

# Az alagútépítés során felmerülő földtani kockázati tényezők és hatásaik

## The geological risk factors and their impacts in tunnel construction

*BARTAKOVICS Edina<sup>1</sup>, TÖRÖK Ákos<sup>1</sup>*

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék  
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 1.,  
K épület magassföldszint 10.  
bartakovics.edina@emk.bme.hu  
torok.akos@emk.bme.hu

### Abstract

*With the continued development of infrastructure, construction in geologically unfavorable areas is becoming increasingly common, which highlights the importance of risk assessment in tunnel design and construction. This study provides an overview of the main geological risk factors and their impacts, with particular emphasis on heterogeneous rock masses and tectonic processes and presents a Bayesian-based approach to risk management. The objective of geotechnical risk management is the systematic handling of uncertainties and the support of well-informed engineering decision-making. The proposed framework may serve as a practical guideline for the design and construction of future tunnelling projects.*

**Keywords:** geological risk factors, tunnel, risk assessment, Bayesian-based approach

### Kivonat

*Az infrastruktúra fejlődésével egyre gyakoribbá válik a kedvezőtlen földtani adottságú területek beépítése, ami az alagúttervezés és kivitelezés során kiemeli a kockázatelemzés szerepét. Jelen tanulmány a főbb földtani kockázati tényezők és hatásaik áttekintését nyújtja, különös tekintettel a heterogén kőzettestekre és a tektonikai folyamatokra, valamint bemutat egy Bayes-alapú kockázatkezelési megközelítést. A geotechnikai kockázatkezelés célja a bizonytalanságok szisztematikus kezelése és a megalapozott mérnöki döntéshozatal támogatása. A bemutatott keretrendszer gyakorlati útmutatóként szolgálhat jövőbeni alagútépítési projektek tervezése és kivitelezése során.*

**Kulcsszavak:** földtani kockázati tényezők, alagút, kockázatelemzés, Bayes-alapú kockázatkezelés

## 1. BEVEZETÉS

Az alagútépítés legnagyobb bizonytalanságát a földtani közeg adja, mivel térben erősen változékony lehet és nem tárható fel teljesen előre. Azonban jelentősen befolyásolja a kivitelezést, a biztonságot, a költségvetést, valamint a kivitelezés határidejét. A változékony kőzetkörnyezet, kőzetminőség, a víz jelenléte, a törésszónák és szerkezeti gyengeségek, időfüggő deformációk, valamint az ásványtani és antropogén tényezők jelentős kockázatot hordozhatnak. Ezek hatása a kivitelezés során instabilitásban, vízbetörésekben, felszíni süllyedésekben vagy akár szerkezeti károsodásban is jelentkezhet.

Számos tanulmány készült alagutak kivitelezésével kapcsolatban, melyet Zhang és munkatársai (2022) foglaltak össze, bemutatva extrém geológiai és tektonikai kőzetkörnyezeteket és az alagútépítésben használt modern kockázat- és bizonytalanságkezelési módszereket. Ezek közé tartozik a végeelem módszer (RFEM), Monte-Carlo szimuláció, valamint a Bayes-alapú adatvezérelt módszerek. Ebben az összefoglalásban ez utóbbit fogom röviden bemutatni.

## 2. FONTOSABB FÖLDTANI KOCKÁZATI TÉNYEZŐK ÉS HATÁSAIK

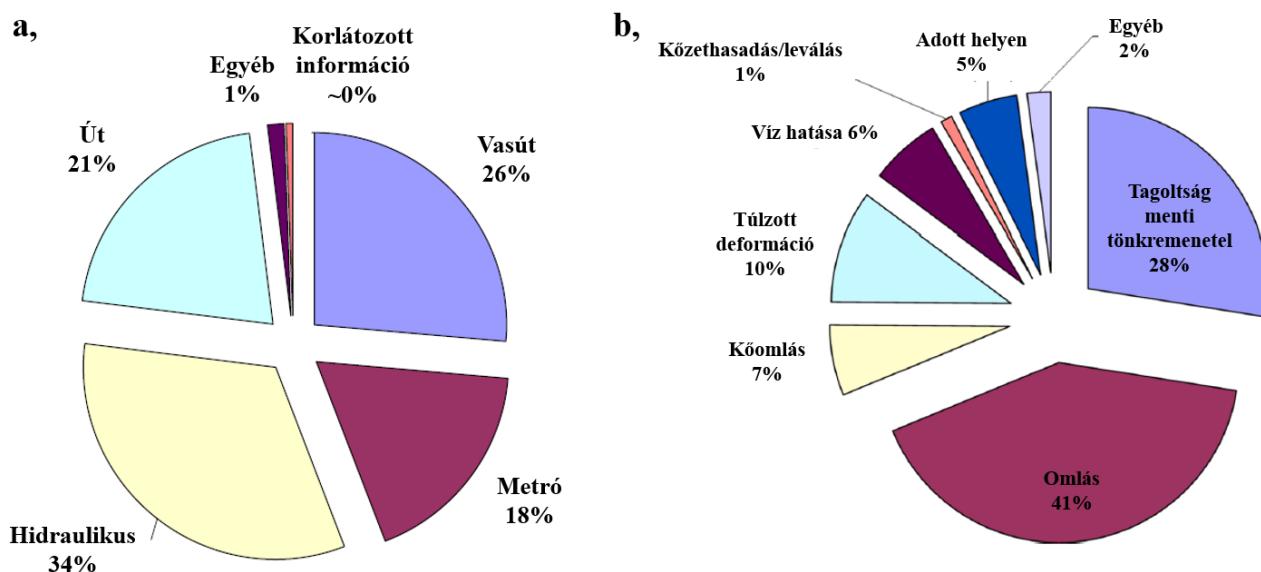
A föld alatti létesítmények tervezése során alapvető követelmény a vizsgált terület földtani, szerkezeti és hidrogeológiai viszonyainak részletes feltárása. A kőzettömeg viselkedése gyakran erősen anizotróp, ami jelentős hatással van a feszültegeloszlásra és az alakváltozásokra (Hoek 2007, Fortsakis et al. 2012). Ennek megfelelően a feltárások során kiemelt figyelmet kell fordítani a befogadó kőzetek törési mechanizmusára, anizotrópiájára, vízérzékenységére, valamint – különösen üledékes kőzetek esetében – a cementáció mértékére. A víz jelenléte és a hidro-mechanikai folyamatok alapvetően befolyásolják az alagút állékonyságát (Kong 2011).

A tektonikai adottságok – így a vetők, nyírási zónák és a repedezettség mértéke – szintén meghatározó szerepet játszanak. A kőzettömeg töredezettsége, illetve a víz hatására bekövetkező felpuhulás jelentős nyírószilárdság-csökkenést eredményezhet (Hoek és Brown 1997). Különösen kritikusak a vető- és nyírási zónák, amelyek gyakran gyengült, agyagos kitöltésű (fault gouge) zónákat tartalmaznak, és ezáltal jelentősen rontják az állékonysági viszonyokat (Hoek 2001).

Hoek (2001) gyenge vagy rossz minőségű kőzetként írja le azokat a kőzettömegeket, amelyek erősen repedezettek vagy töredezettek, alacsony szilárdságúak, vízzel telítettek, illetve magas in situ feszültségek alatt állnak – utóbbi különösen mélyvezetésű alagutak esetében releváns. Az alacsony szilárdság kritikus problémát jelent, ha a kőzettömeg szilárdságának és a helyszíni feszültségnek az aránya 0,2 alá csökken, túlzott deformáció (squeezing) léphet fel, ami instabilitáshoz vezet.

A kivitelezés során a fúrások és mintavételi pontok közötti zónák feltárásával gyakran olyan, előre nem jelzett földtani tényezők kerülnek felszínre, mint az eltérő rétegződés vagy a talaj- és kőzefizikai paraméterek várttól való eltérése. Cementált rétegek jelenléte például a talajkiszorításos cölöpözés vagy réselés során technológiai nehézségeket, akár elakadást is okozhat. Ezzel szemben a morzsalékos szerkezetű, vízzárásra alkalmatlan agyagok kedvezőtlenül befolyásolhatják az állékonyságot. További kockázatot jelentenek az előre nem azonosított rétegek, például vízzárónak tekintett agyagban megjelenő homoklencsék. A kivitelezés során pontosított paraméterek gyakran eltérnek a tervezési fázisban meghatározott, laboratóriumi vizsgálatokon alapuló értékektől (Lipovics et al. 2024).

Sousa és Einstein (2021) 206 alagútépítési balesetet feldolgozó adatbázisa alapján a kivitelezési problémák leggyakoribb oka az előre nem megfelelően feltárt kőzetviszonyokhoz, valamint a heterogén és töredezett zónák jelenlétéhez köthető. A felszín alatti viszonyok jelentős bizonytalansága miatt a földtani előrejelzés továbbra is az alagútépítés egyik legnagyobb kihívása. A baleseteket öt nagyobb csoportba sorolták: omlás, tagoltság menti tönkremenetel (daylight collapse), kőomlás, víz hatása, valamint túlzott deformáció (squeezing) (1. ábra). Az esetek mintegy 40%-ban omlás következett be, és az események több mint fele az alagút fejtési homlokának közelében történt, mivel ezen a részen a legnagyobb a feszültségváltozás és a bizonytalanság, ami a homlokstabilitást kiemelten kritikus kockázati tényezővé teszi.



1. ábra. Az alagutak használati (a) és a baleseti típusának (b) megoszlása (Sousa és Einstein 2021)

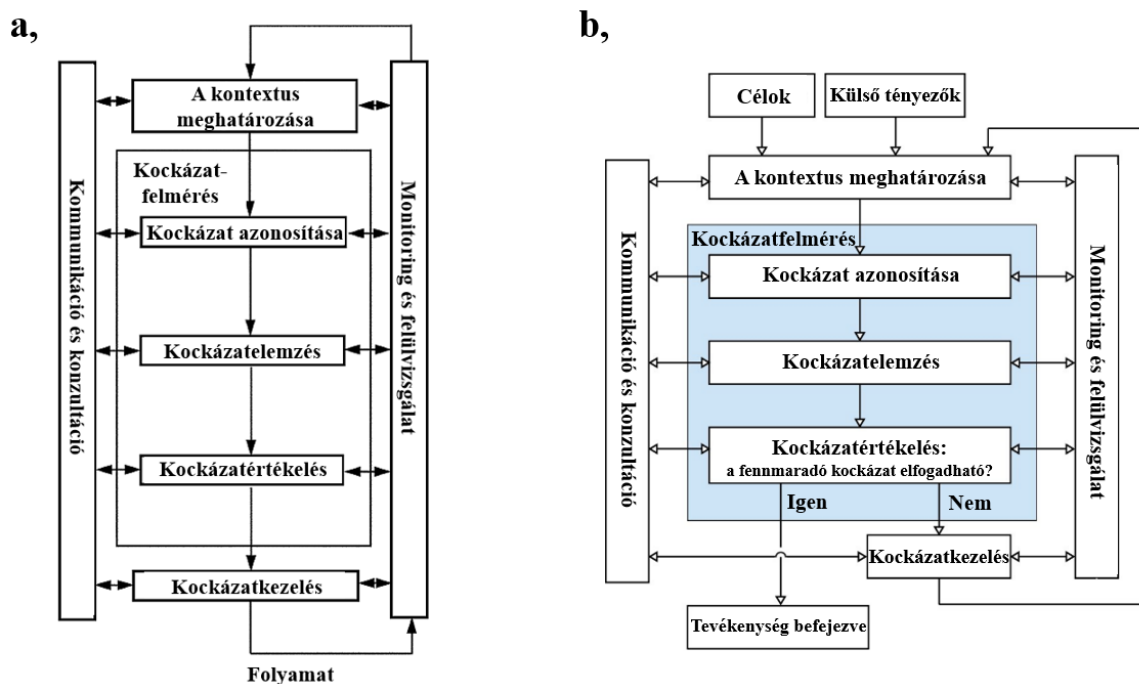
A balesetek kialakulása jellemzően nem egyetlen okra vezethető vissza, hanem több tényező együttes, láncolatszerű hatásának eredménye, amelyen belül a földtani tényezők domináns szerepet játszanak. A következmények széles skálán mozognak: a költségnövekedéstől és kivitelezési késedelmekből adódó problémáktól kezdve a szerkezeti és felszíni károkon át egészen a személyi sérülésekig, illetve halálesetekig terjedhetnek. A földtani bizonytalanság teljes mértékben nem szüntethető meg, ugyanakkor megfelelő döntéstámogatási és kockázatkezelési módszerekkel kezelhetővé tehető, ami indokolja a szisztematikus kockázatelemzés és az adaptív tervezési megközelítések alkalmazását. A szakirodalom és a szakértői beszámolók alapján az események között az omlások és a tagoltság menti tönkremenetelek jelennek meg a legnagyobb arányban. Ez azonban nem feltétlenül gyakoriságukat tükrözi, hanem inkább azt, hogy ezek az események járnak a legsúlyosabb következményekkel az építési folyamat, valamint a munkavállalók és a felszíni környezet biztonsága szempontjából (Sousa és Einstein 2021).

Hoek (2001) rámutat arra, hogy gyenge vagy rossz minőségű közettömegekben, különösen nagy átmérőjű (≈10–16 m) alagutak kivitelezése során nem elsősorban omlásos jelenségek dominálnak, helyette inkább jelentős deformációk és időfüggő stabilitási problémák (pl. „squeezing”) léphetnek fel. Ilyen környezetben a hagyományos, merev megtámasztási rendszerek alkalmazása gyakran nem megfelelő; helyettük rugalmas, deformációt megengedő szerkezetek szükségesek, amelyek együtt dolgoznak a közettömeggel. Ennek megfelelően kiemelt szerepet kap a megfigyelésen alapuló tervezési megközelítés, amely során a kivitelezés közbeni folyamatos monitoring eredményei alapján történik a tervek módosítása.

### 3. KOCKÁZATKEZELÉS

Brown (2012) átfogóan ismerteti a geotechnikai és kőzetmechanikai tevékenységek során alkalmazott kockázatkezelési módszereket és stratégiákat, különös tekintettel a nagyléptékű földalatti létesítmények biztonságos kivitelezésére. A kockázatot a nem kívánt esemény bekövetkezési valószínűségének és annak következményeinek szorzataként definiálja.

A kockázattértékelési megközelítések három fő csoportba sorolhatók: kvalitatív módszerek (pl. szakértői becslések, kategóriarendszerek), félig kvantitatív eljárások (pl. pontozásos rendszerek, kockázati mátrixok), valamint kvantitatív módszerek (pl. valószínűségi modellezés). A mérnöki gyakorlatban ezek kombinált alkalmazása jellemző. A földtani közeg heterogenitása miatt kiemelt jelentőséggel bír a folyamatos adatgyűjtés – ideértve a feltárásokat és monitoring tevékenységeket –, valamint az adaptív tervezési szemlélet.



2. ábra. A kockázatkezelési folyamat lépései  
(a, Standards Australia 2009 in Brown 2012 és b, Tidlund et al. 2023)

A kockázatmenedzsment folyamata a kockázatok azonosításával kezdődik, amelyet az elemzés és értékelés követ. Ezt követően kerül sor a kezelési intézkedések meghatározására (pl. megerősítési megoldások, tervezési módosítások), majd a monitoring és visszacsatolás zárja a ciklust (2. ábra). Brown (2012)

hangsúlyozza a megfigyeléses módszer (observational method) jelentőségét, amely lehetővé teszi a tervek módosítását a kivitelezés során tapasztalt közetkörnyezet viselkedése alapján.

A megfigyeléses módszer – amely Brown és Hoek egyik alapvető koncepciója – Tidlund és munkatársai (2023) tanulmányában is központi szerepet kap, és gyakorlati alkalmazásra is kerül egy izlandi közúti alagút projekt keretében. A módszer lépései a következők: előzetes terv kidolgozása, vészhelyzeti intézkedések meghatározása az előre feltételezett viszonyoktól való eltérés esetére, folyamatos monitoring a kivitelezés során, valamint a tervek iteratív módosítása a megfigyelések alapján, a végleges kialakítás eléréséig.

Sousa és Einstein (2012) egy olyan módszertani keretet mutatnak be, amely kifejezetten a geológiai bizonytalanság kezelésére szolgál, és lehetővé teszi a döntéshozatal folyamatos támogatását új adatok integrálásával. Megközelítésükben a kockázat a földtani környezet és a kivitelezési folyamat kölcsönhatásából ered. A módszer egy kezdeti modell felállításával indul, amelybe beépítik az elérhető adatokat, szakértői ismereteket és kezdeti valószínűségi becsléseket. A kivitelezés előrehaladtával, a feltárások és monitoring révén gyűjtött új információk folyamatosan frissítik a modellt. A modellalkotáshoz dinamikus Bayes-hálózatokat alkalmaznak, amelyek lehetővé teszik a valószínűségi összefüggések időbeli frissítését. Ennek eredményeként az előrejelzések pontossága fokozatosan javul. A módszert egy városi esettanulmányon (Porto Metro) validálták, ahol segítségével hatékonyan azonosították a problémás zónákat.

Brown (2012) szintén kiemeli a dinamikus Bayes-hálózatok alkalmazásának előnyeit, különösen abban a tekintetben, hogy képesek kezelni a döntések, kölcsönhatások és valószínűségek időbeli változását. E megközelítésben az egyes változókhoz tartozó feltételes valószínűségi eloszlások a projekt teljes életciklusa során folyamatosan frissíthetők az újonnan rendelkezésre álló információk alapján.

#### 4. KÖVETKEZTETÉSEK

Az alagútépítési balesetek jellemzően kedvezőtlen, különösen gyenge vagy heterogén földtani viszonyokhoz köthetők, és hatékonyan mérsékelhetők részletes geológiai feltárással, célzott előmegegerősítési technikák alkalmazásával, megfelelő támasztási rendszerek kialakításával, valamint folyamatos geotechnikai monitoringgal. Sousa és Einstein (2021) áttekintő munkája rámutat arra, hogy a balesetek többnyire nem egyetlen okra vezethetők vissza, hanem események láncolatának, illetve több egyidejű tényező és rendszerhiba együttes hatásának eredményei. A kiváltó okok között ugyanakkor kiemelt szerepet játszanak az előre nem kellően feltárt vagy nem megfelelően jellemzett földtani viszonyok, mint például a törésvonalak kiterjedése, egyéb gyengeségi zónák jelenléte.

Az alagúttervezés különösen nagy kockázati bizonytalansággal bír, mivel a közzettestek térbeli változékonysága csak korlátozottan ismerhető meg a kivitelezés megkezdése előtt. Ennek következtében elengedhetetlen a kockázatkezelési szemlélet érvényesítése már a tervezési fázisban, amelyet az építés során folyamatos monitoringgal és felülvizsgálattal kell kiegészíteni.

A korszerű geotechnikai gyakorlatban ezért egyre nagyobb hangsúlyt kapnak az adaptív, adatvezérelt megközelítések, mint például a megfigyeléses módszer, valamint a dinamikus Bayes-hálózatok alkalmazása, amelyek lehetővé teszik a kivitelezés során keletkező új információk folyamatos integrálását. Ezáltal javítható az előrejelzések megbízhatósága, csökkenthető a bizonytalanság, és növelhető az alagútépítési projektek biztonsága.

#### IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Brown E.T. *Risk Assessment and Management in Underground Rock Engineering - An Overview*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2012, 4 (3), 193-204. DOI: 10.3724/SP.J.1235.2012.00193
- [2] Fortsakis P., Nikas K., Marinos V., Marinos P. *Anisotropic* behaviour of stratified rock masses in tunnelling. Engineering Geology, 2012, 141–142, 74-83. DOI: 10.1016/j.enggeo.2012.05.001.
- [3] Hoek E., Brown E.T. Practical estimates of rock mass strength. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34 (8), 1165-1186. DOI: 10.1016/S1365-1609(97)80069-X
- [4] Hoek E. Big Tunnels in Bad Rock. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering - Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127 (9), DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:9(726)
- [5] Hoek E. *Practical Rock Engineering*. Evert Hoek Consulting Engineer, North Vancouver Canada, 2007.
- [6] Kong W.K. *Water Ingress Assessment for Rock Tunnels: A Tool for Risk Planning*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2011, 44, 755–765. DOI: 10.1007/s00603-011-0163-4
- [7] Lipovics T., Szendefy J., Vásárhelyi B. *Kockázatok elemzése a mélyépítésben*. Magyar Mérnöki Kamara Kiadványsorozata 124. FAP-2024/110-GT 2024.

- [8] Sousa, R.L., Einstein H.H. *Risk analysis during tunnel construction using Bayesian Networks: Porto Metro case study*. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 27, 86–100. DOI: 10.1016/j.tust.2011.07.003.
- [9] Sousa R.L., Einstein H.H. *Lessons from accidents during tunnel construction*. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 113(2008):103916 DOI: 10.1016/j.tust.2021.103916
- [10] Tidlund M., Spross J., Larsson S. *Observational method as risk management tool: the Hvalfjörður tunnel project, Iceland*. Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 2023, 17(2), 346–360. DOI: 10.1080/17499518.2022.2046784
- [11] Zhang W., Han L., Gu X., Wang L., Chen F., Liu H. *Tunneling and deep excavations in spatially variable soil and rock masses: A short review*. Underground Space, 2022, 7(3), 380-407. DOI: 10.1016/j.undsp.2020.03.003.