

PAJZSOS ALAGUTÉPÍTÉSNÉL ALKALMAZOTT INJEKTÁLÁS
MÉRNÖKGEOLOGIAI KÉRDÉSEI

Horváth Tibor^x

1.) Bevezetés

A budapesti metró É-D vonalán az Arany János u. - Élmunkás tér közötti mélyvezetésű alagutzakasz pajzsos technológiával, tulnyomórészben a felső-oligocén kora rétegekben épült meg. A felső-oligocén idősebb kőzetfáciése agyag, ill. aleurit, lefelé fokozatos átmenettel kapcsolódik a kiscelli agyagformációhoz.

Az agyag, aleurit rétegsor a fiatalabb kifejlődések felé egyre inkább homokos, kőzetlisztes jellegűvé válik, önálló homokerek, homokrétegek jelennek meg.

A felső-oligocén agyag, aleurit kőzetfizikai jellemzői nagyon változók. Legvalószínűbb paraméterei:

	- surlódási szög	30 - 35 ^o
C	- kohézió	5 - 10 Mp/m ²
t	- törőszilárdság	4 - 5 kp/cm ²
k	- szivárgási tényező	10 ⁻⁶ - 10 ⁻⁸ cm/sec

A felső-oligocén homokrétegek kőzetfizikai jellemzői a következők:

∅	- surlódási szög	37-38 ^o (CaCO ₃ tart.)
---	------------------	--

⁺METRO BERUHÁZÁSI és KÖZLEKEDÉSFEJLESZTÉSI VÁLLALAT

C - kohézió	4,4 -	Mp/m ²
U - egyenlőtlenségi együttható	3,4 - 8,0	
k - szivárgási tényező	10 ⁻² - 10 ⁻⁴	cm/sec

A felső-oligocén rétegsor felett negyedkori törmelékes üledékek helyezkednek el. A negyedkori rétegben az Élmunkás tér előtti alagutzakasz és az állomás épült meg. Az építés során tehát más-más tulajdonságu kőzetekben kellett az alagutat megépíteni. Az építési technológia egyik kiegészítő folyamata az injektálás. Az alkalmazott injektálási technológia a megépített szakasz teljes hosszában a kőzetviszonyok változásai dacára azonos volt.

A tervező és kivitelező szakemberek részére szeretnénk olyan gondolatokra rávilágítani, amelyeket a különböző kőzetekben végzett injektálások során alkalmazni tudnak, a pajzsos alagutépítésnél.

2.) Az alagutban történő injektálás szerepe és a vele szemben támasztott követelmények

A földalatti műtárgyak tervezésekor a mérnökgeológiai viszonyok általánosan ismertek. Ezek az ismeretek a kivitelezés során válnak pontosabbá.

Nem lehet a furások korlátozott száma miatt pontosan megadni egy vetőzóna litoklázisokkal átjárt, összetört kőzetrészének vízszintes kiterjedését, a zóna vizszállító képességét, töredezettségi fokát, litoklázisoknak és a réseknek a felületi gyakoriságukat stb.

Ezekre a tulajdonságokra - megfelelő pontossággal - csak a műtárgy építése során nyerünk információt. Az injektálás helyes elvégzése azonban függ a műtárgy körüli kőzet szilárdsági és vízvezető képességi tulajdonságaitól.

A következőkben a Budapesten bevezetett csuklós vasbetonblokkos falazati rendszer injektálásának mérnökgeológiai kérdéseivel foglalkozunk.

A falazat és kőzet együttdolgozása szükségszerű következmény, mert a falazat nagy teherbirása csak a kőzet megtámasztó hatásának hatékony érvényesülése esetén realizálódik, anélkül a gyürü labilis.

Az injektálását úgy kell a pajzsos technológiai folyamatba beépíteni, hogy az ne rontsa az építés sebességét, olyan időpontban végezzék el, hogy a káros felszíni süllyedések kialakulásának lehetőségét minimálisra csökkentse, és a szerkezet kialakításának időpontjában biztosítson kapcsolatot a falazat és a kőzet között.

Az injektálást két lépcsőben végzik el. Az első üregkitöltő anyaga speciális adalékanyagot és kötőgyorsítót tartalmazó cementhabarcs, a második injektálásé pedig cementtej, vagy bentonitos cementtej.

Az első injektálás anyagának egy sor építéstechnológiai, alakváltozási és szilárdsági követelménynek kell eleget tennie. A következőkben csak azokkal a következményekkel foglalkozunk, amelyek összefüggésben vannak a kőzetfizikai tulajdonságokkal.

Ezek a követelmények a következők:

- a.) A szerkezet és a kőzet közötti ürt, teljes mértékben töltsse ki, hogy a kitöltetlen üregek miatt, káros felszíni süllyedések, valamint a meg nem engedhető alagutfalazati deformációk ne alakuljanak ki.
- b.) Az injektáló anyag szilárduljon olyan gyorsan, hogy az önmagában labilis alagutfalazatot időben meg tudja támasztani. Legyen képes olyan felületi terhelés viselésére, mint amekkora ágyazási reakció a

falazat önsúlyából és a falazatra már működő földnyomásból keletkezik. Az injektáló anyag szilárdulási sebességével kapcsolatban támasztott igény mindig függ a kőzet szilárdsági tulajdonságától, az alagutfalazat saját merevségétől és az építési sebességtől.

- c.) A beinjektált anyag végszilárdsága az alagutat övező kőzetével legyen azonos. Nagyszilárdságu kőzetek esetén pedig legalább olyan szilárdságu, hogy a falazatot megtámasztó hatás szempontjából merevnek legyen tekinthető.

A b.) és c.) pontban leírt követelmények kielégítéséhez az általános tervezéshez megadott mérnökgeológiai körülmények ismerete elegendő. Az a.) pontra vonatkozóan azonban csak az építés során észlelt mérnökgeológiai adatoknak az injektálási technológiába való gyors beépítése során lehet az a.) pontbeli követelményt kielégíteni.

A falazat és a kőzet között keletkező hézagot a pajzsos alagutépítésnél két okra vezethetjük vissza:

- Technológiai hézag a pajzs és a falazat átmérőkülönbsége révén mindig kialakul. Nagysága a mérnökgeológiai viszonyoktól független, jól leírható, előre jelezhető.
- Földtani okok miatt keletkező hátür nagysága, kialakulásának helye kevésbé jelezhető előre. Kialakulása kisebb szakadások, pergés, vagy omlások miatt várható.

Technológiai szempontból külön kell választani az üregkitöltő injektálás, tektonikusan tört kőzet injektálását és a póruskitöltő injektálást.

Az üregeket az első injektálás során kell kitölteni. Így a hátürkitöltő és az üregkitöltő injektálás között különbséget az esetek többségében nem kell tenni.

A tektonikusan töredezett kőzet és a porózus kőzetek kiinjektálását minden esetben meg kell hogy előzze a hátürkitöltő injektálás.

3.) A pajzsos alagutépítés technológiájából fakadó hátür.

A pajzsos épülő alagutak esetében - időlegesen, megtámasztás nélkül is állékony műszaki-földtani környezetben - mind kialakul hátür az építési technológia következtében. (1. ábra)

A hátür a következő elemekből tevődik össze:

$$T_{\text{techn}} = T_1 + T_2 + T_3$$

ahol

T_1 = a pajzs-faroklemez vastagság

T_2 = az alagutfalazat külső átmérője és a pajzs belső átmérője közötti különbség. Az 5 m körüli \emptyset esetében ez a különbség 6-7 cm.

T_3 = a pajzs irányítása miatt a vágóél által meghatározott kör-szelvélynél nagyobb szelvény kifejtése miatt kialakuló hátür (tulfejtés). A tulfejtés értéke 3-4 cm, ritkán éri el a 6 cm-t.

A T_3 el is maradhat, ha a fejtési utasítás nem ír elő tulfejtést, ekkor a $T_3 = 0$. A pajzs vágóélével történő kőzetvágatás esetén a $T_3 = 0$. (lásd: 1. ábra).

A T_1 és a T_2 hátürnagyság állandó vonzata a technológiának. A tulfejtést és a vágatást általában vegyesen alkalmazzák, ritkán fordul elő teljes tulfejtés, vagy vágatás.

A technológia következtében kialakuló hátür nagysága ugyan kicsiny, de mivel lényeges szerepe van a falazat statikájában, a felszíni süllyedés kialakulásában és a víz elsődleges kizárásában, jóminőségű elvégzése elengedhetetlen műszaki követelmény.

4.) A zavart műszaki-földtani környezet következtében kialakuló hátür és injektálásuk.

A zavart műszaki-földtani környezetben az alagut körül kialakuló hátür mérete igen tág határok között mozog. Külön esetként kezelhetők a nagyméretű emberéleket, technikát és az alagut állagát veszélyeztető szakadások, omlások. Ezeknek mértéke néhány m^3 -tól több mint $100 m^3$ -ig terjedhet. Az ilyen helyzetekkel azonban nem foglalkozunk, mert megoldásukra mindig az adott helyzetnek megfelelő módszereket alkalmaznak.

A zavart műszaki-földtani környezetben - alak és méret szerint osztályozva - lehet:

- üregkitöltő
- kőzetrepedéseket, vetőzónát kitöltő
- póruskitöltő

injektálás.

4.1.) Üregkitöltő injektálás.

Üregnek nevezzük azokat a kőzetben lévő összefüggő, szabályos, vagy szabálytalan légüres, vagy vízzel telített tereket, amelynek három mérete közül a legkisebb is nagyobb 4 cm-nél. 2

Az üregkitöltő injektálásról beszélünk a fenti tereknek alacsony nyomással történő kitöltésénél.

A pajzssal épülő alagut esetén főtészakadás által üreg keletkezik a falazat mögött. Az üreg alakja és mérete nagy bizonytalansággal, vagy egyáltalán nem jelezhető előre, ezért nagyon fontos, hogy ha a főtében szakadás történik, akkor a falazat beépítése előtt a lehető legnagyobb pontossággal megmérjük az üreg jellemző méreteit.

Az üreg méreteinek ismeretében az üregkitöltőanyag mennyiségére vonatkozóan tájékoztató jellegű adatot kapunk.

4.2.) Vetőzónát kitöltő injektálás.

A vetőzóna és a környezetében tektonikailag összetört kőzet rész injektálhatósága függ a kőzethasadékok, kőzetrepedések irányától, a hasadék, vagy réstérfogat értékétől, a víz áramlási nyomásától és a zavart zóna vizszállító képességétől.

A valóságos tektonizált (hasadékos) kőzetek igen nagymértékben különböznek az idealizált résrendszerekkel jellemzett kőzetektől, mert

- a kőzetekben kialakuló hasadékok mérete térben nagyfokú változékonyságot mutat,
- a hasadékok általában közel függőlegesen a legnagyobb csuszató feszültség síkjaihoz kötötten helyezkednek el.
- a kőzet és a folyadékmozgás paraméterei csak mint valószínűségi változók értelmezhetők.

A rések statisztikai eloszlásának számszerű meghatározására kétféle út járható.

- 1.) Az előtervezés során a furásokban észlelt vetőzónák kiértékleése a hasadékok és rések eloszlásának vizsgálata statisztikai módszerrel. (5)
- 2.) Az alagut építése során a kivitelezés során nyert adatokból a hasadékokra, résekre vonatkozó résstatisztikai mutatókat meghatározni.

A kivitelezés során végzendő résstatisztikai vizsgálatok lényege, hogy meghatározzuk a rések szélességét, a zavartzóna vastagságát. A mért jellemzőkből számíthatjuk a zavartzóna

- áttörtségét
- réstérfogatát
- átlagos szivárgási tényezőjét
- vizszállítási tényezőjét

A mért adatokat az alábbi táblázat alapján dolgozzuk fel. 3

Jellemző megnevezése	jele	dimenziója	képlete	mérve, ill. számítva
Résszélesség	d	m	-	$5 \cdot 10^{-4}$
Résszám	N	db	-	100
Zavartzóna vtg	M	m	-	10
Áttörtség	u	%	$\frac{N \cdot d}{M} \cdot 100$	0,5
Réstérfogat	$\frac{\vec{n}}{n_0}$	%	$\frac{N \cdot d}{M} \cdot 100$	0,5
Szivárgási tényező	K_L	m/sec	$6 \cdot 10^5 \cdot u \cdot d^2$	$7,5 \cdot 10^{-4}$
Vizszállítási tényező	T	m ² /sec	K · M	$7,5 \cdot 10^{-3}$

Az áttörtség (u) a zavartzóna kőzeteinek azt a keresztmetszetét határozza meg, amelyen keresztül a folyadékáramlás végbemegy.

A réstérfogat ($\frac{\vec{n}}{n_0}$) a zavartzónában a rések térfogatának a % értékét adja meg a zavartzóna teljesszélességü térfogatához viszonyítva.

A vizszállítási tényező (K.M) a résrendszerben áramló víz mennyiségére utaló mérőszám.

A résméret és az áttörtség függvényében a zavartzóna szivárgási tényezője meghatározható. 2. ábra 3.

Szivárgási tényező ismeretében a Sawitze táblázatból meghatározható a legmegfelelőbb injektálási módszer. 3. ábra 2.

4.3.) Póruskitöltő injektálás.

Szemcsés kőzetek szemcséi közötti folytonossági hiányt nevezünk pórusnak. A pórusok jellemzője, hogy korlátozott keresztmetszetéhez képest, hossza végtelennek tekinthető.

A pórusok keresztmetszetei mérete egyszemcsés szerkezetnél a szemcseméreték függvénye, a pelites és agyagos üledékeknél a kapcsolat már nem ilyen egyértelmű.

A pórusok jellemzője egy homogén összletben az, hogy átlagos keresztmetszetük nem változik lényegesen. Minél szélesebb szemcsetartományt ölel fel egy kőzet, annál szélesebb skálán változik az átlagos póruskeresztmetszet is, de általában azonos nagyságrendben marad.

Az injektálás tervezésénél lényeges, hogy lehetőségekhez képest a legpontosabb szemeloszlási görbét használjuk. Az iszap és agyagtartalom meghatározása azért is fontos, mert e két frakció jelentősen növeli a homokszemcsék felületi szennyezettségét, a terhelés alatti tömörödés mértékét és csökkenti az injektáló anyag behatolási mélységét, illetve növeli a kiszűrődés lehetőségét.

A másodlagos porozitással rendelkező szemcsés kőzetek szemcseeloszlási görbéjéből számított hézagterefogat általában nagyobb értékű, mint az "in situ" állapotban.

A kalciumkarbonátos cementáló anyagu homokok esetében a másodlagos porozitás nem jelent minden esetben hézagterfogat csökkenést. (4)

Ez azért lehetséges, mert a cementáció ugyan a porozitás csökkentésével jár, de a megnövekedett összenyomódási modulus miatt a mélységgel való porozitáscsökkenés jelentéktelenné vált.

A budapesti metró É-D-i vonalán a kalciumkarbonátos kötőanyagú felső-oligocén homok például másodlagos porozitással rendelkezik.

Póruskitöltésnél kőzetet legjobban a vízáteresztőképességi együtthatóval jellemezhetjük. Az injektáló anyag általában csak kötőanyagot tartalmaz, mert a kőzetréteg vázszerkezetét nem az adalékanyag képezi, hanem a kőzet szemcséi.

A kötőanyag lehet finomraőrölt szemcsékből előállított szuszpenzió, vagy folyadék. Az alkalmazott injektálási módszer a vízáteresztő együttható ismeretében a Sawitze táblázat (3. ábra) segítségével határozhatjuk meg.

A szemcsés anyagból előállított injektáló folyadék esetén az injektálhatóság határát nagymértékben befolyásolja a kötőanyag őrlési finomsága.

A kötőanyag és a befogadókőzet szemcseeloszlási görbéjét megszerkesztve a kielégítő injektálhatóság feltétele

$$\frac{D_{15} \text{ (befogadó talaj)}}{D_{85} \text{ (kötőanyag)}} = 25$$

Ha ez az arány kisebb 25-nél, akkor részleges kiszűrődés, ha pedig 5-nél is kisebb, teljes kiszűrődés következik be.

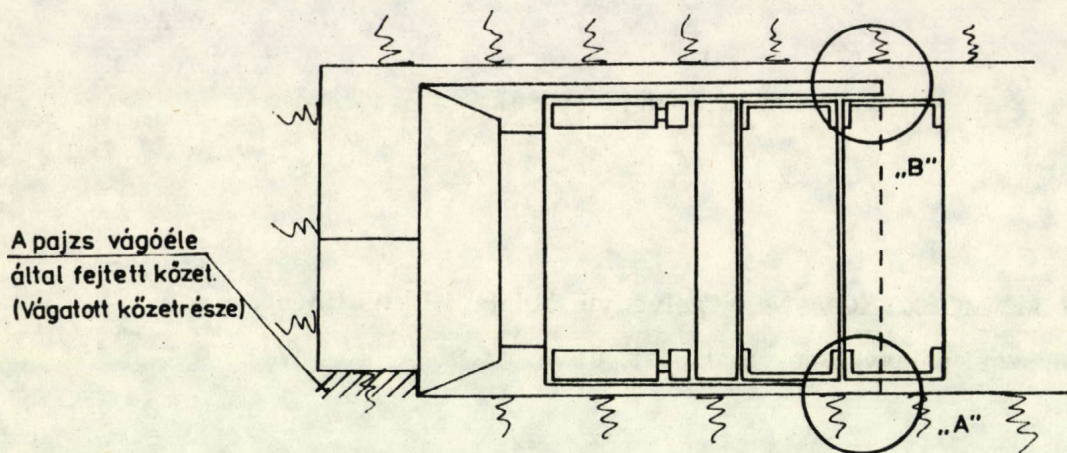
5.) Összefoglalás

Az injektálás tervezése és kivitelezése nem valósítható meg a műszaki-földtani környezettől függetlenül.

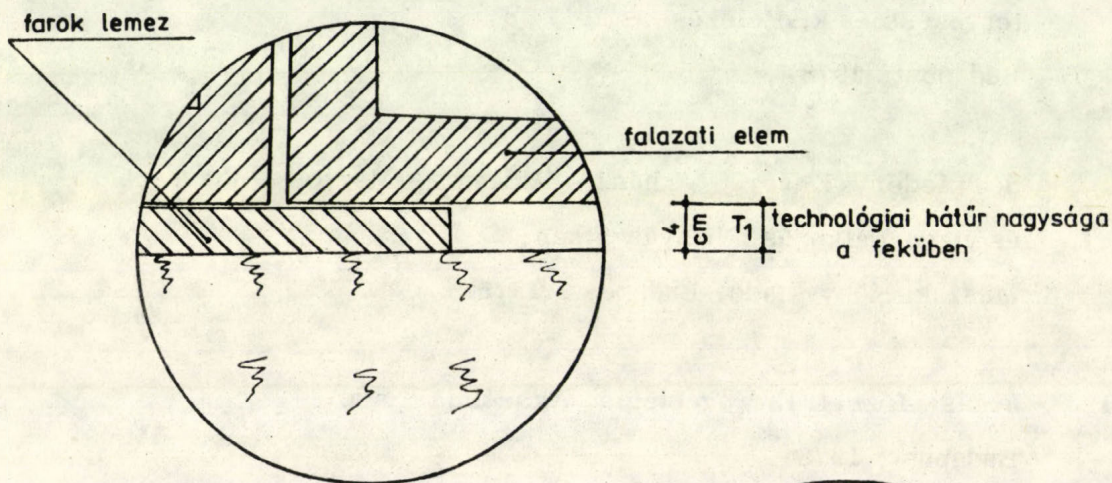
A különböző injektálási módszerek tervezéséhez táblázatok, grafik onok segítségével az alagutépítésben, mélyépítésben dolgozó szakemberek részére számszerűleg mérhető kőzetjellemzőket ismertettünk.

Irodalomjegyzék

- (1) V.M. MOSZTKOV: Nagyszelvényü földalatti létesítmények.
Műszaki Könyvkiadó. Budapest, 1978.
- (2) B.M.E. Geotechnikai Tanszék: Földalatti műtárgyak injektálásának tervezése és kivitelezése.
Budapest, 1978.
- (3) Schmieder - Keserü - Juhász - Willems - Martos : Vizvesztély és vizgazdálkodás a bányászatban.
Műszaki Könyvkiadó. Budapest, 1975.
- (4) Juhász József: Hidrogeológia. Akadémia Kiadó.
Budapest, 1976.
- (5) Petar Lokin: Study of rock mass fissuration for engineering geological purposes.
Mérnökgeológiai Szemle 23. szám. 1980.
Budapest, augusztus hó.

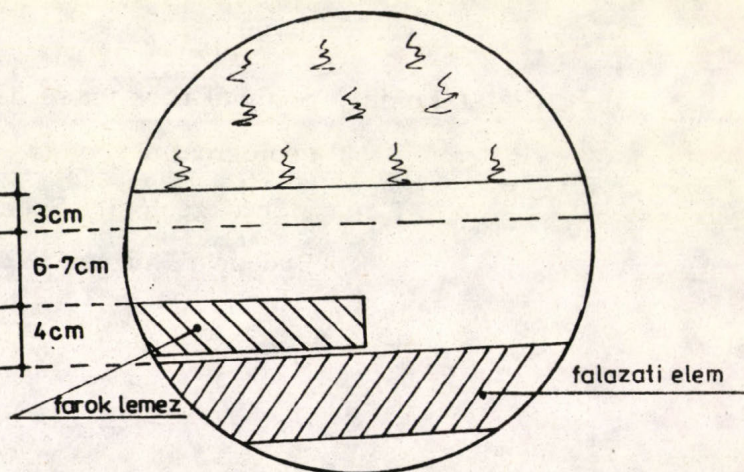
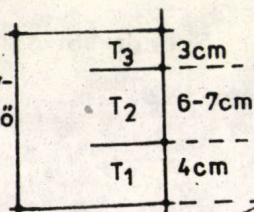


A FŐTÉBEN TÚLFEJTÉS, A FEDÜBEN VÁGATÁS ESETE



„A” részlet

technológiai hátúr nagysága a főtében történő túlfejtés esetén. (A fekében vágatás)



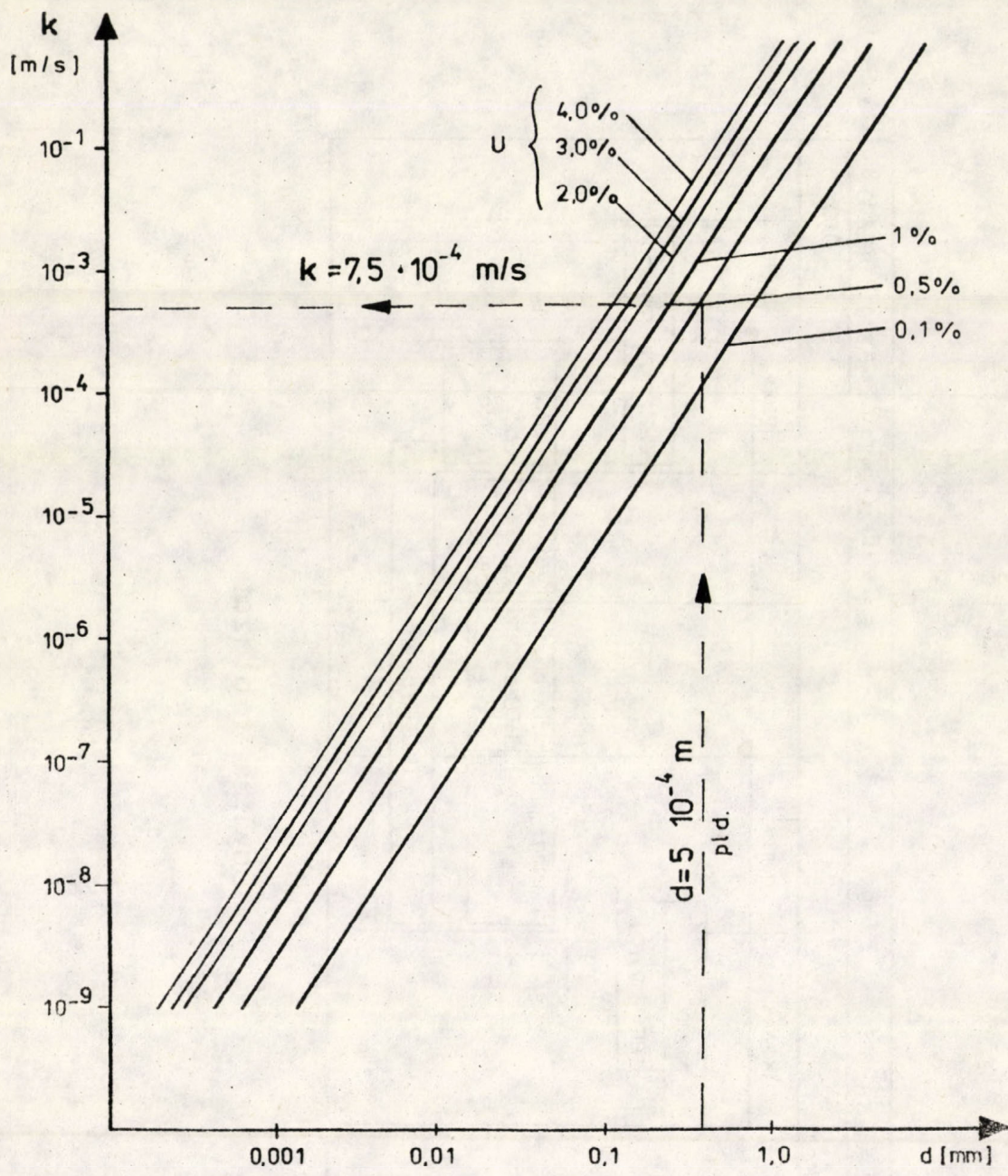
„B” részlet

T_1 = faroklemez vastagsága.

T_2 = az alagút falazat ϕ -je és a pajzs belső ϕ -je közötti különbség.

T_3 = túlfejtés értéke.

1 ábra. A PAJZSOS ALAGÚT ÉPÍTÉSÉNÉL KIALAKULÓ TECHNOLÓGIAI HÁTŰR



A szivargási tényező a résméret és az áttörtség függvényében

2. ábra.

k (m/sec)	$5,8 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$5,8 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$5,8 \cdot 10^{-7}$	$5,8 \cdot 10^{-8}$
k (m/nap)	500	100	2	0,5	0,1	0,05	0,005
	kavics	homok	mó	lössz	iszap	k agyag	
	cement						
	cement agyag						
		agyag					
		vízüveg + CaCl ₂ reagens	vízüveg + H ₃ PO ₄ reagens	vízüveg + CaCO ₃ reagens	vízüveg + CaCl + bentonit		
		műanyagok					
					elektromos - kémiai		

Sawitze táblázat