



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki Kar
Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék

Szigethi-Kocsis Ádám

BAZALT SZIKLAFALAK MAXIMUM ELMÉLETI MAGASSÁGA

KONZULENSEK

Dr. Vásárhelyi Balázs

Dr. Török Ákos

BUDAPEST, 2022

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	4
2. Elméleti áttekintés	5
2.1. Sziklafalak magasságának elméleti korlátai	5
2.1.1. Barton elméleti levezetése.....	5
2.1.2. Függőleges sziklafalak a világban.....	7
2.1.3. Magyarországi bazalt kőfejtők sziklafalai.....	10
2.2. Kőzettestek szilárdsága.....	12
2.2.1. Kőzetek törési feltételei	13
2.2.2. Geológiai szilárdsági index	13
3. Magyarországi sziklafalak vizsgálata	16
3.1. Bazalt sziklafalak elméleti magassága magyarországi kőfejtők esetén	16
3.2. Eredmények ellenőrzése végeselemes szoftverrel	23
4. 1 000 méter körüli bazalt sziklafalak vizsgálata	26
4.1. Az Amfiteátrum-hegy Dél-Afrikában.....	26
4.2. A Drakensbergi bazaltláva összlet tulajdonságai.....	27
4.3. Elméletileg lehetséges sziklafal magasságok.....	27
4.4. Végeselemes számítások	28
5. Következtetések	31
Irodalomjegyzék	32

Ábrajegyzék

1. ábra: Kőzettest osztályozás GSI szerint [11]	14
2. ábra: A Poisson-tényező, GSI és kritikus sziklafalmagasság (H_c) összefüggése három vizsgált szilárdságú bazalt esetén	18
3. ábra: GSI érték és H_c összefüggése kis szilárdságú ($UCS = 100$ MPa) bazalt esetén	19
4. ábra: GSI érték és H_c összefüggése közepes szilárdságú ($UCS = 150$ MPa) bazalt esetén	19
5. ábra: GSI érték és H_c összefüggése nagy szilárdságú ($UCS = 200$ MPa) bazalt esetén	20
6. ábra: Poisson-tényező és H_c összefüggése kis szilárdságú ($UCS = 100$ MPa) bazalt esetén	20
7. ábra: Poisson-tényező és H_c összefüggése közepes szilárdságú ($UCS = 150$ MPa) bazalt esetén	21
8. ábra: Poisson-tényező és H_c összefüggése nagy szilárdságú ($UCS = 200$ MPa) bazalt esetén	21
9. ábra: A Poisson-tényező, GSI és kritikus sziklafalmagasság (H_c) összefüggése H_c -t logaritmikus skálán ábrázolva	22
10. ábra: Kialakuló csúszólapok függőleges sziklafalak esetén	24

Képjegyzék

1. kép: Great Trango Tower, Pakisztán [3]	7
2. kép: El Capitan, Kalifornia [4]	8
3. kép: Enniberg fok, Feröer-szigetek [6]	9
4. kép: Los Gigantes, Tenerife, Kanári-szigetek [7]	9
5. kép: Simien-hegység, Etiópia [8]	10
6. kép: Sárkány-hegység, Lesotho és Dél-Afrika határa [9]	10
7. kép: Badacsonytomaji felhagyott kőfejtő homlokfala [10]	11
8. kép: Uzsa környékén lévő működő kőfejtő [10]	12
9. kép: Vindornyaszőlős térségében található időszakosan működő kőfejtő [10]	12
10. kép: Az Amfiteátrum-hegy a Sárkány-hegységben [14]	26

Táblázatjegyzék

1. táblázat: Kőzettest jellemzői kis szilárdságú ($UCS = 100$ MPa) kőzet esetén	16
2. táblázat: Kőzettest jellemzői közepes szilárdságú ($UCS = 150$ MPa) kőzet esetén	17
3. táblázat: Kőzettest jellemzői nagy szilárdságú ($UCS = 200$ MPa) kőzet esetén	17
4. táblázat: Kritikus sziklafal magasságok (H_c) a GSI és Poisson-tényező függvényében kis szilárdságú kőzet ($UCS = 100$ MPa) esetén	17
5. táblázat: Kritikus sziklafal magasságok (H_c) a GSI és Poisson-tényező függvényében közepes szilárdságú kőzet ($UCS = 150$ MPa) esetén	18
6. táblázat: Kritikus sziklafal magasságok (H_c) a GSI és Poisson-tényező függvényében nagy szilárdságú kőzet ($UCS = 200$ MPa) esetén	18
7. táblázat: A vizsgált változatok bemenő adatai és a hozzájuk tartozó globális állékonyság biztonságok	23
8. táblázat: Globális biztonság változása különböző Poisson-tényező értékek esetén	25
9. táblázat: A Drakensbergi bazaltok kőzetmechanikai tulajdonságai [16]	27
10. táblázat: Lehetséges maximum sziklafal magasságok Drakensberg bazalt esetén	28
11. táblázat: A kialakult csúszólapok és a hozzájuk tartozó biztonságok	30

1. Bevezetés

Kivonat

Jelen dolgozat célja a sziklafalak elméleti magassági korlátjainak áttekintése, összefoglalása, valamint kitekintés külföldi példákra. A tanulmány során a kőzettestek szilárdságát figyelembe vevő paraméterek áttekintése után következtetni lehet a magyarországi bazalt sziklafalak és kőfejtők lehetséges elméleti magasságára a kőzettest minősége (GSI), Poisson-tényezője és egyirányú nyomószilárdság függvényében. A szabadon álló bazaltfalak elméleti magasságát a számítások mellett látványos ábrákkal illusztrálva mutatja be a dolgozat.

Abstract

The aim of the present study is to review and summarize the theoretical height limits of rock faces and free-standing cliffs, based on examples from international studies. After reviewing the parameters that influence the stability of cliffs, such as the strength of the rock bodies, I can deduce the possible theoretical height of the Hungarian basalt quarries and cliffs as a function of the quality of rock bodies (GSI), Poisson's ratio and unidirectional compressive strength. Besides calculations the current work also illustrates the results with explanatory spectacular figures.

2. Elméleti áttekintés

Az alábbi fejezetben áttekintem a sziklafalak függőleges magasságának elméleti korlátait Barton szerint [1], valamint a kőzettestek törési határfeltételének és szilárdságának elméleti hátterét.

2.1. Sziklafalak magasságának elméleti korlátai

A természetben véges szilárdságú anyagok fordulnak elő, ezért az ezekből az anyagokból álló hegyek, sziklák, szerkezetek és egyéb formációk lehetséges méretei korlátozottak. A projekt során a természetben előforduló sziklafalak, illetve egyéb függőleges formációk méreteinek elméleti határait keressük. A témával Nick Barton brit mérnökgeológus, kőzetmechanikus foglalkozott részletesen. [1]

2.1.1. Barton elméleti levezetése

Talajmechanika feltételrendszer alapján a kritikus magasságot, azaz azt a magasságot, amiben egy adott talaj még függőlegesen megáll, a passzív és az aktív földnyomások függvényéből adódóan az alábbi képlettel számoljuk:

$$H_c = \frac{2c}{\gamma}, \quad (2.1)$$

ahol a c – a kohézió és a γ – a talaj térfogatsúlya. [1]

Azonban kőzetek esetén ez a módszer túlbecsüli a kritikus magasságot. A természetben előforduló közel függőleges sziklafalak magassága 1 300 méter körül tetőzik, a legmagasabb ismert függőleges sziklafal az 1 340 méter magas Great Trango Tower a pakisztáni Karakorum-hegységben. A talajmechanikából ismertetett képlet azonban 3600-4800 méter magas egybefüggő sziklafalak létét is megengedné, tehát átlagosan 3-6-szorosan becsüli túl a talajmechanikai képlet a valóságban előforduló sziklafal magasságokat. [1]

Barton ezen ellenmondások alapján kezdett el vizsgálni [1]. Elmélete alapján rideg kőzetek általában húzásra mennek tönkre, még akkor is, ha mindegyik főfeszültségi irányban nyomófeszültségek vannak. Ennek oka a harántkontrakció,

aminek mértékegysége a Poisson-tényező (ν). Minél nagyobb harántkontrakció jön létre nyomófeszültségek hatására, annál nagyobb húzófeszültségek ébredhetnek a kőzetben. Így nyírófeszültségek is ébrednek a kőzetekben, amelyek hatására rideg, kevésbé töredezett kőzetek tönkremehetnek. Ez alapján a természetben lehetséges sziklafal magasságokat az adott kőzet Poisson-tényezője fordítottan arányosan, míg húzószilárdsága egyenesen arányosan határozza meg. Barton levezetése alapján ép kőzet esetén a sziklafal kritikus magasság [1]:

$$H_c = 100 \cdot \frac{\sigma_t}{\nu \cdot \gamma}, \quad (2.2)$$

ahol

- σ_t – a kőzet húzószilárdsága MPa-ban,
- ν – a Poisson-tényező (dimenzió nélküli),
- γ – a kőzet térfogatsúlya t/m³-ben.

A képletben a 100-as szorzó csupán a mértékegységek közötti összhangot kezeli annak érdekében, hogy a kőzetmechanika szilárdsági egységek értékét könnyedén MPa-ban lehessen behelyettesíteni a képletben.

Az ép kőzet (σ_c) nyomó- és (σ_t) húzószilárdság hányadosát a (B) Brinke számmal jellemezhetjük, ami a hibahatáron belül bizonyíthatóan megegyezik az (m_i) Hoek-Brown állandóval: [2]

$$B = \frac{\sigma_c}{\sigma_t} \approx m_i \quad (2.3)$$

Az előbbi képletet átrendezve a húzószilárdságra, majd beírva a kőzetek esetén ismertett kritikus magasság képletébe, a következő összefüggést kapjuk, ahol nyomószilárdság függvényében kapjuk meg a kritikus magasság értékét:

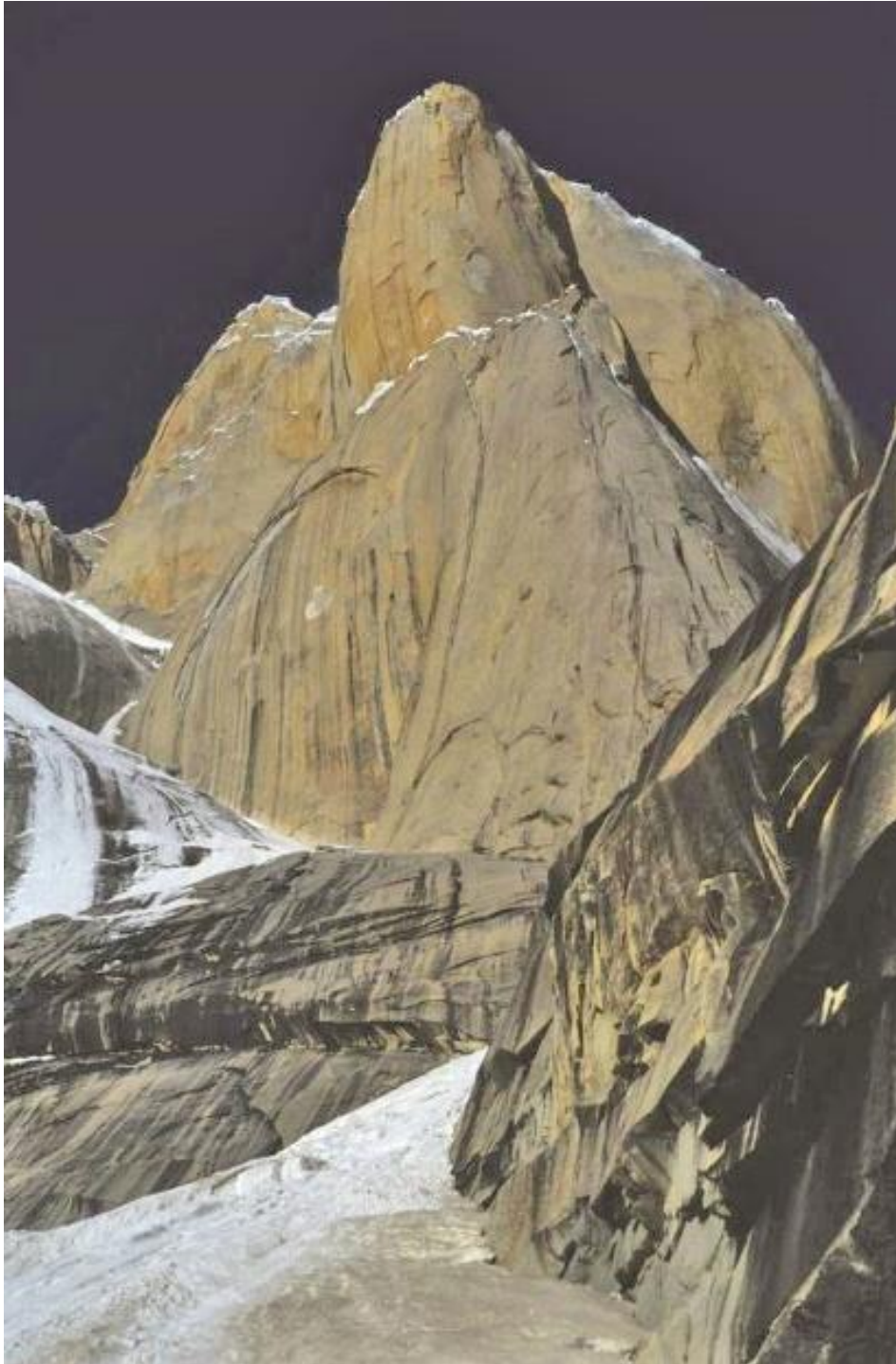
$$\sigma_t = \frac{\sigma_c}{m_i}, \quad (2.4)$$

$$H_c = 100 \cdot \frac{\sigma_c}{\nu \cdot \gamma \cdot m_i}. \quad (2.5)$$

Azaz a kritikus magasság a kőzet nyomószilárdságának (σ_c) és Hoek-Brown állandójának (m_i) hányadosától függ a Poisson-tényező (ν) és a térfogatsúly (γ) mellett.

2.1.2. Függőleges sziklafalak a világban

Az előző fejezetben már említésre került, hogy a természetben előforduló függőleges sziklafalak magassága 1 300 méter körül tetőzik. A legmagasabb sziklafal az 1 340 méter magas gránit Great Trango Tower a pakisztáni Karakorum-hegységben (1. kép). [1]



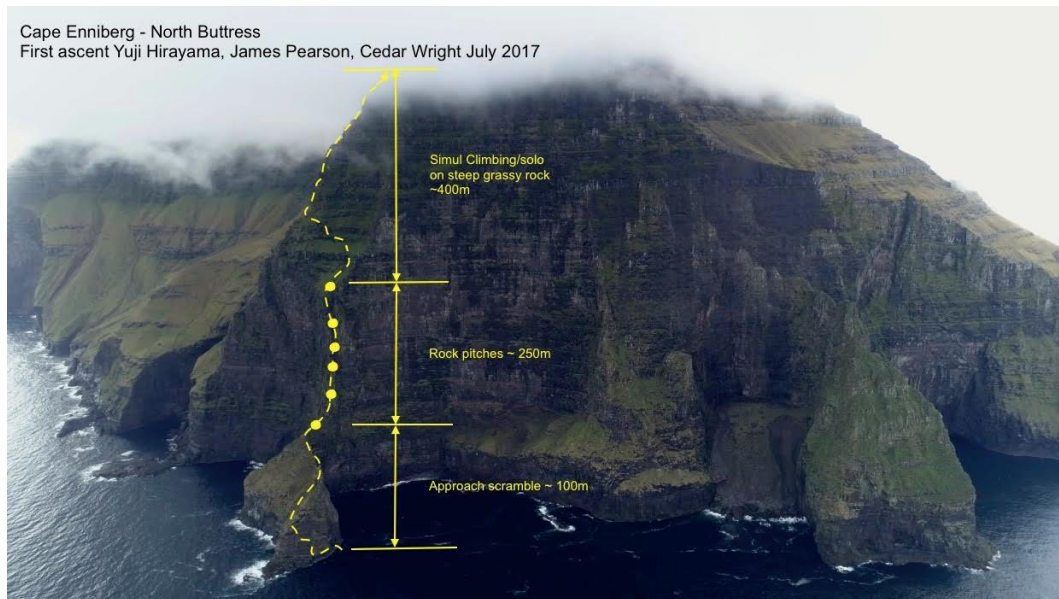
1. kép: Great Trango Tower, Pakisztán [3]

Nagyon híres a kaliforniai Yosemite nemzeti parkban található El Capitan több mint 1 000 méter magas gránit fala (2. kép). [1]



2. kép: El Capitan, Kalifornia [4]

A bazalt sziklafalak vizsgálata során érdemes egy pillantást vetni a világon található jelentősebb bazalt sziklafalakra is. Mivel a bazalt mechanikai tulajdonságai miatt ridegebben viselkedik és repedezettebb, mint a gránit, ezért a természetben előforduló bazalt sziklafalak magassága kis mértékben elmarad a gránitból álló sziklafalakétól. Bazalt sziklák a világ sok pontján megtalálhatóak, a bazalt egy igen gyakori kőzet. A bazalt egyik fő előfordulási területe az óceáni hátságok környezete (például Izland szigete), illetve az úgynevezett forróponti vulkanizmus során létrejött szigetek (például Hawaii-szigetek). Forróponti vulkanizmus során jöttek létre például a Feröer-szigetek, ahol megtalálhatjuk például az Enniberg-fok kb. 750 méter magas bazalt szirtjét (3. kép), vagy a Kanári-szigetek, ahol a Los Gigantes 600 méter magas bazalt sziklái csodálhatjuk meg (4. kép). [5]



3. kép: Enniberg fok, Feröer-szigetek [6]



4. kép: Los Gigantes, Tenerife, Kanári-szigetek [7]

A világon további jelentős bazalt előfordulási helyek a kontinensek feldarabolódása során keletkezett nagy kiterjedésű bazalt fennsíkok. Ilyen fennsíkok találhatóak többek között Észak-Amerikában a Columbia folyó medencéjében, Dél-Braziliában, Indiában a Dekkán fennsíkon, Szibériában, Dél-Afrikában, illetve az Etióp fennsík is így keletkezett. Ezen fennsíkok peremén sokszor magas, akár 1 000 métert elérő vagy meghaladó sziklafalak találhatóak, mint például az etiópiai Simien-hegységben (5. kép) vagy a Lesothói fennsíkot határoló Sárkány-hegységben, Dél-Afrikában (6. kép). [5]



5. kép: Simien-hegység, Etiópia [8]



6. kép: Sárkány-hegység, Lesotho és Dél-Afrika határa [9]

2.1.3. Magyarországi bazalt kőfejtők sziklafalai

Hazánkban, Magyarországon is találhatunk bazalt kőzeteket a Szent György-hegyi bazaltorgonákon kívül számos helyen, főleg a Bakonyban és a Balaton-felvidéken. [10]

Felhagyott kőfejtőként a Badacsonytomaj és Badacsonytördemic községek környékén található kőfejtőket érdemes megemlíteni, ahol piroklaszt rétegekre települt bazaltot tártak fel. A bazalt ezeken a helyeken oszlopos és pados formában jelenik meg a hegy oldalában, az oszlopok átmérője akár több deciméter is lehet. [10]



7. kép: Badacsonytomaji felhagyott kőfejtő homlokfala [10]

Jelenleg is működő kőfejtőként az Uzsza község térségében található kőfejtő említhető meg példaként, ahol a bazalt piroklasztikus vulkáni képződmények szintén a neogén üledékes kőzetekre települtek. Piroklasztikus kőzetek halmozódtak fel a freatomagmás vulkanizmus kezdeti fázisában, ami során tufagyűrű keletkezett. Ezt követő fázisban nyomult a felszínre a bazalt, ami többnyire oszlopos formát öltött. Az oszlopok átmérője több deciméter itt is és magasságuk elérheti akár a 20 métert is. Jelenlegi megállapítások szerint a lávaömlés többször megismétlődhetett, ami során párnaláva zónák alakultak ki a bányák különböző szintjeiben. [10]



8. kép: *Uzsa környékén lévő működő kőfejtő [10]*

A Vindornyaszőlős térségében időszakosan működő bánya pliocén korú bazaltot tár fel, amely üledékes kőzetbe nyomult maradvány. A bazalt itt is oszlopos elválású és sötétszürke színű. Az üledékes kőzetek és a bazalt érintkezése nem figyelhető meg a kőfejtő oldalfalán. [10]



9. kép: *Vindornyaszőlős térségében található időszakosan működő kőfejtő [10]*

2.2. Kőzettestek szilárdsága

A kőzettestek szilárdsága az egyik legfontosabb anyagjellemző a tagoltság mellett kőzetmechanikai és mérnökgeológiai szempontból.

2.2.1. Kőzetek törési feltételei

A kőzetek tönkremenetelének meghatározására számos törési határgörbe ismert. Ezek közül a két legjelentősebb, amelyeket az építőmérnöki gyakorlatban is használnak, a Mohr-Coulomb és a Hoek-Brown törési kritériumok határfeltételei. A Mohr-Coulomb elméletet Mohr dolgozta ki a 19. században Coulomb munkássága alapján. Az elmélet alapján a törést okozó (τ) nyírószilárdságot a (σ) nyomószilárdság függvényében határozza meg:

$$\tau = c' + \sigma \tan \phi', \quad (2.6)$$

ahol a c' – a kőzet (vagy talaj) hatékony kohéziója, míg a ϕ' – a hatékony belső súrlódási szög. [11]

Az egyenlet megfelelője főfeszültségi irányokkal kifejezve a következő: [11]

$$\sigma_1' = \frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} + \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \sigma_3'. \quad (2.7)$$

1980-ban két mérnökgeológus, Hoek és Brown egy újabb törési kritériumot dolgozott ki, mely azóta széles körben elterjedt. Az elmélet egyik előnye, hogy nem csak ép kőzetre, hanem töredezett kőzetre is vonatkoztatható. Ép kőzet esetén a Hoek-Brown törési kritérium a következő: [11]

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m_i \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0.5}. \quad (2.8)$$

Az összefüggésben a σ_{ci} az ép kőzet egyirányú nyomószilárdságát jelöli, míg az m_i a Hoek-Brown állandó. A képlet kiterjeszthető töredezett kőzetekre is, mely a következő fejezetben kerül kifejtésre. [11]

2.2.2. Geológiai szilárdsági index

A Hoek-Brown törési kritérium töredezett kőzetre való kiterjesztéséhez Hoek 1994-ben kifejlesztette a GSI (Geological Strength Index – geológiai szilárdsági index) kőzettest minősítési módszert. A GSI alapján történő kőzettest minősítési módszer az adott kőzettest két tulajdonságára, a kőzettest szerkezetére, illetve a tagoltságok állapotára fókuszál. Adott kőzettestet jellemző GSI értéket az alábbi ábra alapján lehet meghatározni. [11]

GEOLÓGIAI SZILÁRDSÁGI INDEX (GSI) MEGHATÁROZÁSA		TAGOLÓFELÜLET ÁLLAPOTA				
SZERKEZET		CSÖKKENŐ FELÜLETI MINŐSÉG →				
	ÉP VAGY TÖMÖR-ép próbatestek, vagy tömör kőzettest néhány ritkán elhelyezkedő diszkontinuitással	A KÖZETTÖMBÖK KAPCSOLATÁNAK CSÖKKENÉSE				
	BLOKKOS - nagyon jól összekapcsolódó ép kőzettest, mely kocka-tömböket tartalmaz, melyeket három orthogonális diszkontinuitás szabdal	90	80	70	60	N/A
	NAGYON BLOKKOS - összekapcsolódó, részlegesen töredezett kőzettest, melyet négy vagy annál több diszkontinuitás szabdal	70	60	50	40	30
	BLOKKOS / TÖREDEZETT / REPEDEZETT - szögletes kőtömbökből álló gyűrt kőzettest, melyet számos egymást keresztező diszkontinuitás szabdal. Folytonos vagy palás rétegződés.	60	50	40	30	20
	SZÉTESŐ -rosszul összekapcsolódó, erősen töredezett kőzettest, mely érdes és kopott törmelékből áll	50	40	30	20	10
	RÉTEGZETT/NYÍRT -blokkosság hiánya a sűrű töredezett palás rétegződés vagy nyírási felületek miatt	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
		NAGYON JÓ - nagyon érdes és üde felülettel				
		JÓ - érdes kissé mállott vagy vasfoltos felülettel				
		TÜRHEŐ - sima és mérsékelten mállott és átalakult felülettel				
		GYENGE - simára kopott, erősen mállott felületek vagy szögletes törmelékkel kitöltött réteg				
		NAGYON GYENGE -puha agyaggal kitöltött simára kopott és erősen mállott felületek				

1. ábra: Kőzettest osztályozás GSI szerint [11]

A GSI érték alapján számolhatóak a paraméterek a töredezett kőzettestre vonatkoztatott Hoek-Brown törési kritériumhoz. E paraméterek az m_b töredezett kőzettestre vonatkozó Hoek-Brown állandó, illetve az S és a paraméterek: [11]

$$m_b = m_i e^{\frac{GSI-100}{28-14D}}, \quad (2.9)$$

$$S = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}}, \quad (2.10)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right). \quad (2.11)$$

Az egyenletekben szereplő D ismeretlen a zavartsági fok, mely azt mutatja, hogy a kőzettest mennyire zavart mesterséges hatások (pl. robbantásos fejtés) által. Értéke 0 természetes kőzetek esetén, míg robbantott, mesterségesen nagyon zavart esetben értéke akár 1 is lehet. [11]. Egyértelmű, hogy természetes sziklafalak esetén értéke 0-ra vehető fel.

A fent ismertetett paramétereket felhasználva a 3.2. fejezetben bemutatott Hoek-Brown kritérium a következőképpen írható fel töredezett kőzettestek esetén: [11]

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + S \right)^a. \quad (2.12)$$

Ha ép kőzetet nézünk, azaz a GSI értéke 100, visszakapjuk az ép kőzetre vonatkozó egyenletet, az m_b értéke ebben az esetben az m_i -vel lesz egyenlő, míg az S értéke 1, az a -é pedig 0,5 lesz. [11]

Az m_b , S és a értékek ismeretében kiszámíthatóak a töredezett kőzettest egyirányú nyomószilárdság (σ_{cm}), illetve húzószilárdság (σ_{tm}) értékei is: [11]

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} S^a, \quad (2.13)$$

$$\sigma_{tm} = -\frac{S \sigma_{ci}}{m_b}. \quad (2.14)$$

3. Magyarországi sziklafalak vizsgálata

Az áttekintett elméleti korlátok alapján számításokkal meghatároztam a bazalt sziklafalak elméleti magasságát eltérő anyagjellemzőket feltételezve.

3.1. Bazalt sziklafalak elméleti magassága magyarországi kőfejtők esetén

A dolgozatomban megvizsgáltam, hogy hogyan változik a bazalt sziklafalak kritikus magassága a kőzettest minőség (GSI), annak Poisson-tényezőjének és egyirányú nyomószilárdságának függvényében. A számítások során a 100 és 20 között változó GSI értékeket, 0,1 és 0,45 között változó Poisson-tényezőket, illetve három UCS értéket (100 MPa – kis szilárdságú bazalt, 150 MPa – közepes szilárdságú bazalt, 200 MPa – nagy szilárdságú bazalt) vettem figyelembe. A kőzet fajsúlyát és Hoek-Brown állandóját állandónak, a fajsúlyt $27,9 \text{ kN/m}^3$, azaz $2,79 \text{ t/m}^3$ értékkel, míg a Hoek-Brown állandót (mi) a Practical Rock Engineering [11] ajánlása alapján 25 értékkel vettem figyelembe. A zavartsági fokot (D) zavartalannak feltételeztem, azaz 0 értékkel számoltam.

A számítások során elsőként a kőzettest mechanikai tulajdonságait számoltam ki a GSI értékek alapján. Ezen számításokat az 1-3. táblázatok tartalmazzák.

1. táblázat: Kőzettest jellemzői kis szilárdságú ($UCS = 100 \text{ MPa}$) kőzet esetén

GSI	m_b	S	a	σ_c [MPa]	σ_t [MPa]
100	25	1	0,5	100	4
90	17,49	0,3292	0,5002	57,36	1,88
80	12,24	0,1084	0,5006	32,88	0,89
70	8,56	0,0357	0,5014	18,80	0,42
60	5,99	0,0117	0,5028	10,70	0,20
50	4,19	0,0039	0,5057	6,02	0,09
40	2,93	0,0013	0,5114	3,31	0,04
30	2,05	0,0004	0,5223	1,72	0,02
20	1,44	0,0001	0,5437	0,80	0,01

2. táblázat: Kőzettest jellemzői közepes szilárdságú ($UCS = 150 \text{ MPa}$) kőzet esetén

GSI	m_b	S	a	σ_c [MPa]	σ_t [MPa]
100	25	1	0,5	150	6
90	17,49	0,3292	0,5002	86,04	2,82
80	12,24	0,1084	0,5006	49,31	1,33
70	8,56	0,0357	0,5014	28,20	0,62
60	5,99	0,0117	0,5028	16,05	0,29
50	4,19	0,0039	0,5057	9,03	0,14
40	2,93	0,0013	0,5114	4,96	0,07
30	2,05	0,0004	0,5223	2,58	0,03
20	1,44	0,0001	0,5437	1,19	0,01

3. táblázat: Kőzettest jellemzői nagy szilárdságú ($UCS = 200 \text{ MPa}$) kőzet esetén

GSI	m_b	S	a	σ_c [MPa]	σ_t [MPa]
100	25	1	0,5	200	8
90	17,49	0,3292	0,5002	114,73	3,76
80	12,24	0,1084	0,5006	65,75	1,77
70	8,56	0,0357	0,5014	37,60	0,83
60	5,99	0,0117	0,5028	21,40	0,39
50	4,19	0,0039	0,5057	12,05	0,18
40	2,93	0,0013	0,5114	6,61	0,09
30	2,05	0,0004	0,5223	3,44	0,04
20	1,44	0,0001	0,5437	1,59	0,02

A kőzettestre vonatkozó nyomó- és húzószilárdságok kiszámolása után a kritikus sziklafal magasságokat állapítottam meg Barton képlete alapján. A számítások eredményei a 4-6. táblázatokban vannak összefoglalva.

4. táblázat: Kritikus sziklafal magasságok (H_c) a GSI és Poisson-tényező függvényében kis szilárdságú kőzet ($UCS = 100 \text{ MPa}$) esetén

GSI\ν	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45
100	1434	956	717	573	478	410	358	319
90	675	450	337	270	225	193	169	150
80	317	212	159	127	106	91	79	71
70	149	100	75	60	50	43	37	33
60	70	47	35	28	23	20	18	16
50	33	22	17	13	11	9,4	8,3	7,3
40	16	10	7,8	6,2	5,2	4,4	3,9	3,5
30	7,3	4,9	3,7	2,9	2,4	2,1	1,8	1,6
20	3,4	2,3	1,7	1,4	1,1	1,0	0,9	0,8

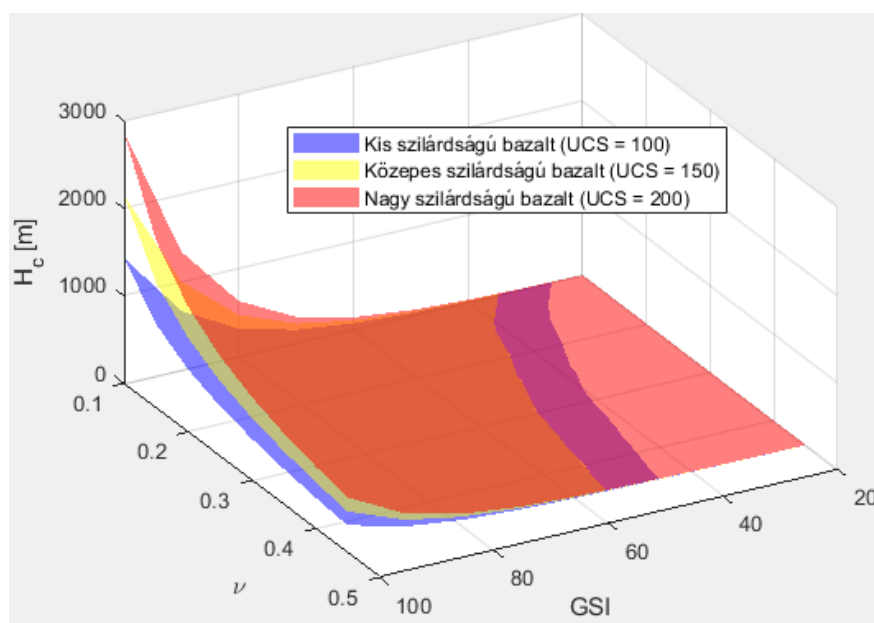
5. táblázat: Kritikus sziklafal magasságok (H_c) a GSI és Poisson-tényező függvényében közepes szilárdságú kőzet (UCS = 150 MPa) esetén

GSI\ ν	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45
100	2151	1434	1075	860	717	614	538	478
90	1012	675	506	405	337	289	253	225
80	476	317	238	190	159	136	119	106
70	224	149	112	90	75	64	56	50
60	105	70	53	42	35	30	26	23
50	50	33	25	20	17	14	12	11
40	23	16	12	9,3	7,8	6,7	5,8	5,2
30	11	7,3	5,5	4,4	3,7	3,1	2,7	2,4
20	5,2	3,4	2,6	2,1	1,7	1,5	1,3	1,1

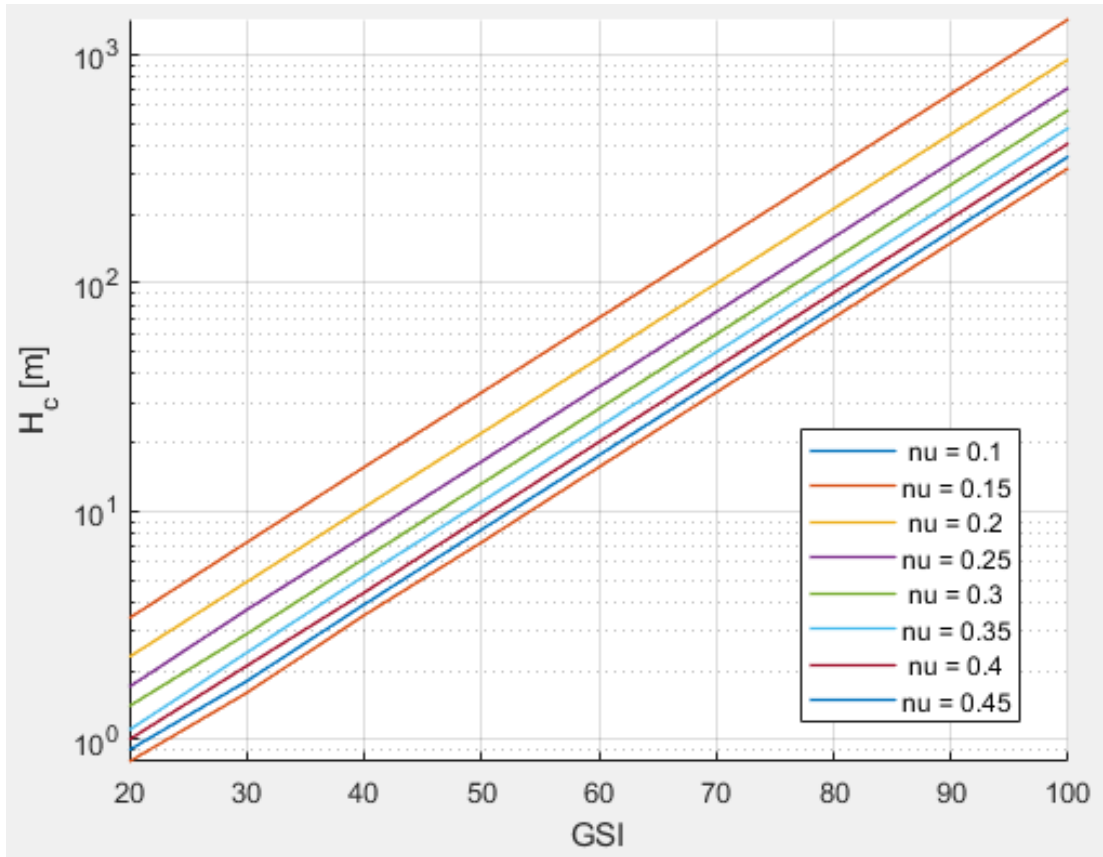
6. táblázat: Kritikus sziklafal magasságok (H_c) a GSI és Poisson-tényező függvényében nagy szilárdságú kőzet (UCS = 200 MPa) esetén

GSI\ ν	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45
100	2867	1912	1434	1147	956	819	717	637
90	1349	899	675	540	450	385	337	300
80	635	423	317	254	212	181	159	141
70	299	199	149	119	100	85	75	66
60	141	94	70	56	47	40	35	31
50	66	44	33	26	22	19	17	15
40	31	21	16	12	10	8,9	7,8	6,9
30	15	10	7,3	5,9	4,9	4,2	3,7	3,3
20	6,9	4,6	3,4	2,8	2,3	2,0	1,7	1,5

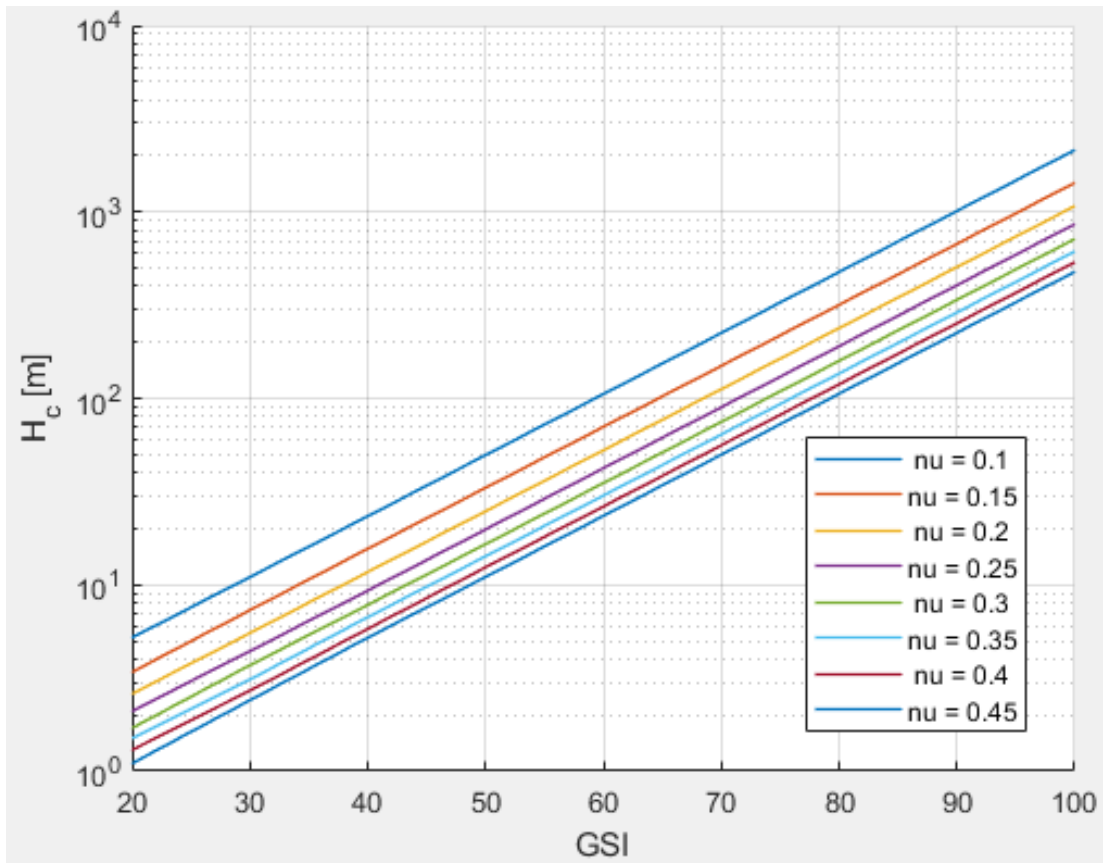
Ezután az eredményeket különböző módokon, 3D ábrázolási módszerekkel is ábrázoltam.



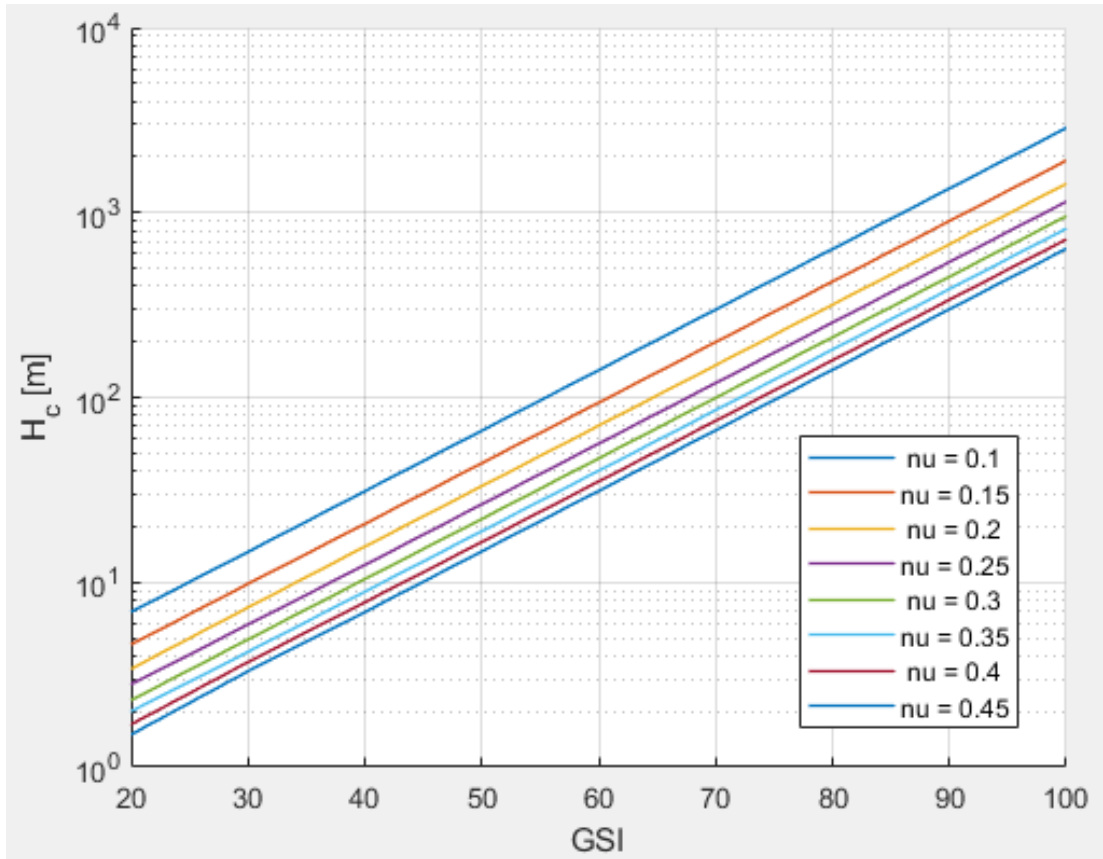
2. ábra: A Poisson-tényező, GSI és kritikus sziklafal magasság (H_c) összefüggése három vizsgált szilárdságú bazalt esetén



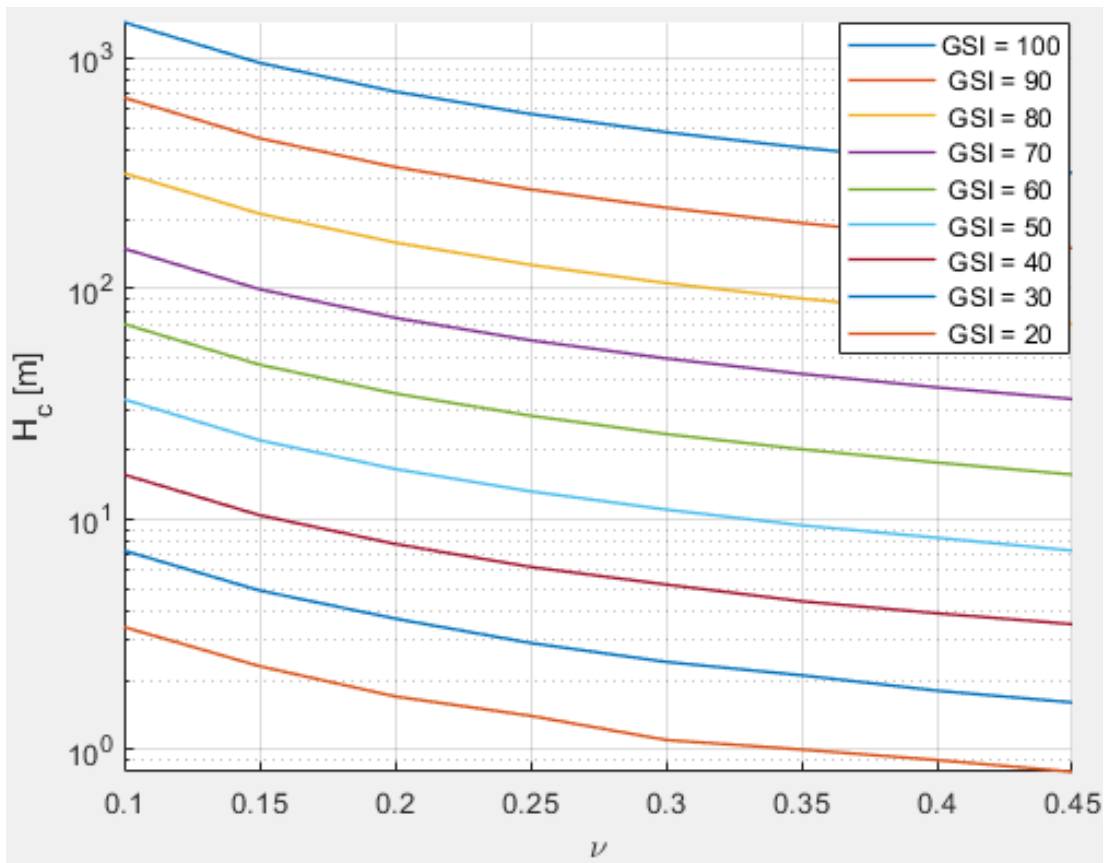
3. ábra: GSI érték és H_c összefüggése kis szilárdságú ($UCS = 100$ MPa) bazalt esetén



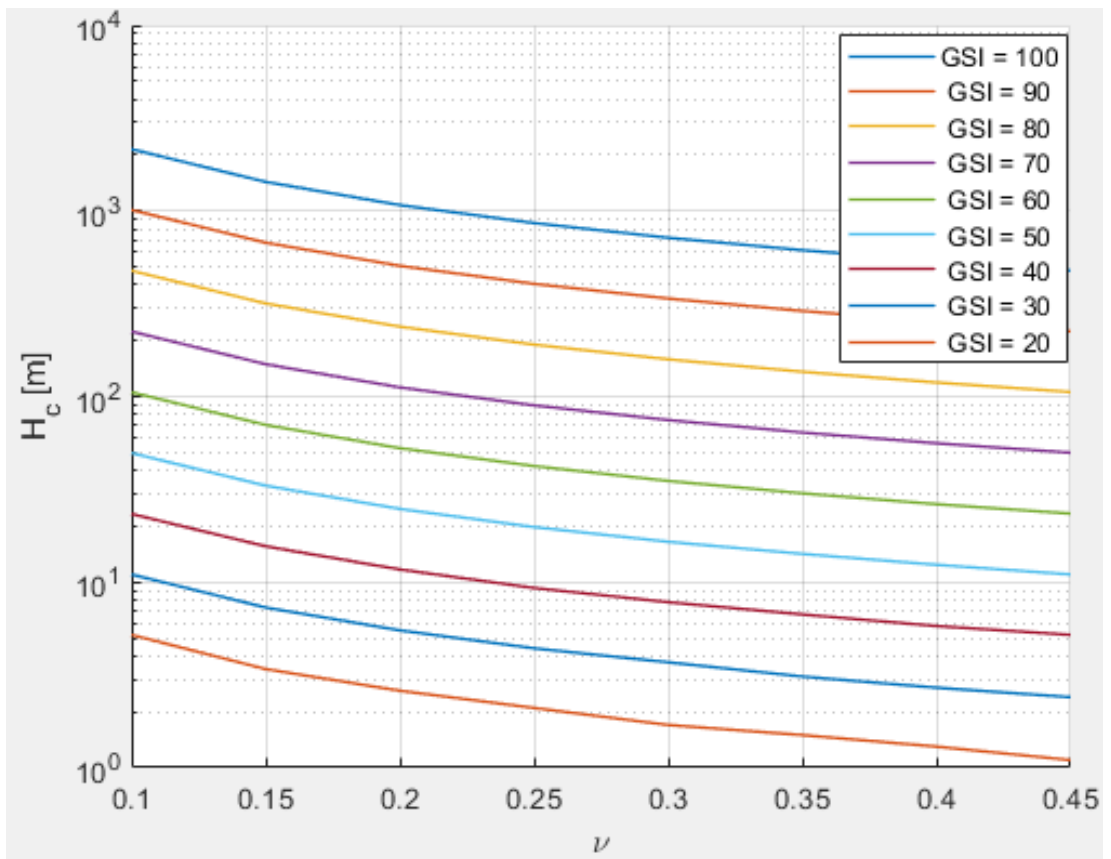
4. ábra: GSI érték és H_c összefüggése közepes szilárdságú ($UCS = 150$ MPa) bazalt esetén



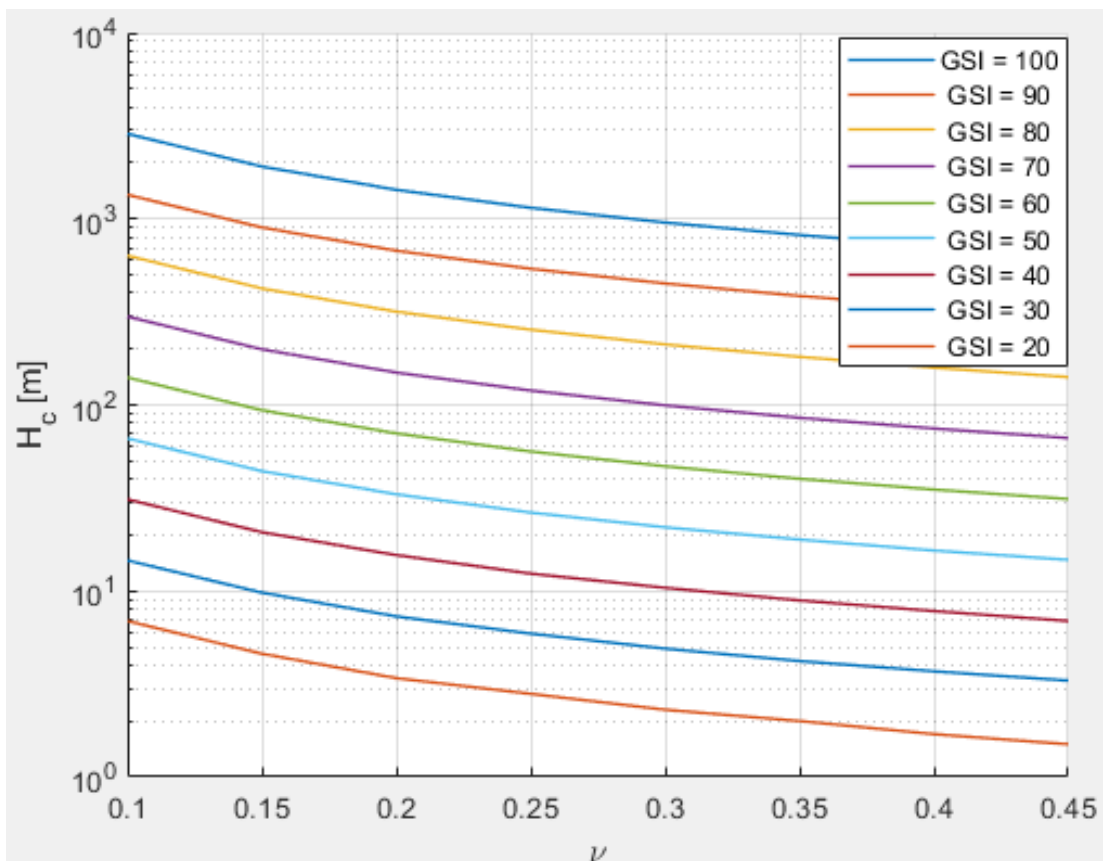
5. ábra: GSI érték és H_c összefüggése nagy szilárdságú ($UCS = 200$ MPa) bazalt esetén



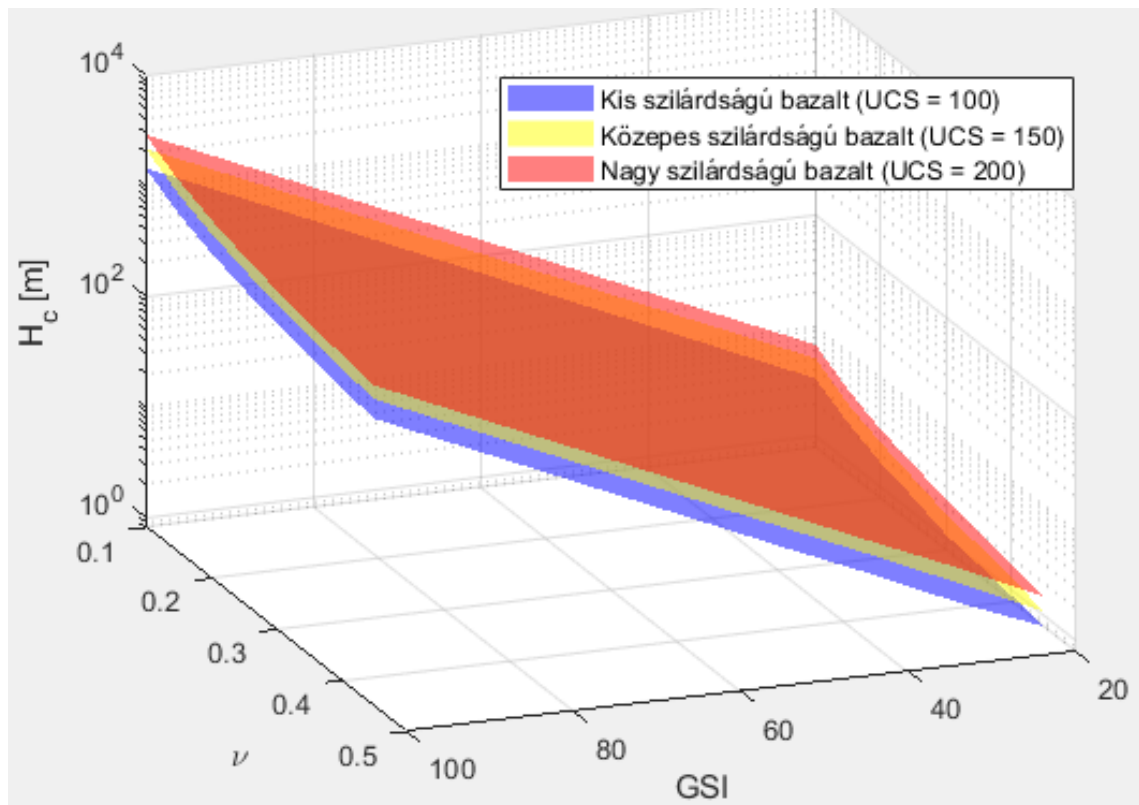
6. ábra: Poisson-tényező és H_c összefüggése kis szilárdságú ($UCS = 100$ MPa) bazalt esetén



7. ábra: Poisson-tényező és H_c összefüggése közepes szilárdságú ($UCS = 150$ MPa) bazalt esetén



8. ábra: Poisson-tényező és H_c összefüggése nagy szilárdságú ($UCS = 200$ MPa) bazalt esetén



9. ábra: A Poisson-tényező, GSI és kritikus sziklafalmagasság (H_c) összefüggése H_c -t logaritmikus skálán ábrázolva

Az eredmények alapján elmondható, hogy adott szikfalak magasságát ismerve következtetni tudunk a kőzet GSI és Poisson-tényező értékeire. A magyarországi kőfejtők Poisson-tényezőjét a nemzetközi gyakorlattal összhangban 0,15-0,3 érték között becsüljük, ez alapján az Uzsi kőfejtő GSI értéke 55-65 között lehetséges.

3.2. Eredmények ellenőrzése vége-selemes szoftverrel

A Barton képlet által becsült kritikus sziklafal magasságokat PLAXIS 2D vége-selemes szoftverrel is leellenőriztem. A számításhoz 9 különböző kőzetből álló kritikus falmagasságot vizsgáltam meg. Mindegyik vizsgált kőzet UCS értéke 200 MPa volt, míg három GSI érték (100, 80, 60) és három Poisson-tényező érték (0,1, 0,2, 0,3) kombinációjából álltak össze a vizsgált változatok.

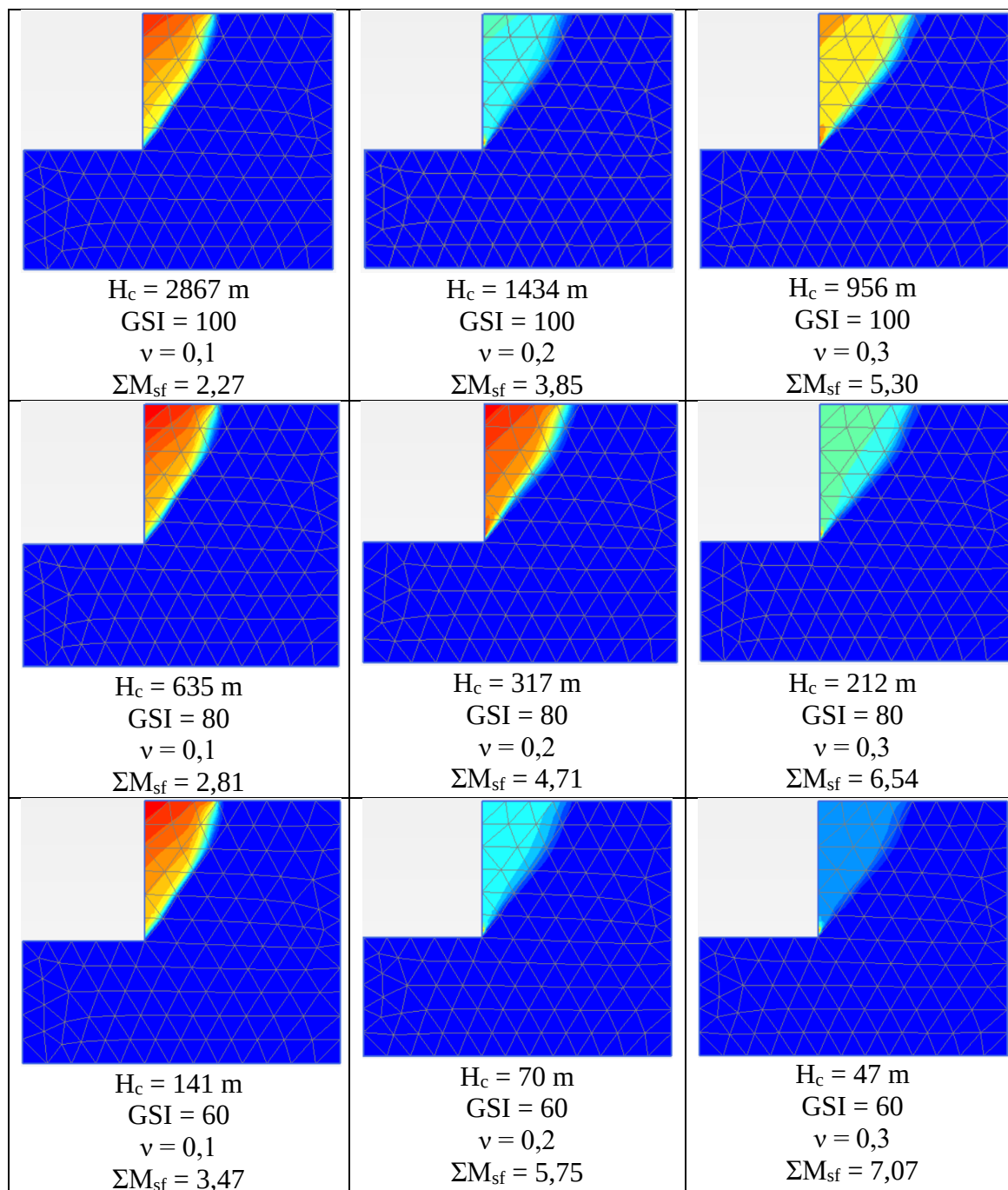
A számítások során a sziklafalat alkotó kőzetet a PLAXIS szoftver Hoek-Brown anyagmodellel modelleztem. A számításokhoz szükséges bemenő adatok ugyanazok voltak, amiket a sziklafal kritikus magasságának számításához is használtam. A PLAXIS-ban való számításhoz szükség volt még a kőzettest Young modulusára (E_{rm}) is. Ehhez először az ép kőzet Young modulusát (E_i) határoztam meg, melyet a PLAXIS kézikönyve alapján az UCS érték 350-szeresére vettem fel (70 GPa). Ezt aztán a GSI szerint a következő módon számoltam át, szintén a PLAXIS kézikönyve alapján: [12]

$$E_{rm} = E_i \left(0.02 + \frac{1-D/2}{1+e^{((60+15D-GSI)/11)}} \right) \quad (3.1)$$

A vizsgált változatok bemenő adatait, illetve a globális állékonyság vizsgálat során kapott biztonságokat (ΣM_{sf}) a 7. táblázatban is összefoglaltam, illetve a 10. ábrán a kialakuló csúszólapokat is ábrázoltam.

7. táblázat: A vizsgált változatok bemenő adatai és a hozzájuk tartozó globális állékonyság biztonságok

GSI	ν	H_c [m]	E_{rm} [GPa]	Biztonság - ΣM_{sf}
100	0,1	2867	69,603	2,27
100	0,2	1434	69,603	3,85
100	0,3	956	69,603	5,30
80	0,1	635	61,624	2,81
80	0,2	317	61,624	4,71
80	0,3	212	61,624	6,54
60	0,1	141	36,400	3,47
60	0,2	70	36,400	5,75
60	0,3	47	36,400	7,07



10. ábra: Kialakuló csúszólapok függőleges sziklafalak esetén

Az ábrákon látszik, hogy a kialakuló csúszólapok mindegyik esetben hasonlóak, függetlenül a sziklafal magasságától.

Emellett fontos még megjegyezni, hogy a végeselemes modellezés eredményei alapján arra lehet következtetni, hogy a Barton képlet a biztonság javára alulbecsüli az elméletileg lehetséges sziklafal magasságokat, a képlet alapján számolt magasságok pedig nagy biztonsággal megfeleltek a PLAXIS számítások során. Ez az alulbecslés megnövekszik nagyobb Poisson-tényezők, illetve kisebb GSI értékek esetén.

Meg kell jegyezni azonban azt is, hogy a PLAXIS-ban található Hoek-Brown anyagmodell nem veszi figyelembe a harántkontrakcióból adódó tönkremenetelt, a globális biztonság nem függ a Poisson-tényezőtől. Ezt egy gyors számolással igazoltam, a 0,1-es Poisson-tényezőjű kőzethez tartozó kritikus magasságokat leellenőriztem nagyobb Poisson-tényezőjű kőzetekkel is, de a biztonság egyik esetben sem változott. Ezen számítások az 8. táblázatban láthatóak:

8. táblázat: Globális biztonság változása különböző Poisson-tényező értékek esetén

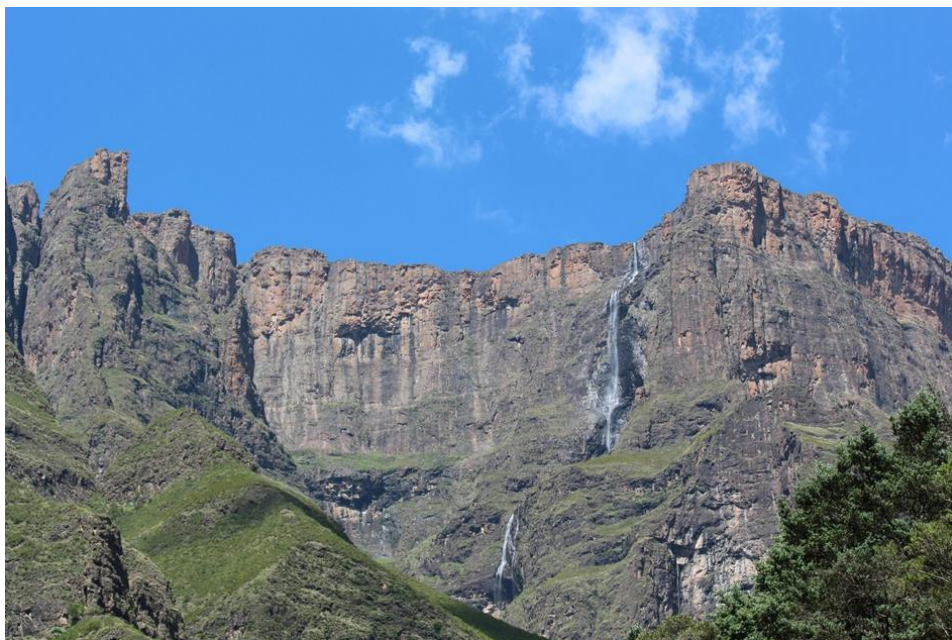
GSI	H_c [m]	ν	Biztonság - ΣM_{sf}
100	2867	0,1	2,27
		0,2	2,29
		0,3	2,27
80	635	0,1	2,81
		0,2	2,79
		0,3	2,83
60	141	0,1	3,47
		0,2	3,42
		0,3	3,42

4. 1 000 méter körüli bazalt sziklafalak vizsgálata

Az következő fejezetben néhány nemzetközi példát is megvizsgállok az ismertetett számítási metódusom alapján.

4.1. Az Amfiteátrum-hegy Dél-Afrikában

Az Amfiteátrum (the Amphitheatre) nevű hegy a 2.1.2. fejezetben már említett Sárkány-hegységben (Drakensberge) található Lesotho és Dél-afrikai Köztársaság határán. A hegy egy hatalmas, 5 km hosszú, u-alakú egybefüggő sziklafalból áll, melynek teljes felülete 10-szer akkora, mint a Yosemite nemzeti parkban található El Capitan híres Déli sziklafala. A sziklafal magassága helyenként az 1 000 métert is meghaladja, körülbelül 2 000 méteres tengerszint feletti magasságról induló sziklafal a 3 000 méteres tengerszint feletti magasságot is meghaladja. A függőleges sziklafelület ugyanakkor nem teljesen egybefüggő, több terasz is taglalja a sziklafalat. A sziklafalon hull alá a Tugela-vízesés is, amely a világ második (egyes mérések szerint első) legmagasabb zuhataga. A vízesés teljes magassága 948 méter, ugyanakkor nem egyben teszi meg a teljes magasságot, hanem öt különálló lépcsőben, a legmagasabb lépcső magassága pedig 411 méter. Az Amfiteátrum sziklafala az oldalán lezuhanó Tugela-vízeséssel az 11. ábrán látható. [13]



10. kép: Az Amfiteátrum-hegy a Sárkány-hegységben [14]

4.2. A Drakensbergi bazaltláva összlet tulajdonságai

A sziklafalat a Lesothoi fennsíkot is alkotó Drakensbergi bazaltláva összlet alkotja. A kőzet 180-200 millió évvel ezelőtt keletkezett, amikor az ősi Gondwana kontinens elkezdett felszakadozni, és a területet nagy mennyiségű bazaltláva öntötte el. [15]

A fennsíkot alkotó bazaltláva összlet kőzetmechanikai tulajdonságait egy 2000-es tanulmány mutatja be. [16] A tanulmányban számos, Dél-Afrikára jellemző kőzet mechanikai tulajdonságait vizsgálták meg, elsősorban gát, és egyéb vízepítési projektekhez szolgáló kiindulási adatszolgáltatásként. A Drakensbergi bazaltláva összlet kőzetét a Lesothói fennsíkon megvalósuló Lesotho Highland Water Project (LHWP) keretein belül vizsgálták, mely projekt egy nagy, a fennsíkon több gátat, illetve víztározókat összekötő alagutakat magába foglaló projekt. A vizsgálat során öt darab helyszínről (I-V) származó bazalton végezték el a mechanikai tesztek, az eredményeket az 9. táblázat foglalja össze:

9. táblázat: A Drakensbergi bazaltok kőzetmechanikai tulajdonságai [16]

	Egyirányú nyomószilárdság vizsgálat (UCS)		Direkt húzószilárdság vizsgálat (DTS)		Young modulus		Poisson-tényező		m _i (UCS / DTS)
	Tesztek száma	UCS átlag [MPa]	Tesztek száma	DTS átlag [MPa]	Tesztek száma	E átlag [GPa]	Tesztek száma	v átlag	
Bazalt I	31	180	5	12	8	46,9	2	0,25	15,00
Bazalt II	831	162	25	9,91	20	38,2	11	0,23	16,35
Bazalt III	408	157	12	12,07	16	32,3	10	0,28	13,01
Bazalt IV	375	166	15	13,89	8	47,2	7	0,23	11,95
Bazalt V	343	146	17	11,71	16	49,5	16	0,23	12,47

4.3. Elméletileg lehetséges sziklafal magasságok

A vizsgálatok során feltárt bazaltokból álló sziklafalak elméleti korlátait Barton képlete segítségével számoltam ki. A számolás során a bazalt sűrűségét egységesen 2,79 t/m³-nak feltételeztem, míg a zavartsági fokot (D) 0-nak vettem, mivel természetes sziklafalat vizsgáltam. A számítás során három GSI értéket, 100-at, 90-et és 80-at vettem figyelembe, mivel fényképek alapján a sziklafal épnek nézett ki (illetve a

magasságából is nagyobb GSI érték feltételezhető). A számításokat az 10. táblázat foglalja össze.

10. táblázat: Lehetséges maximum sziklafal magasságok Drakensberg bazalt esetén

	GSI	m_b	S	a	σ_c [Mpa]	σ_t [Mpa]	H_c [m]
Bazalt I	100	15,00	1,00	0,50	180,00	12,00	1720
	90	10,50	0,33	0,50	103,25	5,65	809
	80	7,34	0,11	0,50	59,18	2,66	381
Bazalt II	100	16,35	1,00	0,50	162,00	9,91	1544
	90	11,44	0,33	0,50	92,93	4,66	727
	80	8,00	0,11	0,50	53,26	2,19	342
Bazalt III	100	13,01	1,00	0,50	157,00	12,07	1545
	90	9,10	0,33	0,50	90,06	5,68	727
	80	6,37	0,11	0,50	51,62	2,67	342
Bazalt IV	100	11,95	1,00	0,50	166,00	13,89	2165
	90	8,36	0,33	0,50	95,22	6,54	1018
	80	5,85	0,11	0,50	54,57	3,07	479
Bazalt V	100	12,47	1,00	0,50	146,00	11,71	1825
	90	8,72	0,33	0,50	83,75	5,51	859
	80	6,10	0,11	0,50	48,00	2,59	404

Az eredmények azt mutatják, hogy 90-es GSI érték esetén a sziklafal elméleti magassága reális, 700-1000 méter közötti értékeket ad. Mivel a sziklafalat függőlegesen kisebb teraszok tagolják, ezek a számok valósak lehetnek.

4.4. Végeselemes számítások

A sziklafalat PLAXIS végeselemes szoftverrel is megvizsgáltam. A számítógépes program a véges elemek elvén működik, melynek lényege az, hogy a vizsgált talaj-kontinuumot egymáshoz kapcsolódó, különböző konvex alakzatú (jelen munkában háromszög alakú) idomokra bontva, a peremeken működő alakváltozások és erők hatására keletkező kapcsolati erőket és elmozdulásokat meghatározzuk. A számításhoz ki kell jelölni a vizsgált talaj-kontinuumot, a geometriai peremet, és jelen feladatnál a kapcsolódó szerkezetet is. Generálva egy célszerűen konstruált hálózatot, modellezhetők a tetszőleges számú rétegek, valamint a kívánt építési fázisok. Ennek alapján elvégezhető a stabilitási, alakváltozási és konszolidációs számítás.

A PLAXIS program a hálózat generálását automatikusan végzi oly módon, hogy figyelembe veszi a talajrétegek helyzetét és a geometriailag kijelölt építési fázisokat, egyben lehetőséget kínál arra is, hogy lokális és globális finomításokat végezzünk. A végtelen féltér mechanikailag szignifikáns térrészét – talajkörnyezetét – ábrázoljuk, és a kijelölt kontúr mentén erő vagy elmozdulási kényszereket alkalmazunk: azaz a valóságos kapcsolatot reprezentáló peremfeltételeket adunk meg. A hálózatgenerálás során a talajtömeg geometriai jellemzői kiadódnak: elemek, csomópontok és feszültségi pontok. A háromszög elemeken belül 6 vagy 15 csomópont jelölhető ki, az utóbbi pontosabb számítást tesz lehetővé (természetesen nagyobb számítási idővel). A feszültségi pontok előre kiválaszthatók a feszültségi görbék, illetve a feszültség-alakváltozási diagramok generálásához.

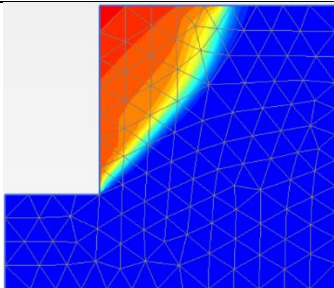
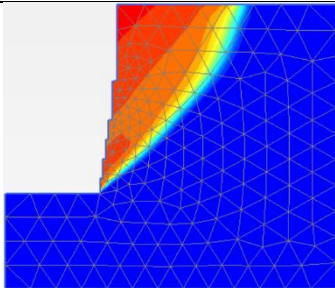
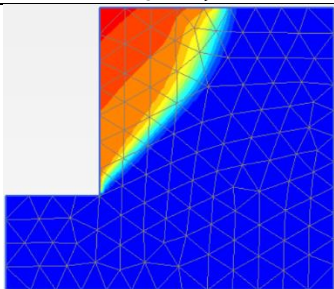
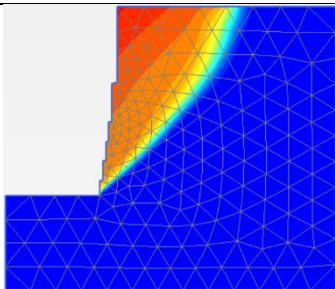
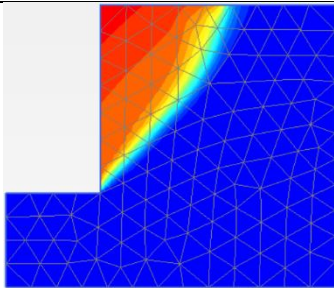
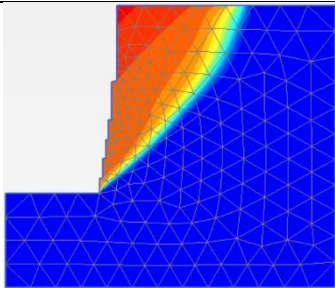
A csatlakozó szerkezetek és talajok feszültség-alakváltozási (σ - ϵ) viselkedését anyagmodellek segítségével írjuk le. A legegyszerűbb talajmodell, a Mohr-Coulomb féle és a módosított Mohr-Coulomb féle talajmodell, amely lineárisan rugalmas-tökéletesen képlékeny összefüggést tartalmaz. A kezdeti lineáris szakasz E merevedésgű, a folyási alakváltozást elérve vízszintessel modellezhető a diagram. A PLAXIS lehetővé teszi a drénezett és drénezetlen talajállapotot – akár rétegenként eltérően megadott elrendezés – vizsgálatát is, evvel együtt számítható a pórusvíznyomás, a hatékony és a teljes feszültség is. A módosított Mohr-Coulomb féle folyási feltételek függvényekkel írhatók le, a folyási függvényekben megjelenik a szokványosan alkalmazott két képlékenységtani jellemző, a ϕ belső súrlódási szög és a c kohézió.

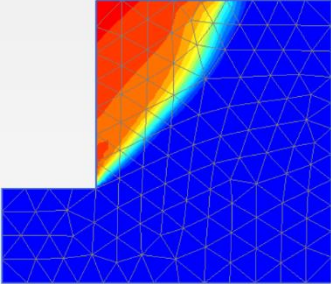
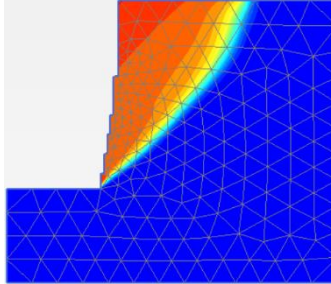
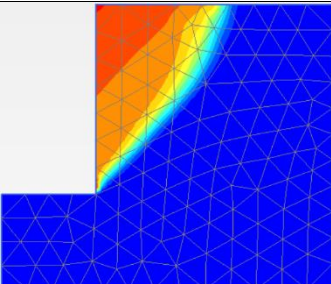
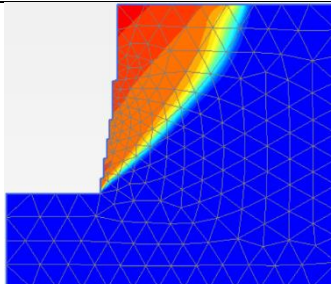
A PLAXIS az ún. Globális biztonsági tényezőt alkalmazza: ez azt jelenti, hogy a kohéziót és a belső súrlódási szöget azonos arány szerint, lépésenként redukáljuk, azaz $c/c_r = \tan\phi/\tan\phi_r = \Sigma M_{sf}$ eredményszorzót meghatározzuk. Ez az érték a biztonsági tényező, melyet iterációval a program úgy számol ki, hogy a két állandó fokozatos csökkentésével meghatározza az instabilitáshoz tartozó értékeket, melyekkel a fenti egyenlettel adja meg a biztonságot. Az elvégzett stabilitási számítások során, az eredmények értékelésekor ezt a viszonyszámot adjuk meg, alkalmazva a fenti jelöléseket, de némileg eltérve a talajmechanikai gyakorlat konvencionális értelmezésétől.

A számítás során két geometriát vettem figyelembe, egy egyszerűbbet, 1 000 méter magas függőleges felülettel, illetve egy valósághoz jobban közelítőt vízszintes padkákkal tagolva, maximum 400 méter magas egybefüggő függőleges felülettel (a Tugela vízesés lépcsőjéhez igazodva).

A számításokhoz a 3.2. fejezetben leírtakhoz hasonlóan a Hoek-Brown anyagmodellt használtam fel, valamint a 9. táblázatban ismertetett közetmechanikai paramétereket alkalmaztam. A 4.3. fejezetben elvégzett számítások, illetve a helyszínről fellelhető fotók alapján 90-es GSI értéket vettem figyelembe. A számítások során létrejövő csúszólapokat, illetve a hozzájuk tartozó biztonságokat az 11. táblázat tartalmazza.

11. táblázat: A kialakult csúszólapok és a hozzájuk tartozó biztonságok

	Egyszerűsített geometria	Valósághoz közeli geometria
Bazalt I	 $\Sigma M_{sf} = 3,35$	 $\Sigma M_{sf} = 3,69$
Bazalt II	 $\Sigma M_{sf} = 3,05$	 $\Sigma M_{sf} = 3,34$
Bazalt III	 $\Sigma M_{sf} = 3,10$	 $\Sigma M_{sf} = 3,41$

Bazalt IV	 $\Sigma M_{sf} = 3,29$	 $\Sigma M_{sf} = 3,60$
Bazalt V	 $\Sigma M_{sf} = 2,93$	 $\Sigma M_{sf} = 3,25$

A számítások során hasonló, már a 3.2. fejezetben is megfigyelhető csúszólapok alakultak ki. A biztonságon nem növelt sokat a valósághoz közelítő, sziklafalat vízszintes teraszokkal tagoló geometria az egyszerűsített függőleges geometriához képest. Emellett érdekes még megfigyelni, hogy a biztonság nem a Barton képlet által számított kritikus magasságokkal, hanem az átlagos UCS értékekkel korrelál inkább, ami szintén azt támasztja alá, hogy a PLAXIS program Hoek-Brown anyagmodellje nem veszi figyelembe a harántkontrakciós hatást.

5. Következtetések

Plaxis Hoek-Brown anyagmodellje nem pontos a nagyon magas sziklafalak esetén, mivel nem veszi figyelembe a harántkontrakció hatását.

Számításaim szerint úgy tűnik, hogy a Barton képlet is kissé alulbecsülheti a kritikus sziklafal magasságokat (mivel a PLAXIS-ban nagy biztonságok jönnek ki).

Általánosságban elmondható, hogy a Barton képlet jó becslést ad, a Lesothoi fennsíkon található bazaltok mechanikai tulajdonságai alapján várható maximális sziklafal magasságok (700-1000 m 90-es GSI esetén) összhangban vannak a valóságban megfigyelhető sziklák adataival.

Irodalomjegyzék

- [1] N. Barton és B. Shen: „Extension Strain and Rock Strength Limits for Deep Tunnels, Cliffs, Mountain Walls and the Highest Mountains,” *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018. 51: 3945-3962.
- [2] M. Cai, „Practical Estimates of Tensile Strength and Hoek–Brown Strength Parameter m_i of Brittle Rocks,” *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2010. 43: 167-184.
- [3] „Wikipedia,” [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Trango_Towers. [Hozzáférés dátuma: 4. október 2021.].
- [4] „Wikipedia,” [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/El_Capitan. [Hozzáférés dátuma: 4. október 2021.].
- [5] „Wikipédia,” [Online]. Available: <https://en.m.wikipedia.org/wiki/Basalt>. [Hozzáférés dátuma: 10. október 2021].
- [6] J. Pearson, „Far out: The first ascent of a gigantic sea cliff,” 2019. [www.
http://publications.americanalpineclub.org/articles/13201215103/Far-Out-The-First-Ascent-of-a-Gigantic-Sea-Cliff](http://publications.americanalpineclub.org/articles/13201215103/Far-Out-The-First-Ascent-of-a-Gigantic-Sea-Cliff)
- [7] „Wikipedia,” [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Los_Gigantes. [Hozzáférés dátuma: 4. október 2021.].
- [8] „Wikipédia,” [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Simien_Mountains. [Hozzáférés dátuma: 11. október 2021].
- [9] „SIYABONA AFRICA,” [Online]. Available: <https://www.siyabona.com/place/Drakensberg.html>. [Hozzáférés dátuma: 12. október 2021].
- [10] „Geománia,” [Online]. Available: <http://geomania.hu/lelohelylista.php>. [Hozzáférés dátuma: 14. október 2021].
- [11] E. Dr. Hoek, *Practical Rock Engineering*, North Vancouver, British Columbia, 2007. www.rocscience.com
- [12] PLAXIS, *PLAXIS 2D Material Models Manual*, 2018.
- [13] „Wikipédia,” [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Amphitheatre_\(Drakensberg\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Amphitheatre_(Drakensberg)). [Hozzáférés dátuma: 16. október 2021].
- [14] „Google,” [Online]. Available: https://www.google.com/search?q=tugela+falls&rlz=1C1GCEU_huHU903HU903&s

xsrF=AOaemvIYorBVaQTnichxD7ASk7EX0E0-
yA:1635858739760&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir=_MUMp7XfgcTFeM%252C
EzbZmvooGEUpwM%252C_%253Bqli5oxzf02HflM%252CEzbZmvooGEUpwM%
252C_%253B9BL9psFpkCBZ. [Hozzáféres dátuma: 20. október 2021].

- [15] D. Balázs, A Zambézitól délre, Budapest: Gondolat Könyvkiadó, 1979.
- [16] A. J. Geertsema, „The engineering characteristics of important southern african rock types with emphasis on shear strength of concrete dam foundations,” 2000.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani konzulenseimnek, Dr. Vásárhelyi Baláznak és Dr. Török Ákosnak, akik szakértelmükkel, hasznos magyarázataikkal és a konzultációk során biztosított elengedhetetlen tanácsaikkal hatalmas segítséget nyújtottak a dolgozatom elkészüléséhez.

Budapest, 2021.11.02