00	0,20	0,50	2,00	1,00	0,08
Védett természeti területek	0,50	0,50	5,00	1,00	1,00	2,00	5,00	0,18
Lakott területek	0,33	0,33	2,00	1,00	1,00	0,50	1,00	0,09
Villamosenergia-csatlakozás	0,50	0,50	0,50	0,50	2,00	1,00	7,00	0,13
Úthálózat	0,25	0,20	1,00	0,20	1,00	0,14	1,00	0,05

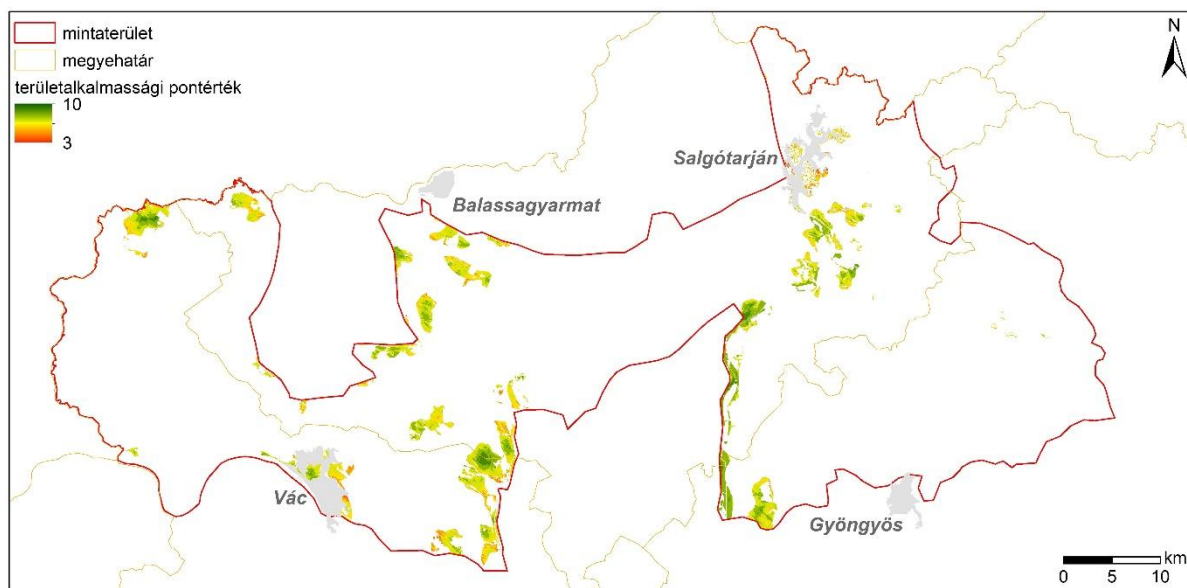
2. táblázat. A szivattyús energiatárolók területalkalmassági tényezői az Analytic Hierarchy Process mátrixban
Table 2. Area suitability factors of pumped-hydro storage in the Analytic Hierarchy Process matrix

EREDMÉNYEK

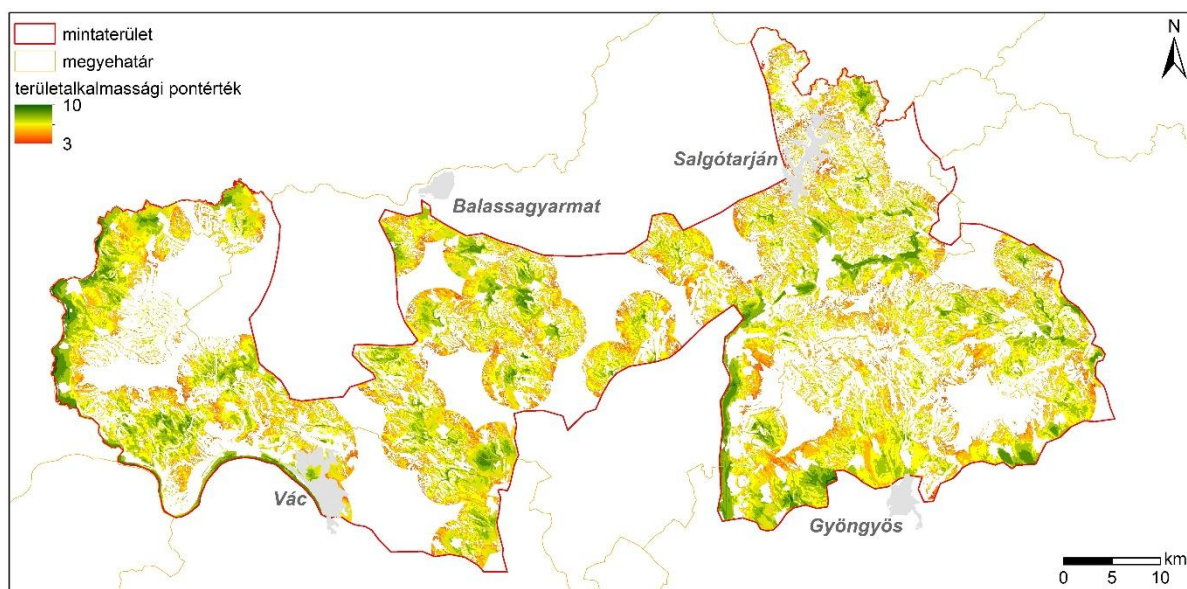
Területalkalmasság értékelése

Két területalkalmassági vizsgálat készült: egy szigorúbb, mely kizár bármiféle védett területet a SZET létesítés lehetősége előtt, míg egy megengedőbb változat ezt a kategorikus tiltást nem alkalmazza. A vizsgált terület súlyozott szempontokból előállított területalkalmassági térképe a várakozásoknak megfelelően elsősorban a kizárt területek kiterjedésével hívja fel magára a figyelmet, főként a szigorúbb modellváltozatban (3. ábra). A kizárt területek aránya 95% a szigorú modellben, míg 65% a megengedőben. A valamennyire alkal-

masnak ítélt területek elterjedése az utóbbi, természeti védettséget nem alkalmazó változatban már sokkal homogénebb, köszönhetően a mintaterületen többé-kevésbé egyenletesen eloszló három vizsgált objektumkategóriának (4. ábra). A figyelembe vett objektumokhoz kapcsolható medenceparók kialakítására alkalmas területeket a megengedőbb modellből származtattuk, és mindegyik szerepel a vizsgálatban tekintet nélkül arra, hogy mekkora alkalmassági pontértékekkel rendelkeznek. A területalkalmassági értékelést a végleges helyszínválasztás során használtuk fel újra a lehetséges létesítményi helyszínek jellemzésére.



3. ábra. Területalkalmasság szivattyús energiatároló fogadására a szigorúbb értékelés alapján
Figure 3. Area suitability for receiving pumped-hydro storage based on the more stringent assessment

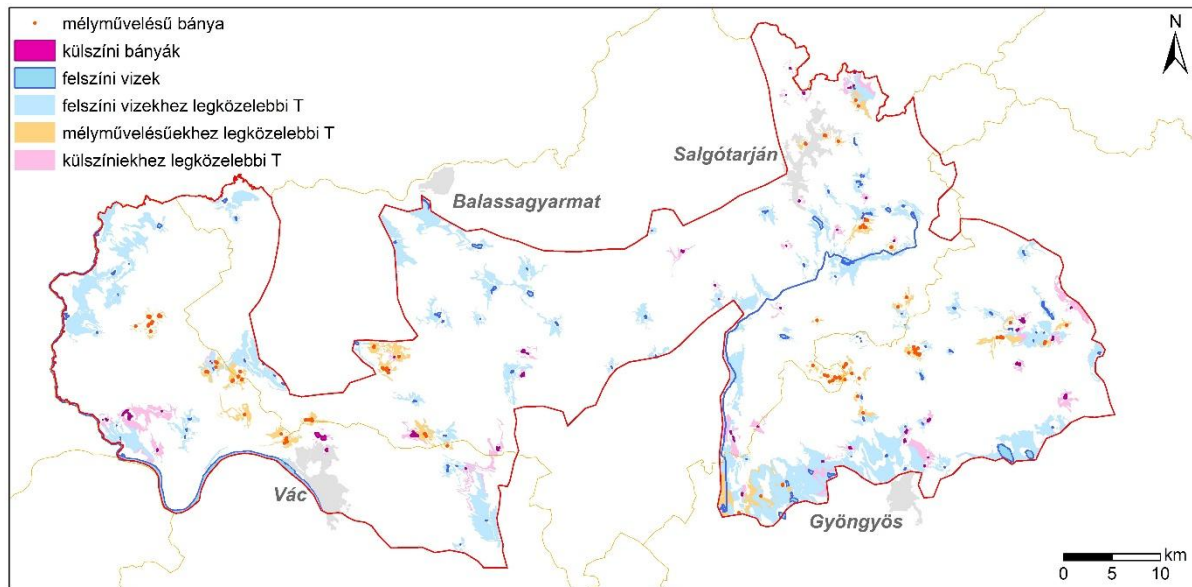


4. ábra. Területalkalmasság szivattyús energiatároló fogadására a megengedőbb értékelés alapján
Figure 4. Area suitability for receiving pumped-hydro storage based on the more permissive assessment

Potenciális helyszínek

A területalkalmassági vizsgálat megengedő változatának 0-nál nagyobb értékű területeinek raszteres állományából vektoros (ez esetben poligonális) réteg készült, mely már alkalmas a további, részletes térinformatikai műveletek és leválogatások elvégzésére. Ennek eredményeként számos, jellemzően a vizsgálati léptéknek megfelelő kiterjedésű elemet kaptunk. A 9 0481 elemből a 200 m²-nél kisebb kiterjedésű elemek törlésre kerültek, míg a későbbi könnyebb kezelhetőség érdekében a 300 000 m²-nél nagyobb egybefüggő foltokat a DDM-ből képzett 5 m-es

szintvonalakkal daraboltuk fel. Csak az egyes objektumcsoportok elemeihez legközelebb eső első 50 poligonnal folytunk a további számítások (5. ábra). Ez a vizekhez kapcsolódók esetében 7 200, külszíni bányákhoz 3 600, míg mélyművelésű bányákhoz kapcsolódva 7 000 poligont jelent. A szintvonalakkal való feldarabolás alkalmazásának másik oka, hogy így lehetőség nyílik könnyen, vizuális elkülönítéssel megállapítani egy adott, alkalmasnak ítélt területről, hogy rajta az új víztározó völgyzárógátas kialakítású lehet-e. Ezt a példaeredményeket bemutató 8-9. ábra szemlélteti.



5. ábra. A figyelembe vett felszíni vizek, külszíni- és mélyművelésű bányák elhelyezkedése, illetve a környezetükben a másik medence számára potenciálisan hasznosítható területek

Figure 5. Location of the considered surface waters, open-pit and underground mines, and the areas in their surroundings that can potentially be utilized for the other basin

A közelségi vizsgálatokból pontos euklideszi távolságokat számítottunk az objektumok és az új medence kialakítására alkalmas területekhez. A DDM-ből kinyert tengerszint feletti magasságértékeket a poligonokhoz társítottuk olyan formán, hogy azok a lefedett domborzat átlagmagasságait kapták meg. Törlésre kerültek a vizsgált objektumokat metsző (azonos helyen lévő) poligonok.

Egyszerűsítésként függőleges falú gátakat feltételeztünk a térfogatszámításoknál. A meglévő víztestek, empirikus módon átlagosan 2 m mélyeknek lettek becsülve (kivéve a hivatalos értékkel rendelkező víztározók). A külszíni bányák becsült átlagmélysége 10 m. A mélyművelésűekről nem rendelkezünk információval, ezért ezen kategória esetén nem tudtunk térfogatot számolni. Az ilyen objektumokhoz való kapcsolódások térfogatait nem lehetséges megállapítani mindaddig, amíg pontos paraméterek nem állnak rendelkezésre. Az újonnan kialakítandó helyszínek (a poligonok) átlagmélysége egységesen 4 m-ben lett meghatározva, szakértői becslésre hagyatkozva. Számos poligon túl nagy kiterjedésű volt, ezért a térfogatszámításoknál azt az elvet követtük, hogy a nagy rendelkezésre álló területeken csak akkora helyszín kijelölése szükséges, amekkora a medencepárok kisebbik térfogati értékkel rendelkező tagjával megegyezik. Például, ezáltal elkerülhető, hogy egy medencepár felső tározója szükségtelenül nagy legyen, amennyiben az alsó elhelyezkedésű tag nem tudja befogadni a felsőben felhalmozódott vizet. Az eljárás a műszaki és gazdasági racionalitások által támogatott igényeknek tesz eleget.

A lehetséges medencepárok közötti távolság és a tengerszint feletti magasságkülönbségük hányadosa alapján leválogatásra kerültek a 0,1 értéknél nagyobb és legalább 10 m-es magasságkülönbséggel jellemezhető kapcsolatok, a tanulmányban korábban bemutatott szakirodalom alapján. Ennél a lépésnél a következő statisztikákat kaptuk:

- víztest – poligon csatlakozás: 1 890 db (52,13 km² összterület),
- külszíni bányák – poligon csatlakozás: 1 436 db (32,98 km² összterület),
- mélyművelésű bányák – poligon csatlakozás: 1 967 db (39,38 km² összterület).

Ezen poligonok jellemző paramétereinek eloszlását a 6. ábra (víztest kapcsolat) és a 7. ábra (külszíni bányák kapcsolat) ismerteti. Ettől a lépéstől a mélyművelésű bányák felhasználásának további vizsgálata a szükséges műszaki paraméterek hiányában ellehetetlenült.

Ahhoz, hogy a lehetőségek számát elfogadható tartományba szorítsuk le, további leválogatást végeztünk. Egyrészt a lehetséges medencepárok közötti távolság és a tengerszint feletti magasságkülönbségük hányadosa alapján kizárásra kerültek a 0,2 értéknél rosszabb aránnyal jellemezhető kapcsolatok. Másrészt a két medence közötti légvonalban mért távolságot legalább 30 m-ben állapítottuk meg, amely már elengedő lehet a gépház elhelyezésére. Harmadrészt pedig a poligonra becsült eltávolítható energia mennyisége alapján szűrtünk: a projekt által célzott energiapiaci termékek várható belépési korlátját jelentő 1 MWh alatti kapacitásokat kizártuk, míg a felső korlátot 20 MWh-nál húztuk meg.

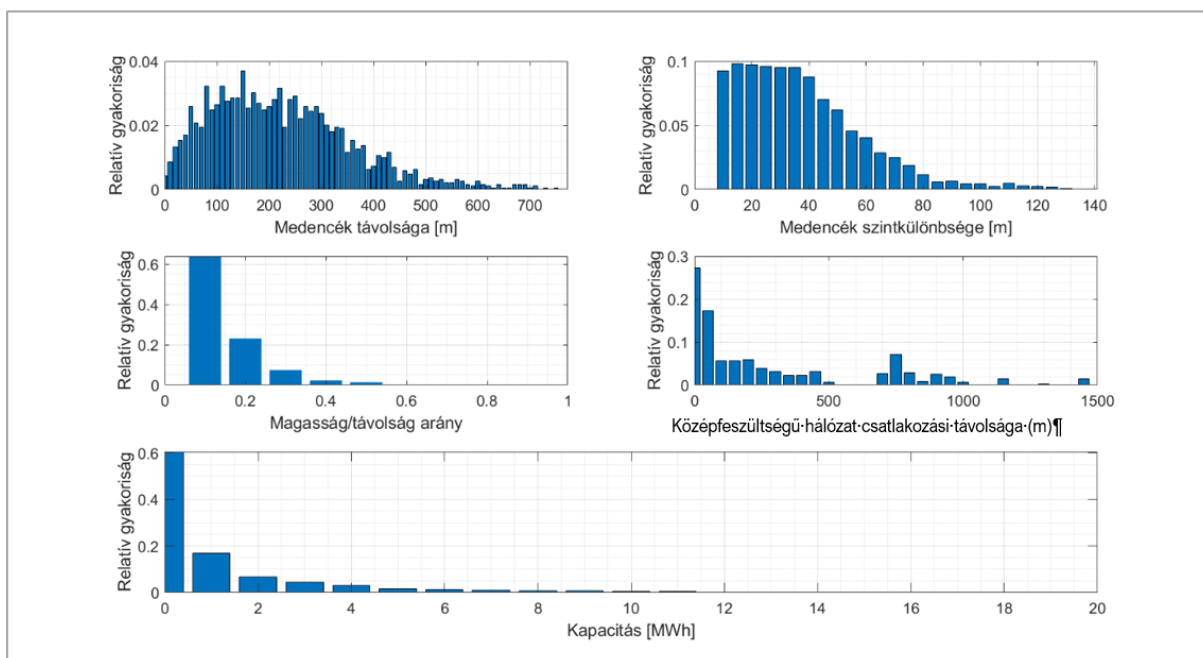
A szűrések elvégzése után az alábbi mennyiségekkel tudtunk tovább dolgozni:

- víztest – poligon csatlakozás: 270 db (10,89 km² összterület),
- külszíni bányák – poligon csatlakozás: 466 db (12,66 km² összterület).

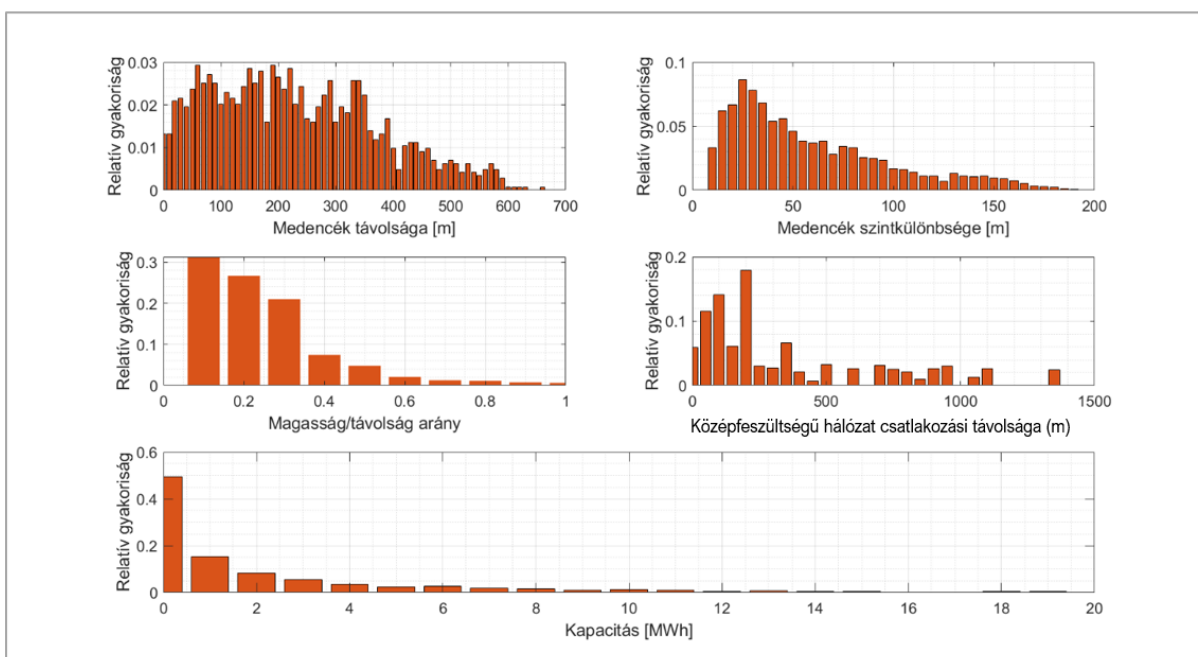
A munka első fázisának eredményeként részletes vizsgálatra 11 víztesthez kapcsolódó és 10 külszíni bányához kapcsolódó helyszínt választottunk javaslatként. Ezeket a helyszíneket a második szűrést követően úgy választottuk ki, hogy azok egy-egy helyszínen

a lehető legtöbb megvalósítható alternatívát tudják felmutatni; ez a kapcsolódó poligonok számával mérhető. Minden esetben fontos hangsúlyozni, hogy a javasolt helyszínek esetén a részletes véleményezést megelőzően az adatok pontosítására van szükség; a víztestek

esetén kiemelt fontosságú a meglévő víztömegek meghatározása (vízmélység, térfogat), míg a külszíni bányák esetén a SZET létesítése szempontjából legjobb potenciált mutató helyek között több is üzemelő bányát jelent.



6. ábra. A víztest – poligon csatlakozások jellemző adatai
Figure 6. Typical data of water body – polygon connections



7. ábra. A külszíni bánya – poligon csatlakozások jellemző adatai
Figure 7. Typical data of open pit mine – polygon connections

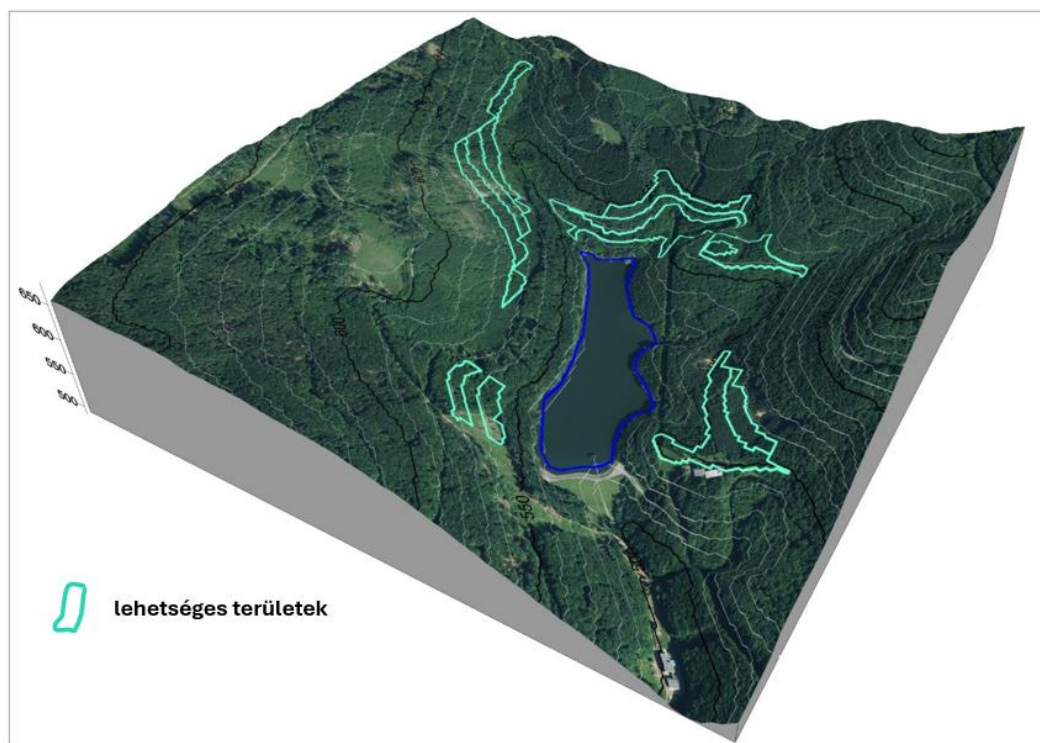
Példaeredmények felszíni víz- és külszíni bányakapcsolatos SZET-re

A számos eredmény közül, szem előtt tartva az ipari titkokat, csak két helyszín kerül bemutatásra. Az ábrákról elrejtésre kerültek a koordináták és egyéb műszaki információk. A 8. ábra által bemutatott 3D modell egy olyan helyszínt ábrázol, melynek meglévő vízteste a Mátrában található víztározó, 525 méter tengerszint feletti

magasságban. Érdekessége, hogy ez az ország legmagasabban fekvő ivóvízellátást végző víztározója. A műszaki paramétereket tekintve a tó felszíne 101 000 négyzetméter, térfogata közel 202 600 m³. A meglévő víz közelében 11 lehetséges víztest lett megállapítva (türkiz körvonallakkal) a felső víztározó kialakításához a bemutatott paramétereknek megfelelően. Az így kijelölt területek körvonalai, melyek a szintvonallakkal határoltak (ennek köszönhetik

sokszor elnyúlt alakjukat), nem feltétlenül követik le a tényleges körtöltés alaprajzát. A kijelölt felső tározó területéből csupán annyit kell felhasználni a tervezés és a kivitelezés során, amely a célértékeket eléri (tárolható energia mennyisége), de sose nagyobb térfogatút, mint a meglévő

víztest térfogata. A többféle hozzákapszolható terület más-más megvalósítási lehetőséget biztosít. Az elérhető minimális magasságkülönbség 13 méter, a maximális 47 méter. A területi adottságok miatt a maximálisan termelhető energia mennyisége 4,97 MWh.



8. ábra. Meglévő, völgyzárógátas kialakítású víztározóhoz kapcsolható területek szivattyús energiátároló létrehozásának céljából (példa). Az ábra a domborzat érzékeltetésének kedvéért a Z tengely mentén torzított

Figure 8. Areas that can be connected to an existing dam-type reservoir for the purpose of creating a pumped-hydro storage system (example). The figure is distorted along the Z axis to illustrate the relief

A 9. ábrán látható, napjainkban is művelt külszíni bánya ugyancsak a Mátrában található, 457 méter tengerszint feletti magasságban. A kitermelés végeztével a jövőben rekultiválható volna (kellő földmunkát követően) a terület SZET felső tározójaként való átalakítással. A műszaki paramétereket tekintve a bánya területe 105 000 négyzetméter, térfogata becslve 156 000 m³. A bánya kiváló földrajzi helyzetben van SZET szempontjából, közelében 17 lehetséges víztestet fogadni képes terület lett kijelölve az alsó víztározó kialakításához. Az elérhető minimális magasságkülönbség 19 méter, a maximális 95 méter. A területi adottságok miatt a maximálisan termelhető energia mennyisége 19,01 MWh.

KONKLÚZIÓ

A munka során bizonyítást nyert a kidolgozott módszertan eredményessége, mely számos potenciális helyszínt felfedezett a mintaterületen, és a nagy elemszámból is hatékonyan volt képes kiválasztani (megrendelői igények és a nemzetközi benchmark alapján) a legkedvezőbbeket. Ennek köszönhetően a helyszínválasztási folyamat következő lépései során már sokkal kevesebb lehetséges helyszínből lehet tovább szűkíteni a kört és kiválasztani azokat, melyek kivitelezési szempontból megfelelnek a feltételeknek. E módszertan esetében a kulcsszó tehát a hatékonyság. Az eljárás alkalmas nagy földrajzi területek, így régiók vagy akár egész országok SZET-beruházási szempontú területalkalmassági vizsgálatára a megfelelő adatok birtokában. Az alkalmazott

GIS-es módszertan az alkalmazott paraméterek megváltoztatásával könnyedén formálható más megrendelői igényekre és tudományos kutatási kérdések megválaszolására is.

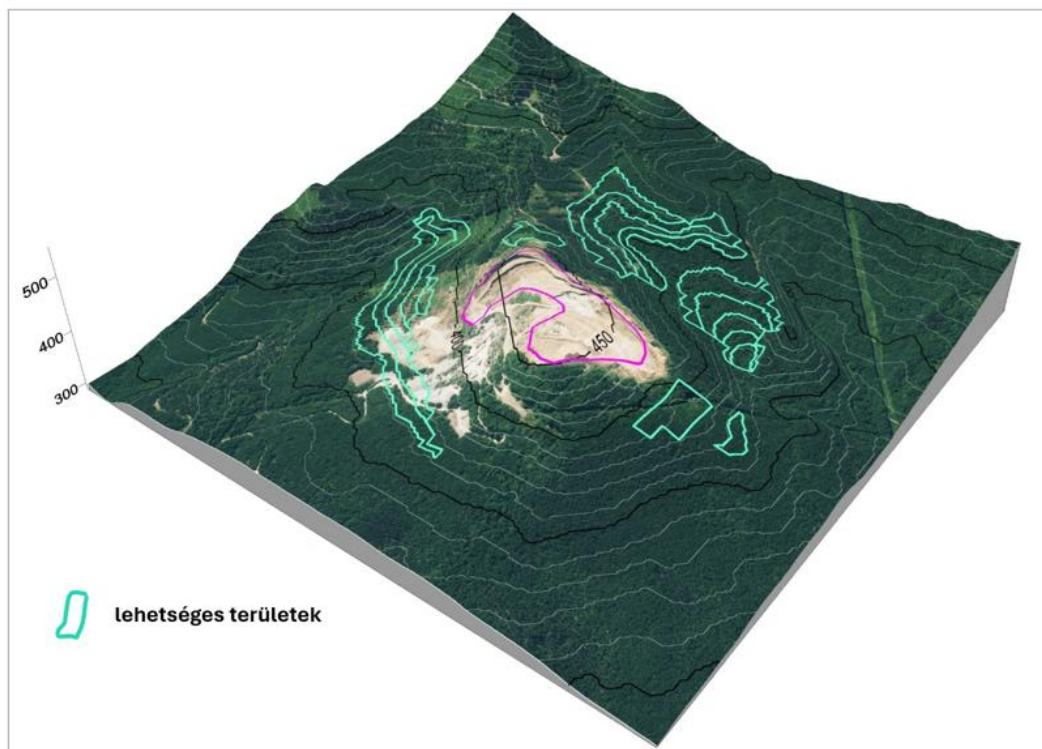
A téradatok rendelkezésre állása és feldolgozása tekintetében megfelelőek voltak az ilyen nagy földrajzi léptékben, de mégis (a technológia elterjedt méreteihez képest) kis területek felkutatására alkalmas térinformatikai adatok, különös tekintettel a legfontosabb, digitális domborzatmodell és más távérzékelési rétegek. A feldolgozás és az eredmények kiértékelése során általános tapasztalat, hogy a nagy felbontás bár általában előnyös, de bizonyos esetekben hátrányokkal is jár. Ilyen eset például az egyes felszínek elaprózottsága vektorizálást követően.

A meglévő felszíninformákhoz való ragaszkodás további kötöttségként értelmezhető. Ez főként akkor jelent problémát, ha egy kizárólag helyszíni bejárással, terepi geodéziai eszközökkel felmérhető bányauregre nem érhető el pontos térfogatadatok. Ugyanez vonatkozik a felszíni vizekre is, melyek közül csak azokról áll rendelkezésre hivatalos adat (vízmélység vagy vízutánpótlás sérülékenysége), ha az a VGT3 (URL5) szerint már kellően nagy, és a víztest kategóriába esik. Ez a mintaterületen csak két víztározóról mondható el. Ennek megfelelően a tanulmányban javasoltként bemutatott felszíni vizek és bányák térfogatszámításai csak közelítő értékkel szolgálnak, mely bizonytalanságot a részletes terepi felmérésekkel kell mérsékelni. A tanulmányban

bemutatott értékek az alkalmazott földrajzi vizsgálati lépték miatt jelen módszerekkel nem pontosíthatók.

A mintaterület jelentős részét érinti valamilyen természetvédelmi oltalmú kategória, olyan mértékben, hogy a legkedvezőbb helyszínek mindegyike ilyen területen fekszik.

Ez nem feltétlenül szab gátat egy beruházás számára, azonban ilyen esetekben fokozott óvatossággal kell eljárni a természeti környezet megóvása érdekében. Javasolt a választott helyszínek részletes környezeti hatásvizsgálata és a potenciális zavaró tényezők mérséklésére való törekvés.



9. ábra: Hegytetőn lévő külszíni fejtésű bánya, illetve a környezetében megfelelő adottságokkal rendelkező területek szivattyús energiatároló kialakításának céljából (példa). Az ábra a domborzat érzékeltetésének kedvéért a Z tengely mentén torzított
Figure 9: An open-pit mine on a mountaintop, or areas with suitable conditions in its surroundings, for the purpose of developing a pumped-hydro storage system (example). The figure is distorted along the Z axis to illustrate the relief

IRODALOMJEGYZÉK

Badarch, A. (2015). Hydropower scheme to strengthen CES of Mongolia. Project proposal-Final version <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2314.6489>

Crettenand, N. (2012). The Facilitation of Mini and Small Hydropower in Switzerland: Shaping the Institutional Framework (with a Particular Focus on Storage and Pumped-Storage Schemes), Thèse No 5356, École Polytechnique Fédérale de Lausanne

Dövényi Z. (2010). Magyarország kistájainak katasztere, MTA Földrajztudományi Kutatóintézet, p. 876.

Gimeno-Gutiérrez, M., Lacal-Arántegui, R. (2015). Assessment of the European potential for pumped hydro-power energy storage based on two existing reservoirs, Renewable Energy, vol. 75, pp 856-868. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.068>

Lu, B., Stocks, M., Blakers, A., Anderson, K. (2018). Geographic information system algorithms to locate prospective sites for pumped hydro energy storage, Applied Energy, vol. 222, pp 300-312. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.177>

Rogea, A., Girard, R., Kariniotakis G., (2017). A generic GIS-based method for small Pumped Hydro Energy Storage (PHES) potential evaluation at large scale,

Applied Energy, vol. 197, pp 241-253. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.103>

Saaty, T.L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process, European Journal of Operational Research, vol. 48., pp 9-26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)

Soha, T., Munkácsy, B., Harmat, Á., Csontos, Cs., Horváth, G., Tamás, L., Csüllög, G., Daróczi, H., Sáfián, F., Szabó, M. (2017). GIS-based assessment of the opportunities for small-scale pumped hydro energy storage in middle-mountain areas focusing on artificial landscape features, Energy, vol. 141, 2017, pp 1363-1373. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.051>

URL1. SZTFH térképszervert - <https://map.mbfisz.gov.hu>

URL2. CORINE Land Cover - <https://land.copernicus.eu/products/corine-land-cover>

URL3. OpenStreetMap - <https://www.openstreetmap.org>

URL4. <https://www.hydropower.org/>

URL5. <https://vizeink.hu/vizgyujto-gazdalkodasi-terv-2019-2021/vgt3-elfogadott/>

A SZERZŐK

SOHA TAMÁS okleveles geográfus, térinformatikus, doktorjelölt, 2022-től a Főpolgármesteri Hivatal alkalmazott térinformatikai szakreferense és a Budapesti Szolár térkép vezető fejlesztője. HUN-REN Energiatudományi Központ tudományos segédmunkatársa, illetve a F4STER – Future 4 Zrt. térinformatikusa. Kutatási témája a regionális léptékű térbeli energiatervezés, megújuló energiaforrások potenciálvizsgálata, a fenntartható környezetgazdálkodás és energetikai létesítmények telephelyválasztása többszemponútú döntéshozatali eljárásokkal. Jelen tanulmány mögötti vizsgálat vezetője.



JUHÁSZ KRISTÓF PÉTER energetikai mérnök, villamosmérnök, PhD-hallgató a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen (BME), a Villamos Energetika Tanszéken. Energetika mérnök BSc és villamosmérnök MSc diplomáját a BME-n szerezte, PhD-tanulmányait 2024 februárja óta folytatja. Kutatási érdeklődése a villamosenergia-rendszerek stabilitása, a rendszerinercia változásainak hatásai, az elosztóhálózatok megfigyelhetősége, valamint az okos hálózati megoldások és adatvezérelt üzemeltetés területeire fókuszál. 2022 óta mérnöktanácsadóként dolgozik az F4STER – Future 4 Zrt.-nél.



HARTMANN BÁLINT 2008-ban végzett okleveles villamosmérnökként a BME-n. 2013-ban szerzett tudományos fokozatot, 2022-ben habilitált, jelenleg a Villamos Energetika Tanszék tudományos főmunkatársa, illetve a HUN-REN Energiatudományi Központ tudományos főmunkatársa. Kutatási témáinak fókuszában az átviteli- és elosztóhálózatok topológiai tulajdonságainak, fejlődési folyamatának megismerése állnak, valamint annak feltárása, hogy az előbbiek hogyan befolyásolják a rendszer energia- és ellátásbiztonságát.



A Magyar Hidrológiai Társaság a Közép-Duna völgyi Területi Szervezettel, valamint az OVF Üzemi Szervezetével közösen a XLIII. Országos Vándorgyűlést Gödöllőn, a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem Szent István Campusán rendezi meg 2026. július 1. és 3. között.

A konferencia bemutató filmje itt tekinthető meg: Az MHT 2026. évi XLIII. Országos Vándorgyűlésének beharangozó filmje - YouTube

A előadásra történő jelentkezés módja és a formai követelmények részletesen az MHT honlapján olvashatóak: <https://www.hidrologia.hu/events/xliii-orszagos-vandorgyules/>

A Vándorgyűlésen való részvétel jelentkezési lapját ugyancsak az MHT honlapján és a májusi Hírekben teszik majd közzé.