

# A mátraszentimrei pernyezagy tömedékelő csővezeték nyomásveszteségének és statikus nyomáseloszlásának számítása

FAITLI JÓZSEF<sup>1</sup>, WEISZ RÓBERT<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Docens, Miskolci Egyetem, Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet <sup>2</sup>Projektvezető, Geo-Faber Zrt. Pécs



*A felhagyott mátraszentimrei szulfidos ércbánya végleges bezárása érdekében a nyitott bányauregek hidraulikus tömedékelése elérkezett a legfelsőbb szintekhez. Felmerült az a kérdés, hogy vajon a lecsökkent geodetikus ejtőmagasság elegendő-e az egyszerű gravitációs tömedékeléshez, ill. milyen a statikus nyomáseloszlás a csőben? Számításokat végeztünk, amelyek választ adtak ezekre a kérdésekre.*

## Bevezetés

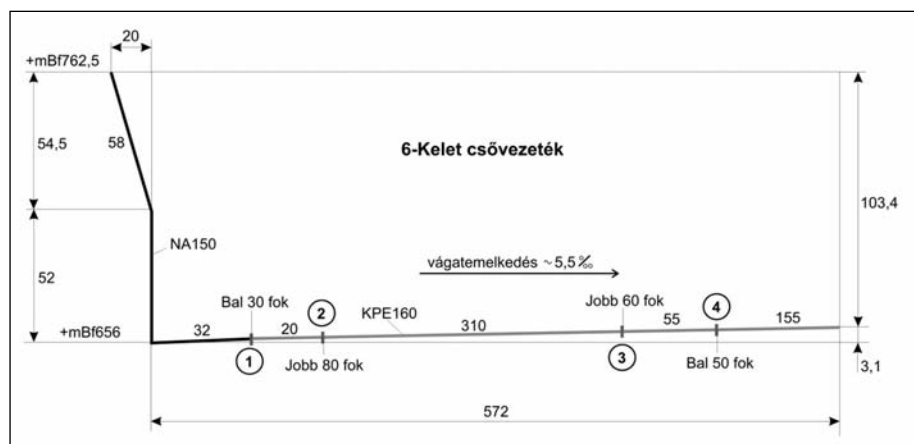
A felhagyott mátraszentimrei szulfidos ércbánya végleges bezárása érdekében a nyitott bányauregek hidraulikus tömedékelése jelenleg is zajlik. A Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézetének jelentős szerepe volt a pernye-mész-bányavíz alapú hidraulikus tömedékelő technológia kialakításában, megtervezésében. Erről már – pl. a Bányászati Lapok hasábjain is – többször számot adtunk [2, 5, 6]. Az időközben eltelt időszakban a mélyebben elhelyezkedő üregek már tömedékelésre kerültek, és a végleges bányabezárási munkák elértek a legfelső, azaz a kb. 100 m tömedékelési mélységben lévő üregek tömedékelésének a tervezéséhez. Az egyszerű gravitációs ejtőcsőként működő hidraulikus tömedékelő rendszer esetében felmerült az a kérdés, hogy a lecsökkent geodetikus ejtőmagasság vajon szolgált-e elegendő energiát ahhoz, hogy a függőleges esést követően a többszáz méteres vízszintes csőszakaszon keresztül kifolyik-e a tömedékelő zagy, vagy esetleg a leülepedő szilárd anyag miatt a csővezeték eldugul? Ez a kérdés egyenértékű azzal a kérdéssel, hogy vajon kell-e segédzivattyú berendezést, és milyent, telepíteni az aknaszintre, amely az esetlegesen szükséges nagyobb nyomásesést szolgáltatja. A segédzivattyú alkalmazása nyilvánvalóan – gazdasági és műszaki technikai – többlet erőforrásokat kíván. Egy másik érdekes kérdésre is kerestük a választ: azaz, hogy milyen a tömedékelőcső hossza mentén a statikus nyomás eloszlása. Ez az

információ azért szükséges, hogy a cső és a csőkötések anyagát meg lehessen olyanra választani, amely ezt a terhelést elviseli. Előre bocsátjuk, hogy azóta már folynak a legfelső szint tömedékelési munkái és a gyakorlati tapasztalatok összhangban vannak az elméleti számítás eredményeivel.

## Anyag és módszer

A kiépített hidraulikus tömedékelő technológia elsősorban a Mátrai Erőmű pernyezagy tározójából kitermelt nedves ligniterőműi pernyén alapul. A mátraszentimrei bányaudvaron kialakított bekeverő rendszer [6] segítségével a pernyéhez még meszet adagolnak, majd ezt bányavízzel – kb. 35 tf% (szilárd/zagy) koncentrációban – összekeverik. Egy-egy bekeverést követően a jellemzően 50-60 tonna mennyiségű zagyot az ejtőcsőbe juttatják, ami a helyzeti energia (hidrosztatikai nyomás) hatására keresztül áramlik az éppen szükséges kiépített csővezetékrendszeren. A számítást, példaként az ún. 6-Kelet csővezetéken mutatjuk be, amelynek a sematikus rajzát mutatja az 1. ábra.

A csővezeték két sorba kapcsolt csőből áll. Az



1. ábra: A 6-Kelet csővezeték méretei

aknában NÁ150 névleges belső átmérőjű acél cső található, amely az akna alján közel 90 fokban bekenyárodik, majd 32 m vízszintes távolság után az 1-essel jelölt pontban egy csőkötéssel KPE160 műanyag csővel folytatódik. A továbbiakban az acél csővezetékét  $D_a = 150$  mm (a: acél cső) a KPE csővezetékét pedig  $D_k = 145$  mm (k: KPE cső) jelöli. Az 1. ábrán sorszámozott pontokban a KPE csővezetékét acélból készített „könyökök” alkalmazásával kell elkészíteni, amelyek segítségével a csővezetékben a kanyar kialakítható. A kanyarodási pontok a következők:

**1. táblázat:** A 6-Kelet csővezetékben lévő könyökök jellemzői

Sorszám	Kanyarodási pont neve	Kanyar jellemzője	$L_e/D$ [-]	$L_e$ [m]
1.	6. szint északi haránt és keleti csapás kereszteződése	30° balra	20	2,9
2.	6.8. fűróvágat és 1. kerülővágat kereszteződése	80° jobbra	45	6,6
3.	2. kerülővágat és 6.3. fűróvágat kereszteződése	60° jobbra	35	5
4.	6.3. fűróvágat és keleti csapásvágat kereszteződése	50° balra	30	4,4

A csővezetékbe épített szerelvények áramlási ellenállásának az egyik elterjedt számítási módszere az egyenértékű csőhossz használata. A csőszerelvényt egy megadott hosszúságú egyenes csőszakasszal helyettesítjük a számításban, amikor a szerelvény és az egyenértékű hosszúságú helyettesítő egyenes csőszakasz áramlási ellenállása megegyezik. Csőívek és könyökök egyenértékű csőhosszai Zsebik [13] szerint (2. táblázat).

**2. táblázat:** Csőívek és könyökök egyenértékű csőhosszai

Szerelvény	$L_e/D$
90°-os könyök	50
45°-os könyök	26
90°-os ív, kis sugarú	30
45°-os ív, kis sugarú	16
90°-os ív, nagy sugarú	20

könyökre és 4,5 m-t az acél-KPE átmenetre hozzáadtunk. Hasonlóképp jártunk el a KPE cső esetében is. A kétféle cső egyenértékű adatai a 3. táblázatban láthatók.

**3. táblázat:** A 6-Kelet csővezeték egyenértékű adatai

6-Kelet csővezeték	Belső átmérő	Egyenértékű csőhossz
acél csővezeték	$D_a = 0,15$ m	$L_a = 154$ m
KPE csővezeték	$D_k = 0,145$ m	$L_k = 559$ m
geodetikus ejtőmagasság	$H = 103,4$ m	

*A nyomásvesztés és a lerakódási határsebesség számításának metodikája*

A Mátrai Erőmű megbízására – Tarján Iván profesz-

szor irányítása mellett – 1996-2004 között a Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézete számos pernye-salak-víz hidraulikus szállítási kísérletet végzett el. Fajtli és Tarján [3, 4] ekkor dolgozta ki az ún. *finom szuszpenzió – durva keverékáramlás modellt*, amelynek a segítségével az erőmű pernye-salak csőszállítási rendszerének a fő műszaki jellemzőit meghatározták. Ekkor választották ki a 35 tf% sűrűzagy szállítási koncentrációt, amelyet később a mátraszentimrei tömedékelő rendszer is átvett. Ezt a modellt a későbbiekben Fajtli továbbfejlesztette és kontinuitási elméletnek nevezte el [7, 8]. Amennyiben ezt a kontinuitási elméletet alkalmazzuk a megadott feladatra, az útmutatást ad a számítás metodikájára, amelynek az elve a következő. Az összekevert zagy folyadék és szilárd halmazállapotú fázisokat tartalmaz. Egy adott kétfázisú rendszerben egy adott szemcse alapvetően kontinuumszerűen, vagy diszkrételem-szerűen viselkedhet. Az áramlástan pl. a vizet, vagy a levegőt szinte minden esetben kontinuumként kezeli, mert így adott helyvektor biztosan egy olyan pontba

mutat, amelyet az anyag folytonosan kitölt, és amely pontban így biztosan értelmezhető az ott lévő anyag sebessége. Azonban, ha pl. a normál állapotú levegőre gondolunk, akkor a jellemzően egymástól  $0,1 \mu\text{m}$  távolságban elhelyezkedő gázmolekulák (molekulák szabad úthossza) között nincs semmi, így akkor minek a sebességéről beszélünk, ha a helyvektor éppen a molekulák közé mutat? Amennyiben a vizsgált rendszer olyan kicsi – pl. a levegőben egy, a molekulák méretével összevethető méretű (tömegű) objektum van –, akkor ezen objektum számára a gázmolekulák diszkrételem-szerűek, mert pl. egy ütközésben a lendületek által meghatározott jelenség alakul ki, ilyenkor a levegő nem tekinthető kontinuumnak. Eszerint ugyanannak a levegőnek az alkotórészei, a gázmolekulák eltérő rendszerekben eltérően, egyszer kontinuumszerűen, másszor pedig diszkrételem-szerűen viselkedhetnek. A vizsgált csővezetékben, amelyben akár  $1 \mu\text{m}$ -nél finomabb, vagy 4 mm-nél durvább szemcsék is előfordulhatnak, vajon a szemcsékből és a folyadékból álló kétfázisú rendszer hogyan viselkedik, ill. milyen nyomásvesztésszámítási metódus alkalmazható az adott viselkedésnek megfelelően. Fajtli [8] kontinuitási elmélete szerint egy adott rendszerben meghatározható egy határszemcseméret, amelynél a kisebb szemcsék és a hordozó közeg együtt egy ún. saját folyadékot (kontinuum) alkot, abban a rendszer úgy viselkedik, mintha nem is lennének benne szemcsék, mintha a keverék egy folytonos egyfázisú közeg lenne. Ezzel szemben a határszemcseméretnél nagyobb szemcsék egyedi diszkrét elemekként viselkednek a vizsgált rendszerben – jellemzően –, a mechanikai hatásoknak megfelelően egyedileg mozognak, ütköznek, sűrűlődnak. Tarján és Fajtli [1, 2, 3] számos mérést végzett el különféle pernyékkal, amikor szűk szemcseméret frak-

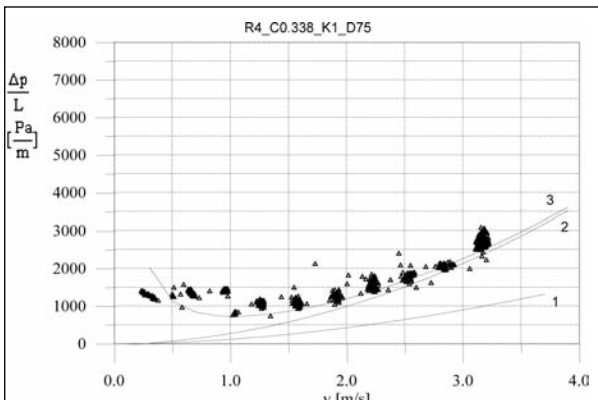
ciókat készítettek szitalással és ezeket külön-külön, különféle koncentrációban vízzel összekeverték, majd csőreométerben és laboratóriumi hidraulikus szállító-körön mérték a nyomásvesztés (sebesség – nyomásesés) görbét. Megállapították, hogy a Magyarországon előforduló csőméretek esetében (kb. 50-200 mm belső átmérő) a szén- és ligniterőművi pernyeanyagokra kb. 160  $\mu\text{m}$  a határszemcseméret. Turbulens csőáramlásban a fal mellett kialakulhat lamináris határteg, amelyben az erősen nyírt folyadékrétegek sebességprofilja lineáris, így a nyírófeszültség konstans. Ha egy adott szemcse olyan kicsi, hogy belefér ebbe a határtegbe, azonos (közel azonos) nyírófeszültség és sebesség veszi körül és nem alakul ki olyan erő (hidrodinamikai felhajtóerő), amely a faltól szeretné ezt a szemcsét eltaszítani, így az ott marad és a lamináris határtegben nagyobb fal menti nyírófeszültséget, azaz nagyobb áramlási súrlódási veszteséget okoz. A megnövekedett nyomásvesztés ezért annak a következménye, hogy a csőfal menti határtegben a finom szemcsék és a víz alkotta finom szuszpenzió (kontinuum) reológiai viselkedése megváltozik a vízhez képest, a viszkozitás megnő, sőt akár a folyási jelleg is megváltozhat és gyakran nemnewtoni folyási viselkedést mutatnak ezek az áramló szuszpenziók. A felállított modellből már következik, hogy a finom szuszpenzióáramlás nyomásvesztését a közeg folyási viselkedését jellemző folyási modell (tipikusan: newtoni, Bingham-plasztikus, hatványfüggvényvel leírható és reálpasztikus) és az abban szereplő reológiai paraméterek alapján számíthatjuk. Hanks [11] kidolgozott erre egy elméleti módszert, amellyel az itt megemlített négy reológiai modell mindegyike esetében számítható a finom szuszpenzió csőáramlásának a nyomásesése. A Hanks-modell felhasználásával – numerikus iteráció és integrálás segítségével – Faitli írt C++ programot, amellyel a számításokat elvégeztük.

A határszemcseméretnél nagyobb szemcsékből álló szilárd – folyadék keverékek csőáramlása esetén az áramlás jellege egészen más, mint az előzőkben leírt finom szemcsék esetében. Ebben az esetben a durva szemcse jellemzően nem fér bele a lamináris határtegbe. A szemcse csőfalhoz közeli felén a nyírófeszültség nagy, a sebesség pedig kicsi, a belső felén pedig épp ellentétesen a nyírófeszültség kicsi és a sebesség nagy. Ha a feszültegeloszlást kiintegráljuk a szemcse teljes felületére, megkapjuk a hidrodinamikai felhajtóerőt. Ez ugyanaz az erő, amely pl. egy repülőgépszárny esetében fellép és fenntartja a repülőt. Nagyobb sebességek esetén a durva szemcsékre a hidrodinamikai felhajtóerő egyre nagyobb, azaz a szemcse egyre kevésbé tud a fallal érintkezni, így súrlódnia. Ez a hipotézis magyarázatot ad arra a sokszor mért tényre, hogy nagy sebességek esetén a durva szemcsés zagyot szinte pontosan akkora energia befektetésével lehet a csőben szállítani, mintha csak vizet szivattyúznánk. Kisebb sebességek esetén ez a faltól eltaszító erő egyre kevésbé játszik szerepet, ekkor az ülepedés elkezd dominálni és a durva szemcsék mechanikai kontaktusba kerül-

nek a csőfallal. A szemcsék és a csőfal között mechanikai súrlódó erő ébred, amely a testeket normál irányban összeszorító erőtől és a súrlódási tényezőtől függ, és nem függ a testek közötti sebességtől. Ezzel ellentétben a csőfal mellett ébredő áramlási súrlódási veszteség függ a sebességtől, sima falú csőben, turbulens vízáramlásban a nyomásvesztés a sebesség közel második hatványával arányos. Ezek alapján a durva szemcsékből bekevert zagyok csőáramlását durva keverékáramlásnak nevezhetjük [4]. Ez egy valóban kétfázisú (szilárd-folyadék) mechanikai rendszer, amelyben valójában csak a folyadék áramlásáról beszélhetünk, és amelyben a szemcsék mechanikai erők hatására mozognak. Amikor a folyó görgeti a sziklákat, jól érzékelhető ez a modell. Akkor viszont, amikor adott csővezetékben, adott sebesség mellett, állandó nyomvesztéssel, stabil üzemben szállítjuk a durvaszemcsés anyagot, megtévesztő a helyzet. Olyan, mintha a zagy áramolna, ráadásul a nyomásvesztésből könnyen meghatározhatunk egy látszólagos zagyviszkózitási értéket is. *Faitli* [8] kontinuitási elméletének az alkalmazása megmutatja, hogy ez a megközelítés hibás, célszerű ezt a rendszert úgy tekinteni, hogy a folyadék áramlik a folyási viselkedése által meghatározott módon és ez szállítja a durva szemcséket, amelyek mozgását mechanikai erők határozzák meg. A diszkrételem-szerű keverékviselkedés nyomásvesztésének a meghatározása elméleti úton ezért nehéz, bár pl. diszkrételemes módszerekkel numerikusan szimulálható. A nyomásvesztés tapasztalati egyenletekből viszont számítható, a szakirodalomban rendkívül nagyszámú mérési eredmény és az azokra illesztett empirikus összefüggés található erre az esetre. Ezeket az összefüggéseket nevezhetjük Durand [9, 10] típusú összefüggéseknek, mivel az eltérő anyagokkal és méretekből elvégzett hidraulikus szállítási vizsgálatok eredményeire meghatározott összefüggések közül az elsőt *Durand* publikálta. A Durand-egyenletben két konstans található. A Froude szám kitevője 3, ami a nyomásvesztés görbe „görbületét” határozza meg, és egy szorzó konstans, ami a görbe magasságát határozza meg, ami 81. Az eltelt több mint 20 évben elvégzett mérések alapján a durva keverékáramlás nyomásvesztésének a számítására jó közelítéssel alkalmaztuk a Durand-egyenletet, azzal a különbséggel, hogy a két konstans ( $n = 3$  és  $K = 81$ ) anyagtól függő paraméternek tekintettük, és az egyenletet módosított Durand-egyenletnek neveztük. Az  $n$  és  $K$  anyagi paraméterek meghatározására – adott anyagokra – félüzemi méretű hidraulikus szállítási vizsgálatokat kell végezni.

Mi a helyzet akkor, ha egy csőszállítás esetében a határszemcseméretnél kisebb és nagyobb szemcsék egyaránt találhatók. Ilyenkor *Wasp* [14] ún. „szállítójármű” és *Faitli* [8] kontinuitási elméletét együttesen alkalmazhatjuk. A határszemcseméretnél kisebb szemcsék és a víz közösen egy finom szuszpenzióáramlást (kontinuum) hoz létre és ez a „szállítójármű” szállítja a diszkrételem-szerűen viselkedő durva szemcséket. Ezt

korábban „durva keverékáramlás a finom szuszpenzióáramlásban”-nak neveztük [3]. A durva keverékáramlás a finom szuszpenzióáramlásban modellre az elmúlt 20 évben elvégzett vizsgálatok közül több is empirikus bizonyítékul szolgált, továbbá a korábbi partnerünk az EGI Engineering Ltd. a modell alapján tervezett számos pernyekezelő rendszert a világ több pontján: Jacksonville (USA), Craiova 2, Isalnita, Rovinari, Turceni (Románia), Mátrai Erőmű stb. Egy példát említünk meg itt, mert ezt a korábbi mérést ugyanabból a forrásból származó anyaggal végeztük el, mint amivel most Mátraszentimréren tömedékelnek, csak 24 évvel korábban.

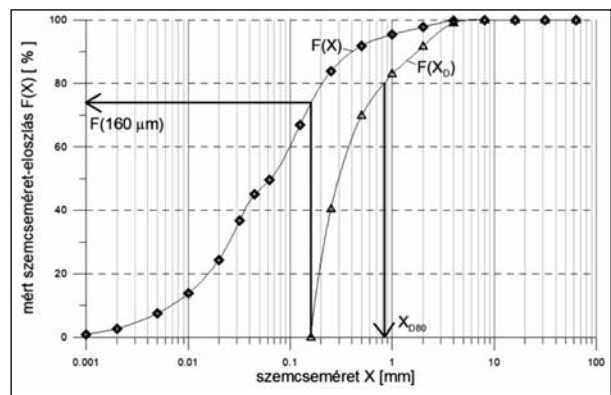


2. ábra: Durva keverékáramlás a finom szuszpenzióáramlásban

A 2. ábrán a Mátrai Erőműből származó R4 nevű receptúra szerint összekevert salak-pernye-víz 33,8% térfogati szállítási koncentrációjú keverék, 75 mm-es belső átmérőjű csőben való áramlásának mért nyomásvesztés görbéje látható. A vízszintes tengelyen a csőben mért keresztmetszeti átlagos zagysebesség, míg a függőleges tengelyen az 1 m csőhosszra eső fajlagos nyomásesés van ábrázolva. A háromszöggel jelölt pontok a mért pontok. A diagramban a fizikai és reológiai anyagvizsgálatok és a modell alapján számított görbéket is ábrázoltuk. Az (1) jelű görbe a tiszta víz számított nyomásvesztés görbéje az adott csőben. Az anyagvizsgálatok eredményei (finom szuszpenzió koncentrációja, sűrűsége, reológiája) alapján számítottuk ki a finom szuszpenzióáramlás (2) nyomásvesztés görbéjét. Ezt követően a korábban empirikusan meghatározott n és K konstansok felhasználásával a durva keverékáramlás a finom szuszpenzióáramlásban modell segítségével adódott a mérésre vonatkozó elméleti nyomásvesztés görbe (3). Az empirikus bizonyítékot az jelenti, hogy nagy sebességek esetén a mért pontok nem a víz (1) görbéjéhez tartanak, hanem egy olyan görbéhez, a finom szuszpenzióáramlás görbéjéhez (2), amelyet más eszközökön elvégzett külön mérések (szítálás, piknométeres sűrűségmérés, csőviszkóziméteres reológiai mérések) eredményei alapján a modell szerint számítottunk.

2013-ban László Dalma szakdolgozatot készített, amelyben ezt a számítási metódust alkalmazta [12]. Összegyűjtötte az addig elvégzett laboratóriumi elem-

zések és 159 bekeverés helyszíni adatait, amelyek mindegyike legalább 38 tonna nedves pernyét tartalmazott. A jelenlegi számításokhoz nem végeztünk újabb méréseket, hanem a László Dalma által összesített és átlagosított anyagjellemzőket használtuk fel. A tömedékelést jelenleg is a 2009-2012-ben a Miskolci Egyetemen kidolgozott receptúra alapján végzik. A Mátrai Erőműben keletkező pernye anyagjellemzői hosszú távon is eléggé állandóak, amelyet számos korábbi mérés is bizonyít. Egy nyilvánvaló különbség mégis akad, újabban a pernyében a hulladék együttégetésből származó maradványanyagok is találhatóak. A pernye jellemző szemcseméret-eloszlása a 3. ábrán látható.



3. ábra: A tömedékeléshez használt pernye jellemző szemcseméret-eloszlása

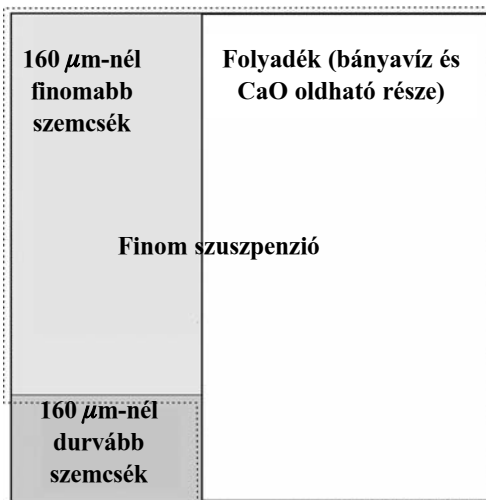
A bemutatott modell alapján a szilárd anyagot két részre kell bontanunk a számításokhoz. Elsőként meg kell határozni a  $160 \mu\text{m}$ -nél finomabb  $[F(160 \mu\text{m})]$  és durvább  $[1-F(160 \mu\text{m})]$  szemcsék arányát. Ez a 3. ábrán látható módon egyszerűen leolvasható a pernye mért szemcseméret-eloszlás függvényéről. Ezen a függvényen látható a durva szemcsék eloszlása is, amely nem más, mint a függvény  $160 \mu\text{m}$ -től jobbra eső felső része. Ezt a függvényszakaszt a mechanikai eljárás technikában „csonka” vagy „redukált” eloszlás-függvénynek nevezik. Ha ezen „csonka” eloszlás értékeit elosztjuk a tömegkihozattal  $[1-F(160 \mu\text{m})]$ , akkor megkapjuk a durva frakció szemcseméret-eloszlás függvényét. A számításokhoz a durva frakció 80%-os szemcseméretére ( $X_{D80}$ ) van szükség, amely már egyszerűen leolvasható a 3. ábra szerint. A László Dalma [12] által átlagolt és a számításokhoz használt anyagjellemzők a 4. táblázatban láthatók:

A 4. ábra a tömedékelés fázis összetételét mutatja a durva keverékáramlás a finom szuszpenzióáramlásban modell szerint.

A folyadék és a finom frakció együtt alkotja az ún. hordozó finom szuszpenziót, amelynek az abszolút viszkozitása a mérések során a 19-40 mPas tartományra esett. Néhány reológiai mérés és nagyobb koncentrációk esetén a pernye-víz finom szuszpenziók Bingham-plasztikus folyási viselkedésűek voltak. A Bingham-plasztikus folyadékok turbulens csőáramlásának a nyomásvesztés számítása bonyolul-

4. táblázat: A tömedékelő technológia átlagos műszaki jellemzői

Neve	Értéke
átlagosan bekevert nedves pernye adag	40332 kg
bekevert nedves pernye összes nedvességtartalma	32,6 m/m%
por formában bekevert CaO	813 kg
mosató bányavíz	21297 kg
pernye-mész-bányavíz zagy szállítási térfogati koncentrációja	0,35
pernye-mész-bányavíz zagy keveréksűrűsége	1425 kg/m <sup>3</sup>
a pernye piknométerben mért szemcsesűrűsége (a finom és a durva frakciók sűrűsége közel egyforma)	2085 kg/m <sup>3</sup>
a finom szuszpenzió szállítási térfogati koncentrációja	0,32
a finom szuszpenzió keveréksűrűsége	1350 kg/m <sup>3</sup>
a finom szuszpenzió folyási viselkedése	Newtoni
a finom szuszpenzió abszolút viszkozitása (jelentős biztonsági tényezőt tartalmaz)	100 mPas
a durva szemcsefrakció 80%-os szemcsemérete	0,88 mm
a durva szemcsefrakció szállítási térfogati koncentrációja a finom szuszpenzióáramlásban	0,09



4. ábra: A tömedékszagy fázis összetétele a modell szerint

tabb és kevésbé megbízható, mint newtoni folyadékok esetén. Továbbá a lerakódási határsebességnél nagyobb sebességek esetén a szállított fluidum nyírása jelentős, a sebességgradiens nagy, így a nyugalmi határfeszültség hatása ezen a tartományon elhanyagolható.

Mindezek alapján – a korábbiakkal összehangban – a hordozó finom szuszpenzióáramlás nyomásvesztését a newtoni reológiai modell alapján számítottuk, azonban ehhez nagyobb abszolút viszkozitás értéket használtunk ( $\mu_F = 100$  mPas).

#### A lerakódási határsebesség számítási módszere

A lerakódási határsebességet a Durand-egyenletről számíthatjuk [1],

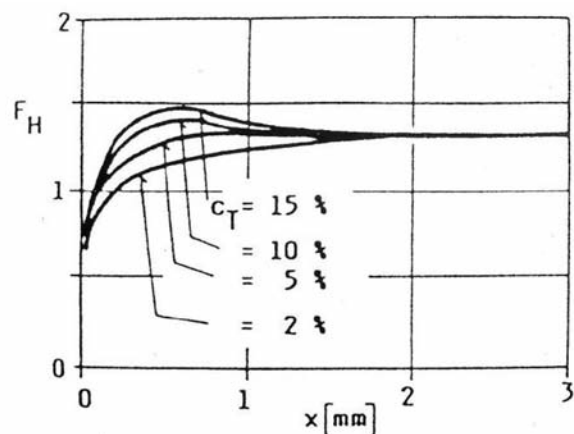
$$v_H = F_H \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot D \frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f}}$$

amelyben,  $F_H$  a lerakódási határsebességhez tartozó Froude-szám, amit az 5. ábra alapján lehet meghatározni.

### Eredmények

A fent leírt számítási módszer egy lineáris módszer, amellyel a csőáramlás nyomásvesztése egy adott keverék átlagsebességhez számítható. Feltételezzük azt, hogy amikor a tömedékelő csővezeték már teljesen feltelt a bekevert zagy csőbe jutása után, akkor a zagy állandó sebességgel áramlik és ebben a kvázi stacionér egyensúlyi állapotban a hidrosztatikai nyomás éppen egyenlő az áramlási súrlódási nyomásvesztéssel. A hidrosztatikai nyomás a vizsgált esetre:

$$p_{hs} = \rho_k \cdot g \cdot H_g = 1425 \cdot 9,81 \cdot 103,4 = 14,8 \text{ bar}$$



5. ábra: A Froude szám a szemcseméret és a szállítási koncentráció függvényében

Ebből következik, hogy a számítás iteratív, változtatni kell a keverékáramlási átlagsebességet és ezt addig kell folytatni, amíg a számított áramlási nyomásvesztés az iterációs tőrésen belül megegyezik a hidrosztatikai nyomással. A végeredmény az 5. táblázatban látható:

Az adatokból látható, hogy az iterálás sikeres volt, mert a bemutatott Tarján-Faitli metodika alapján, az általánosított anyagjellemzőkre számított összes csővezeteki áramlási nyomásvesztés 14,84 bar, ami szinte megegyezik a 14,8 bar hidrosztatikai nyomással.

A lerakódási határsebességet az 1. egyenletről számítottuk. A Froude-számra az 5. ábráról leolvastva 1,5 adódik.

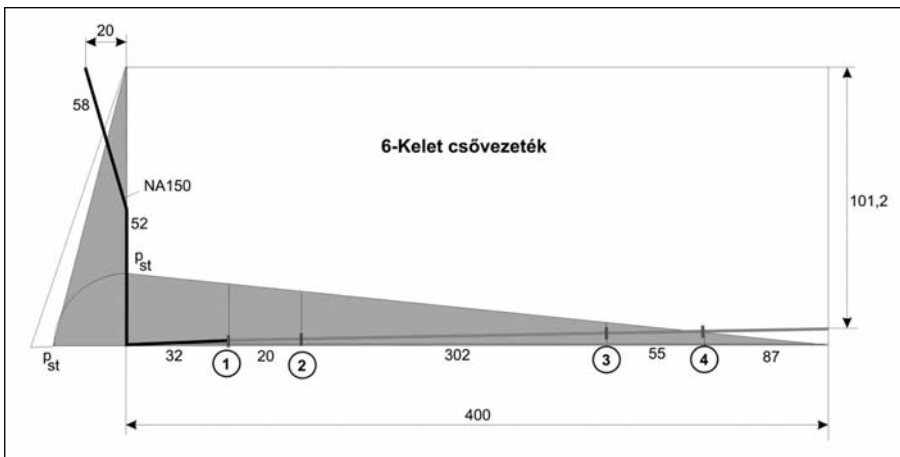
A lerakódási határsebesség a KPE160 csőben:

$$v_{Hk} = 1,98 \text{ m/s}$$

A kiszámított átlagsebesség lényegesen nagyobb, mint a lerakódási határsebesség, azaz nincs szükség az

**5. táblázat:** A tömedékelő technológia számított műszaki jellemzői

Műszaki jellemző	Értéke
NA150 csőben a keverékáramlási sebesség	$v_a = 3,37$ m/s
NA150 cső nyomásesése	$\Delta p_a = 2,82$ bar
NA150 cső fajlagos nyomásesése	$\Delta p_a/L = 0,0183$ bar/m
KPE160 csőben a keverékáramlási sebesség	$v_k = 3,6$ m/s
KPE160 cső nyomásesése	$\Delta p_k = 12,2$ bar
KPE160 cső fajlagos nyomásesése	$\Delta p_k/L = 0,0218$ bar/m



**6. ábra:** Statikus nyomáseloszlás a 6-Kelet csővezetékben

aknaton plusz szivattyú beépítésére, a tömedékelés a legfelsőbb szinteken is elvégezhető tisztán gravitációsan.

A statikus nyomáseloszlás meghatározása nem nyilvánvaló egyből, mert válaszolni kell arra a kérdésre, hogy „hogyan alakul a nyomáseloszlás a csőben „szabadon” eső zagyban?”. Amennyiben a cső végét elméletben lezárjuk és a teljesen betöltött pernye zagy nyugalomban lenne a csőben, akkor a teljes vízszintes csőszakaszon a hidrosztatikai, azaz 14,8 bar nyomás lenne a statikus nyomás. Ezt az állapotot nyilvánvalóan el kell kerülni, nem szabad a csövet lezárni, vagy dugulást létrehozni, mert ez a nagy nyomás tönkre teheti a csövet. Amennyiben a cső hirtelen záródna be, akkor „vízütés” következne be, ami még nagyobb terhelést jelentene. Normál üzemű tömedékelés közben, amikor a zagy állandó sebességgel áramlik a csőben, akkor a betöltési pontban és a csökifolyásnál egyaránt atmoszférikus nyomásnak kell lennie. A 6-Kelet csővezetékben várható statikus nyomáseloszlást a 6. ábra mutatja.

**6. táblázat:** A statikus nyomás (túlnyomás) eloszlása a 6-Kelet csővezetékben (bar)

Csővezeték pontja	Stat. nyomás
aknaton	12,00
1	11,20
2	9,85
3	3,22
4	1,96
csökifolyás	0

A függőleges csőben „szabadon” eső zagy valójában nem esik szabadon, mivel az áramló zagy áramlási nyomásvesztése (falsúrlódás) ez esetben megtartani igyekszik a zagyoszlopot, így a statikus nyomás az aknaton 14,8-2,8 = 12 bar értékre várható. A vízszintes csővön a statikus nyomáseloszlás pedig, az áramlási súrlódási nyomásvesztés miatt a 6. ábra szerint alakul. A nevezetes pontokban a nyomás, amely a csövet igénybe veszi a 6. táblázatban látható.

**Konklúzió**

A durva keverékáramlás a finom szuszpenzióáramlásban modell segítségével kiszámítottuk a várható keresztmetszeti átlagsebesség értékeket, amelyek megfelelő biztonsággal nagyobbra adódtak, mint a lerakódási határsebesség. Ezek alapján megállapítottuk, hogy a gravitációs tömedékeléshez

nem lesz segédzivattyúra szükség. Ezt követően 2019. június 19-én sor került az első tömedékelésre, a legfelső szintre; a bekevert 68 m<sup>3</sup> zagy pedig rendben lefolyt a csővezetékben.

**Köszönetnyilvánítás**

A tanulmány/kutató munka részben a „Fenntartható Nyersanyag-gazdálkodási Tematikus Hálózat – RING 2017” című, EFOP-3.6.2-16-2017-00010 jelű projekt részeként a Széchenyi 2020 program keretében az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával, másrészt a Miskolci Egyetem „Felszín alatti természeti erőforrások hatékonyabb kiaknázása és hasznosítása” című, TUDFO/51757-1/2019-ITM azonosítójú Tématerületi Kiválósági Programjának részeként, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal finanszírozásával valósult meg.

**IRODALOM**

[1] Böhm J., Debreczeni Á., Fajtli J., Gombkötő I., Meggyes T.: High-concentration hydraulic transport of tailings. in LAND CONTAMINATION AND RECLAMATION, Vol.15 Num. 2; pp. 195-217. 2007.

[2] Fajtli J.: Módszer zagyáramok nyomásvesztésének számítására. BKL Bányászat 128/6. pp. 507-512. 1995.

- [3] *Faitli J., Tarján I.*: The distinction of the fine suspension flow from the coarse mixture flow by measuring of the pressure loss on a horizontal pipe. in GOSPO-DARKA SUROWCAMI MINERALNYMI 14: 3 pp. 61-70. 1998.
- [4] *Faitli J.*: Pressure loss calculation model for well-graded solid-liquid pipe flows on the basis of systematic pilot plant investigations. in: Shammazoz, Airat, Besenyei (eds.) Intellectual Services for Oil and Gas Industry Proceedings: Analysis, Solution and Perspectives. pp. 212-221. University of Miskolc, 2000.
- [5] *Faitli J., Bóhm J., Mucsi G., Gombkötő I.*: A gyöngyösoroszi szulfidos ércbánya végleges bezárása hidraulikus tömedékeléssel; a mechanikai eljárás technika szerepe a technológia kifejlesztésében. BKL Bányászat 145/5. pp. 13-20. 2012.
- [6] *Faitli J., Weisz R.*: Hydraulic Backfill Technology for the Closure of the Abandoned Sulfide Mine in Mátraszécsény. GEOSCIENCES AND ENGINEERING: A PUBLICATION OF THE UNIVERSITY OF MISKOLC (2063-6997): Vol. 1. No. 2. pp 39-44. 2012.
- [7] *Faitli J.*: Szemcsemozgás mérése és számítása nem-newtoni egy- és többfázisú közegekben. BKL Bányászati Szat 2015/3. pp. 2-9. 2015.
- [8] *Faitli J.*: Kontinuitási elmélet diszperz anyagrendszerek különféle berendezésekben való eltérő viselkedésének a jellemzésére. Műszaki Földtudományi Közlemények 86: 1 pp. 11-22. 2017.
- [9] *Durand R., Condolios E.*: Deuxieme Journee de l'hydraulique. SOC. HYD. DE FRANCE, Grenoble. 1952.
- [10] *Govier, G. W., Aziz, K.*: The flow of complex mixtures in pipes. Van Nostrand Reinhold, 1972.
- [11] *Hanks R.W.*: Low Reynolds number turbulent pipeline flow of pseudohomogeneous slurries. Hydrotransport 5, Hannover BHRA Fluid Engineering. 1978.
- [12] *László D.*: A Gyöngyösoroszi Szulfidos Ércbánya hidraulikus tömedékelési rendszerének vizsgálata. MSc diplomatervezés. Miskolci Egyetem. 2013.
- [13] *Zsebik A.*: Áramlástechnikai Alapok. BME Kiadó. Budapest. 2003.
- [14] *Wasp E. J., Kenny J. P., Gandhi R. L.*: Solid-liquid flow Slurry Pipeline Transportation. Trans. Techn. Publications, Clausthal. 1977

**DR. HABIL. FAITLI JÓZSEF** 1989-ben a Miskolci Nehézipari Műszaki Egyetemen szerzett bányagépészeti- és bányavillamosági mérnök diplomát. 1998-ban PhD oklevelet szerzett, majd 2016-ban habilitált a mechanikai eljárás technika tudományterületén. Docens a Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárás Technikai Intézetében. Fő oktatási és kutatási területe a többfázisú áramlások, szemcsemozgás, mintavételezés, porleválasztás, számítógépes szimuláció, hulladékfeldolgozás stb. Tudományos publikációinak száma 197.

**WEISZ RÓBERT** 1988-ban a Miskolci Nehézipari Műszaki Egyetemen szerzett bányagépészeti- és bányavillamosági mérnök diplomát. 1988-2003 között a Márkushegyi bányauzemben dolgozott gépészeti részlegvezetőként. 2007-től kezdődően a Gyöngyösoroszi bányabezáráson dolgozik: 2012-ig mint gépészeti vezető, azóta mint projektvezető.

### A század legfontosabb erőforrása lett a homok

A végtelen tengerpartok vagy sivatagok alapján azt gondolhatnánk a homokról, hogy lényegében korlátlanul rendelkezésre áll, azonban ez nincs így, egyre szűkebb ez az erőforrás.

Ennek egyrészt az az oka, hogy a sivatagi homok túl finom szemcséjű az építőipari hasznosításhoz, és ezért még a sivatagi országok – mint az Egyesült Arab Emírségek – is a jelentős homokimportőrök közé tartoznak. Másrészt a világgazdasági fellendülés, az urbanizáció és a népességnövekedés miatt hatalmasra nőtt a kereslet. A bővülő kereslet egyre látványosabb problémákat okoz. Elsősorban folyómedrekből és vízpartokon termelik ki a homokot, amelynek komoly ökológiai következményei vannak: nemcsak az emberek biztonságát fenyegeti, hanem a folyók élővilágára is jelentős hatással van, számos élőlény kihalásához vezethet.

Kínában például 2011 és 2013 között több cementet használtak fel, mint az USA-ban a XX. század folyamán. A világ legnagyobb homokimportőre, Szingapúr a hatvanas évek óta negyedével növelte a területét alapvetően azzal, hogy homokkal töltötte fel a tengert. Kínában vagy az Egyesült Arab Emírségekben számos luxusszigetet hoztak létre homokból, és például a nigériai Lagos is mesterséges-

sen létrehozott homokpadokon terjeszkedik az óceán felé. A világon egy évtized alatt kétszeresére, évi 50 milliárd tonnára nőtt a kitermelt homok és kavics mennyisége.

*g7.hu 2020.01.26*

*PT*

### Szén-dioxidból üzemanyag

Német kutatók építették azt a kísérleti gyártó állomást, mely belső égésű motorok meghajtására alkalmas üzemanyagot állít elő szén-dioxidból és vízből. Az eljárás a légkörből vonja ki a szükséges hozzávalókat, és a közlekedés mellett egyéb iparágakat is forradalmasíthat.

A Karlsruhe-i Technológiai Intézetben (KIT) laboratóriumi méretű gyártósort állítottak össze, amely egy teherszállító konténerben elfér, és naponta néhány liter üzemanyag előállítására alkalmas.

Beindítását áttörésnek tartják az e-üzemanyag néven, illetve szén-dioxid-semleges és szintetikus üzemanyag néven is ismert technológia történetében. Az úgynevezett power-to-liquid eljárást alkalmazzák: megújuló forrásokból nyert áram felhasználásával gyártanak folyékony üzemanyagot.

*origo.hu*

*Földessy János*