

Függelék

Dr. Papp Zoltán: A talaj és védelme című egyetemi jegyzethez

Tartalom

Függelék.....	1
I. A talajszennyezések felderítése	3
II. Az egyes szivárgási tartományok	6
III.	7
2.1. Közvetlen talajfeltárás: mintavétel	7
2.1.1. Fúrás	7
2.1.2. Magmintavétel	9
2.2.4. A vízáteresztő-képességi vizsgálatok.....	11
2.3. A terepi, közvetett talajvizsgálatok	11
2.3.1. Áttekintés	11
2.3.2. „Felszínen végzett” (roncsolásmentes) mérések	12
2.3.3. „Furatban végzett” mérések	13
2.3.4. Felszínről lehajtott szondákkal végzett mérések	14
IV. Hidraulikai alapismeretek	17
Energiaviszonyok.....	17
Sebességviszonyok.....	19
Szivárgáshidraulikai ismeretek.....	23
3.3. A talajcsövezés hidrológiai alapjai.....	34
Ábrajegyzék	45

I. A talajszennyezések felderítése

Az elsődlegesen szanálendő területek meghatározásához a *veszélyeztetett területeket* a környezetre gyakorolt potenciális veszélyük alapján rangsorolják. Egy ökológiai szempontból *szisztematikus eljárásra van szükség*. A *nyomon követhetőség* és *áttekinthetőség* pedig alapkövetelmény ahhoz, hogy az adminisztrációs döntéseket és intézkedéseket a közvélemény akceptálja. Példaként az egymást követő lépésekkel bemutatjuk azt az eljárási módot, amely a legtöbb tartományban - a környezetvédelmi hivatallal való szoros együttműködéssel - az elmúlt évek során kifejlődött:

1. fázis – Felderítés

Az öröklött szennyezések által veszélyeztetett területek felkutatására korábban az alábbi források szolgáltak: mindenekelőtt a *gyári akták, térképek, az építési és mélyépítési hivatal, ill. az állami, regionális, körzeti és helyi archívumok* dokumentumai, hajdani alkalmazottak *kikérdezése*, valamint egyidejű *térkép- és légifelvétel-elemzés*. Ennek a felderítési módnak gyenge pontja az, hogy a begyűjtés esetleges, nem teljes, nincs kronológiai sorrend és nem kaphatók pontos területhatárok. Egyre nyilvánvalóbbá válik, hogy csak egy többidejű *légifelvétel- és térképkiértékelés* teszi lehetővé az öröklött hulladékok által veszélyeztetett területeknek egy objektív, széles körű, pontos határvonalú és messzemenőig megbízható felderítését.

2. fázis - Összehasonlító értékelés

Az ismert módon nagy ráfordításokat igénylő egyedi helyszíni vizsgálatokra rangsorolást állapítanak meg. Az értékelés kritériumai - amelyek meglétének mértéke szerint történik a besorolás - a következők:

- a veszélyeztetett területek *„anyagleltára”*,
- a veszélyeztetett területekről kiinduló *emissziók*,
- az anyagok *kiterjedési lehetősége* a környezeti elemekbe,
- a környezeti elemek és a veszélyeztetett terület *hasznosítása*.

Az összehasonlító értékelés jórészt a veszélyeztetett területek telekkönyvében található információk alapján történik. Egyes tartományokban kiegészítőleg a talaj és a talajvíz tájékoztató vizsgálatát is elvégzik, hogy a *prioritás megállapításánál* biztosabbak legyenek, és gyorsabban felismerhessék az *azonnali intézkedés* szükségességét. Emellett egy *lépcsőzetes kémiai analízis* elvégzése is előnyös lehet, amelynek során néhány paraméter vizsgálatával megállapítható, hogy egyáltalán fennáll-e a víz, talaj és levegő veszélyeztetettsége, és ha igen, a további lépésekben a szennyezés fajtája pontosan meghatározható. Az általánosan alkalmazott *„3 lépcsős analitikában”* (screening, problémás anyagok analitikája, részletekbe menő vizsgálatok) a harmadik lépcső egy részletes helyszíni vizsgálat (3. fázis), amely az egyedi eset kiértékeléséig terjed (4. fázis). A vízben, talajban és levegőben vizsgált

paraméterek azoknak a jellemző adatoknak felelnek meg, amelyek a hulladéklerakók ellenőrzésénél is fontosak (I. 8.4 fejezet). Alapvetően új módszerek kifejlesztése csak a biológiai tesztvizsgálatoknál található, ezek a 7.5.3 fejezetben a keretes részében olvashatók.

3. + 4. fázis - Részletes helyszíni vizsgálatok és egyedi értékelés

A veszélyeztetett terület közvetlen környezetében, ill. az azt körülvevő környezeti elemekben végzett kémiai analízisen kívül - a részletes helyszíni adatfelvételhez - *geofizikai* és *geológiai* vizsgálatok is szükségesek. Ezek körét a helyi adottságok és az egyedi eset értékeléséhez fűződő célkitűzés határozza meg.

Az *alkalmazott geofizika* - melynek gyökerei az energiahordozók (olaj, gáz, szén) felkutatásából erednek - néhány évtizede a „kisterületi” vizsgálatokban (pl. építési terület, talajvíz) is megerősödött, és mint ahogy az ércek és más ásványi nyersanyagok előfordulásának kutatásánál, úgy az öröklött hulladékok által veszélyeztetett területek vizsgálatánál a különböző módszerek széles spektrumát tudja nyújtani:

- *földmágnesség*, elsősorban a vas felkutatására, de ebből kiindulva alapvetően az inhomogenitások (mint pl. egy hulladéklerakó esetében) behatárolása,
- *gravimetria*, az altalajban a nem egyenletes sűrűségeloszlás felkutatására (klasszikus példa; sötömbök),
- *szeizmikus módszerek*, amelyek azonban nem mindig képesek megadni a „kis struktúrák” felbontását,
- *geoelektromos eljárások*, amelyekkel leginkább nagy kiterjedésű rendellenességek határozhatók meg, ezeket azután modellszámítások segítségével pontosabban behatárolhatják.

Az eddig rendelkezésre álló esettanulmányok szerint feltétlenül szükséges az *integrált geofizikai felderítés* és az interpretáció, vagyis a különböző egyedi módszereknek az összevont hidrológiai és geológiai adatok alapján való felhasználása. A kémiai analízissel szemben a geofizikai mérések hiányossága, hogy akár egy régi hulladéklerakó, akár szennyezett talajvíz stb. esetén nem tudnak információt adni az anyagösszetételről. A *geológiai és hidrológiai vizsgálatok* adatokat szolgáltatnak arról, hogy a veszélyeztetett terület altalajában a veszélyes anyagoknak milyen emissziós útjai lehetnek, és hogy hogyan néz ki a hulladéklerakó szerkezete. Különösen nagy jelentőségűek az információk a következő hidrológiai paramétereikről; „*áteresztőképesség*”, „*talajvíz-áramlási irány*”, és „*talajvíz-áramlási sebesség*” (lásd 7.1 fejezetben is). A régi hulladéklerakók vizsgálatának eddigi tapasztalatai rámutattak arra, hogy a geológiai veszély becslését *helyszín-specifikusan* és az *objektum bevonásával* kell meghatározni. A keretben összefoglaljuk a geológiai helyszíntértékeléshez alkalmazott munkamódszereket. Emellett megállapítható, hogy a különböző eljárások *kombinált módszeres* alkalmazása a vizsgálatok eredményességének a biztonságát növeli.

A geológiai helyszíni vizsgálatok módszerei

Altalaji „barriere” archív anyagának értékelése: geológiai térképek és irodalom, korábbi fúrásokból származó információk a rétegekről, vízgazdálkodási helyzet dokumentumai, légi felvételek)

Helyszíni munkálatok:

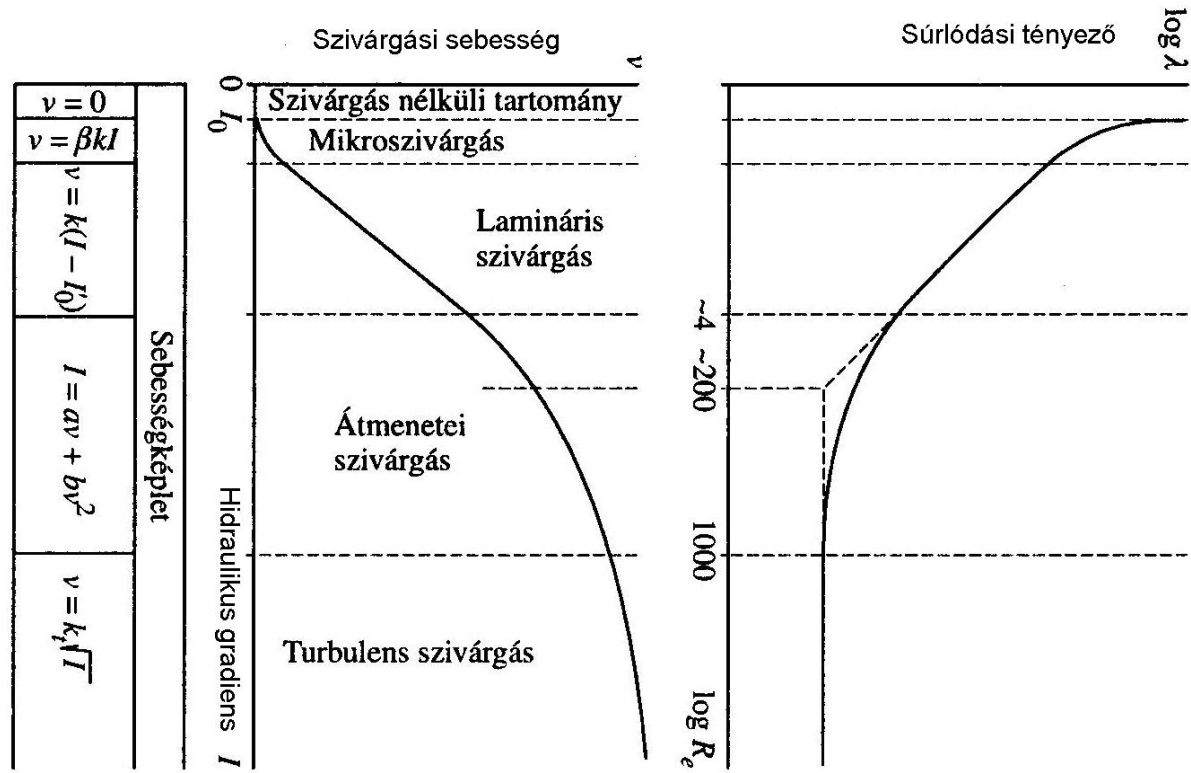
- *részletes térkép készítés;*
- *geológiai profil meghatározása (geológiai térkép a rendelkezésre álló szabadszelvények alapján);*
- *fúrások (geológiai paraméterek felderítése, mint pl. „időrendi besorolás”, „kőzetképződés és kiterjedés”, „altalajszerkezet-besorolás”), pl. hasadékok és „hibahelyek”;*
- *talajvíz-ellenőrző kutak kiépítése („talajvíz állapota”, „áramlási iránya és sebessége”, mintavétel az analízishez);*
- *szivattyús kísérlet (áteresztőképesség — k_f érték — meghatározása);*
- *geofizikai felszíni módszerek (lásd a szövegben);*
- *fúrólýuk-geofizika.*

Labormunkák:

- *szemcseméret-elemzés [homok- (iszap-), agyagrész, a szanálási fázisban az „építéstechnológiai barriere” számára is];*
- *röntgenanalízis (agyagásvány-meghatározás, főleg a duzzadóképes rész szempontjából);*
- *csiszolatanalízis (szövete, szerkezete, porozitás, üregek, repedések, hasadékok, diagenetikus változások, ásványkészlet);*
- *pásztázó elektronmikroszkópos felvétel (szövet, szerkezet, porozitás);*
- *mikropaleontológia (vízátjárhatóság indikációja, a mikrofosszíliákon kioldódási jelenségek);*
- *geokémiai paraméterek mint „karbonáttartalom”, „szerves anyag”, „ioncsere-képesség”, „pufferkapacitás”, „pH-érték”, „nehézfémek”;*
- *szerkezeti paraméterek mint „víztartalom”, „vízfelvevő képesség”, „plaszticitás” (DIN 18 196), „permeabilitás”, „porozitás”;*
- *a talajvíz hidrokémiai paramétereit, részben in-situ vizsgálatok*
- *pH-érték*
- *E_n -érték*
- *oxigéntartalom*
- *savas és bázikus kapacitás*
- *ADX (halogénezett szerves vegyületek kimutatása)*
- *nehézfémek és egyéb kation-szennyezés*
- *mikrobiológia: a mikrobiálisan szabályozott anyagforgalom felderítésére, mikrobiológiai in-situ eljárás bevezetésének ellenőrzése; a csurgalékvíz előkészítésének lehetőségei a szanálási fázisban.*

Kontrollintézkedések (folyamatos mintavétel és mérés)

II. Az egyes szivárgási tartományok



III.

2.1. Közvetlen talajfeltárás: mintavétel

2.1.1. Fúrás

A fúrással végzett közvetlen talajfeltárás mindmáig, és várhatóan a jövőben is általános, döntő fontosságú módszer, amelyhez képest az egyéb lehetőségek (kutatóárok, kutatógödör, természetes és/vagy mesterséges eredetű egyéb feltárások) mennyisége jelentéktelen. A geotechnikában alkalmazott fúrási technikák a következőképpen csoportosíthatók:

- A. *Száraz fúrás.* a) forgatással (I: csiga-, kanál-, korona-, iszapoló-, tányér-, vagy spirálfúróval; II: „végtelen spirállal; III: teljes hosszban magfúróval);
 - b) vésőzéssel;
 - c) ütve-fogatással.
- B. *Rotary-fúrás,* jobb-, vagy balöblítéssel, vízzel vagy fúróiszappal. (A magyar szabvány ugyan elvileg csak „száraz” fúrási eljárásokat „enged”, külföldön – pl. Nyugat-Európában – azonban a Rotary-fúrást is alkalmazzák homok- és iszaptalajokban.)

A száraz forgatás I. jelű esetében a fúrószerszám hosszával azonos mélységköz(ök) elérése után a talajmintát ki kell emelni, a II.-nál a talajkihozatal folyamatos. A folyamatos anyagfelhozatalból adódó nagy fúrási sebesség, illetve az ezzel összefüggő „termelési” érdekek magyarázzák, hogy a gépesített talajmechanikai feltárások zömét a II. jelű technikával végzik, annak ellenére, hogy e módszernél a rétegváltások, a (zavart) mintavétel és a geotechnikában sokszor döntő jelentőségű mikro-rétegek (csíkok betelepülések, lencsék, csúszási-elnyíródási felületek, stb.) eredeti helye, mélységköze még nagyobb fúrómesteri gyakorlattal is csak túl pontatlanul határozható meg. E pontatlanság megengedhető mértéke a szóban forgó feladattól is függ. A pontosítás folyamatos magfúrással, magmintavétellel is lehetséges volna, bár ez a fúrási sebességet lényegesen csökkenti, és emeli a költségeket. Némileg csökkenthető a fúrástechnikából eredő pontatlanság, ha – a fúrótorony magasságától is függően – több, akár 10 m hosszúságú spirálfúrót „hajtanak le” egy lépésben. Ekkor a talaj(minta) kiemelése a szerszámmal együtt történik. Ez a technika, amely hosszabb, és általában nagyátmérőjű talajoszlop „kiszakítását”, elnyírását követeli meg, nagyteljesítményű berendezést kíván. E módszer lényegében az I. típusokhoz tartozik, mégis az így elérhető fúrási sebesség a többihez mérten nagyobb. Különösen akkor, ha a kívánt feltárási mélység nem haladja meg az egy lépésben kiemelhető szerszámhosszat. Kül- és belföldön kizárólag „végtelen” spirál – más kifejezéssel hosszú csigafúró – alkalmazásával készülnek a geotechnikai céllal, gépi meghajtású berendezésekkel mélyített fúrások. E fúrásokat – esetenként magát a fúrást végző berendezést „hibrid” üzemben felhasználva – egyéb, „in situ” vizsgálati módszerekkel egészítik ki. A feltárás „világszínvonala” ilyen értelemben a közvetlen és közvetett módszerek technikai összefonódása. Az ilyen munka általában nagy szaktudást igénylő helyszíni döntéseket kíván, ezért sok országban mérnök vagy geológus irányítja a fúrásokat, helyszíni feltárásokat. A fúrás során alkalmazott szerszámok és azok „kinetikája”, a működtetés fázisai (fogatás, forgatás + sajtolás, kiemelés, tisztítás, stb.) elvei

lényegében változatlanok. E tekintetben a közeljövőben nem valószínű alapvetően új megoldás. Nyilvánvaló viszont a fejlődés a fúrési műveletekhez szükséges egyéb berendezések terén, amelyek az emberi közreműködést gyakorlatilag az irányítás-vezérlés körére szűkítették. Elsősorban a közepes (10 – 30 kW) teljesítményű gépkategóriában szembetűnő a haladás, ahol a világszínvonalat a trailerrel (vagy helikopterrel) helyszínre szállított többnyire lánctalpas terepjáró, száraz és Rotary-technikával egyaránt dolgozni képes, egyetlen személy által kezelhető gép jelenti, amellyel a meghatározott tartományon belül bármely szögben lehetséges fúrás és mintavételén kívül statikus és dinamikus szondázás, nyírószondázás, stb. is készíthető. Fúrési mélységük akár 50 – 100 m is lehet, nagytérű ($\varnothing > 80$ mm) magminták vételére viszont általában nem alkalmasak. Alapvető elemük az általában Diesel-motorral meghajtott hidraulikus tápegység, a mobil (hidromotoros) meghajtómű, a hidraulikus sajtoló- és kiszakító egység, valamint a pozícióhidraulika egységei. (1. ábra)



Említést érdemel, hogy külföldön a fúrások egy részét szinte rutinszerűen talajvíz-megfigyelő kúttá alakítják. A hazánkban még viszonylag gyakran előforduló *kézi fúrás* eszközeinek külföldi színvonalára jellemző, hogy a 10 m-es mélységig használható „egyszemélyes” fúrókészlet súlya mindössze 10 kg. A berendezéshez szárnyas nyírószondát, $\varnothing 21$ mm-es magvevőt, a „különleges magokhoz” pedig speciális ödométert is kifejlesztettek. Sőt előállították a normál, és a 21 mm-es átmérőjű magok ödométeres vizsgálati eredményeinek korrelációs görbéit is. Ennek ellenére kétséges, hogy szabad-e az elsődleges célt – a talaj tulajdonságainak helyes megismerését – mindenáron alárendelni egy másodlagos célnak, t.i. a fúrás szempontjainak.

2.1.2. Magmintaavétel

Az abszolút zavartalanság igénye, és a valóságban valamilyen szempontból sohasem teljesen zavartalan (mag-)minta paradoxona hasonló a kvantummechanika ama megállapításához, hogy maga a mérés (ti. eszköze) már önmagában is befolyásolja a mérés eredményét.

A mintavétellel járó *zavarok minimalizálására* számos eszközt alakítottak ki, amelyek pl. az alábbi szempontok szerint csoportosíthatók:

- a) A magvevő (eszköz) geometriája. Átmérő, élméret; karcsúság; vágóél (koronaél) kiképzése (élszög, dőlésszög, fűrészfogazás, stb.).
- b) A bevétel módja. Verőkossal (verőkalapáccsal); vibrációval; sajtolással (mechanikusan, nyomás alatti vízzel vagy fúróiszappal): forgatással; forgatva – sajtolóval.
- c) A magvevő-eszköz mechanikus védelmét biztosító elemek szerint. Védőcsúccsal (behúzható kúppal); egyszerű kiszúróhengeres magcső; kettős falú magcső; hármas falú magcső.
- d) A minta kiszakítását biztosító megszakítóval ellátott vagy megszakító nélküli.
- e) A minta kiemelés közbeni elvesztése ellen védőkosárral ellátott, vagy vákuumos (gömbszelepes).
- f) A magvevő eszköz anyaga: lehet acél és/vagy műanyag.

Az említett változatok többféle kombinációja is lehetséges. Röviden a következők állapíthatók meg:

- a) A zavartalan mintavétel alapeleme *mindmáig változatlanul* egy adott geometriájú, anyagú, stb. henger, amelyet valamilyen, a felszínről közvetített és/vagy irányított módon a furat talpába juttatnak.
- b) *Abszolút zavartalan mintát szolgáltató eljárás még (?) nem létezik.* A vágóélel érintkező zónában a különféle mértékű, de feltétlenül kialakuló „alágyúródás” megváltoztatja az eredeti textúrát, mikrorétegződést. A palást menti zavart zóna vastagsága kb. 5 – 10 mm. Úgyszintén kivédhetetlen a „mag” feletti talajoszlop eltávolításából következő terheléscsökkenés, egy új, hirtelen bekövetkező feszültségváltozás. Csak reméljük, hogy ez legfeljebb elhanyagolható zavarokat okoz az eredeti állapothoz képest. Elkerülhetetlenek a kapillaritás-viszonyok megváltoztatásából eredő következmények, zavarok is.
- c) A „zavartság” foka a talaj típusától és állapotától is függ. A durvaszemcsés talajok zavartalan mintavétele világszerte megoldatlan, és csaknem lehetetlen nagyfokú zavarás nélküli mintát venni a szélsőséges állapotú (víz alatti; nagyon puha; nagyon száraz; nagyon kemény) többi talajtípusból is. Itt is elsősorban a laza szemcsés változatok jelentenek gondot. Következésképpen egyetemes, talajtípustól és állapottól független zavartsági fokkal működő mintavevő eszköz sem létezik.

- d) A kedvezőtlen vágóél-geometria túlzott nyomóerő és/vagy nyomatékigénye (ilyen pl. a Mazalán-féle mintavevő) következtében kerültek előtérbe a lényegesen kisebb beviteli energiát igénylő vékonyfalú kiszúróhengerek. Az élek (élszög, törések) és átmérőviszonyok célszerű kialakítását – részben kritériális megfogalmazásban – a szakirodalom bőven ismerteti. Néhány ajánlás: A kiszúróhengerek előnyös átmérője max. 250 mm, mert a költségek az átmérővel többnyire négyzetesen növekednek. Még az igen puha állapotú talajoknál is legalább 50 mm legyen az átmérő. Rendkívüli mértékben megnő a mintavevőből történő kisajtolás során bekövetkező zavarás, ha a hossz/átmérő aránya > 14 . Ezért a legnagyobb maghossz ajánlott mértéke kb. 75 cm. A legjobb beviteli mód az 5 cm/sec körüli egyenletes sebességű sajtolás. A fűrészfogazású vágóélel kialakított hengereknél az előző préselési sebességhez 8 ford./perc sebességű forgatás ajánlott. Ez utóbbi típus különösen az előkonszolidált anyagokhoz, általában a kemény – pl. cementált homok – talajokhoz alkalmazható.
- e) A zárt rendszerű nyírószilárdsági és a konszolidációs együtthatóra irányuló vizsgálatokhoz legalább 150 – 250 mm átmérőjű minta kell(-ene). Kemény, repedezett agyagokból a tömbminta tekinthető reprezentatívnak, azonban furatból ez nyilván nem produkálható.
- f) Az általában fémből (pl. acélból) készített kiszúróhengerekkel szemben a PVC-nek számos előnye van: kicsi a falsúrlódás, reakciósemleges, ezért hosszabb ideig történő tárolásra is alkalmas, vágáskor vibrációmentes, véd a napsugárzás – pl. felmelegedés – ellen, és kb. 15 – 18 %-kal olcsóbb.
- g) A laza talajokból történő mintavételnél használható szilárdító gyanták hatása a nyírószilárdsági és alakváltozási paraméterekre ismeretlen. Nagyon kevés az információ a zavarás fokának, és a nyírási, rugalmassági modulusnak, valamint a Poisson-számnak az összefüggéséről.
- h) Jelenleg nincs olyan eljárás, amely az összenyomódási modulus és a Poisson-szám meghatározására elég jó mintákat adna.
- i) A zavartsági fok összefüggésben van a tárolás módjával – és nyilvánvalóan annak időtartamával is. A paraffinos lezárás – annak repedezési hajlama miatt – csak rövid időre megfelelő. Elsősorban Japánban alkalmazzák a pórusvíz egy részének távozása után a fagyasztást, illetőleg a tartódobozban az eredeti nyomásviszonyoknak rugóval ellátott fenéklemekkel való beállítását. A minták fa- vagy acéltárcsákkal való lezárása széles körben elfogadott.
- j) Bár szorosabb értelemben a laboratóriumi tevékenységhez tartozik, mégis itt logikus említeni a mintának a kiszúróhengerből vagy dobozból történő kinyomásánál fellépő változásait. E művelet során gyakran nagyobb erők dolgoznak, mint a leendő valóságos terhelés. A nagymintából kiszúróhengerrel (gyűrűvel) kiemelt kisebb minták „megzavarásának” lehetőségei az előzőekből következnek.

2.2.4. A vízáteresztő-képességi vizsgálatok

A laborvizsgálatokkal szemben legtöbbször hangoztatott jogos ellenvetés szerint az egyedi kisméretű minták nem reprezentálhatják elég híven a heterogén talajtömegeket. Kiváltképp igaz ez az áteresztőképesség meghatározására. Ezért itt már régóta előtérbe kerültek a helyszíni szivárgási vizsgálatok, ill. az 1.3. fejezetben vázolt „observational method”. *observational method is a continuous, managed and integrated process of design, construction control, monitoring and review enabling appropriate, previously-defined modifications to be incorporated during (or after) construction. All these aspects must be demonstrably robust. The objective is to achieve greater overall economy, without compromising safety.* Ezzel magyarázható az is, hogy már alig próbálkoznak a laboratóriumi áteresztőképességi vizsgálatok fejlesztésével. Három figyelemre méltó kezdeményezést mégis megemlíthetünk.

- a) A kis áteresztő-képességű agyagok (esetleg vízzárásra készített bentonitot is tartalmazó résfalanyagok) áteresztőképességét mi is, és a szakirodalom szerint mások is gyakran gumiköppennyel körbezárt mintákon, *triaxiális*, vagy ahhoz hasonló *cellában* mérjük. Ugyanis a szokásos fémhengerbe zárt mintákkal végzett mérés gyakran hamis eredményt adna, mert a hengerfal és az agyag közt óhatatlanul kialakuló hézagokban a mintán átáramló víznek többszöröse is átszivároghat.
- b) A kötöttebb, a kiinduláskor esetleg nem telített talajok vizsgálatához átalakították a szokásos változó víznyomású készüléket úgy, hogy a minta tetejéhez és aljához is egy-egy csövet csatlakoztattak. Így ellenőrizhető, hogy az egyik csőben bekövetkező vízszintcsökkenés valóban az átszivárgó vízhozamot jelenti-e, nem a talaj telítődik-e általa, A hidraulikus gradiens „kétféle” változása egyszerűen számításba vehető.
- c) A *vízszintes áteresztőképesség* különbözhet a függőlegetől. Ezért használatos olyan kísérleti berendezés, mellyel a vízszintes irányú szivárgási tényezőt mérik: egy hengeres talajminta tengelyébe egy porózus oszlopon keresztül vezetik be a vizet, amely csak a talajminta palástján léphet ki.

2.3. A terepi, közvetett talajvizsgálatok

2.3.1. Áttekintés

A talajmechanika hagyományos, fúrásra + laborvizsgálatra alapított módszerei mellett egyre inkább előtérbe kerülnek a helyszíni közvetett vizsgálatok. *Fejlődésük* új eszközök megjelenésében és többféle régebbi eszköz kombinálásában jelentkezik. A fejlesztés feltétele volt az elektrotechnika és a mikroelektronika robbanásszerű fejlődése. A közvetett eljárások régóta hangoztatott *előnyei* a hagyományos módszerekével szemben a gazdaságosság, a gyorsaság, a folyamatos talajprofil felvételének és a mintavételre alkalmatlan nagyobb talajzónák vizsgálatának lehetősége, a mintavétellel járó zavarokból származó hibák elkerülése, stb. Ezen előnyök mértéke és jelentősége még *fokozódott* is az utóbbi időben. A mérések kombinációja (L. p1. a nyomószondát) egyszerre ad többféle információt, így a talajosztályozás is megbízhatóbb. A mérőeszközök talajba juttatásának újszerű megoldásai,

p1. az „önlefűrő” pressziométerek, tovább csökkentik a zavarást. Az elektromos adatrögzítés és -feldolgozás lényegében a méréssel egyidejűleg szolgáltat eredményt, így a mérés helyszínén gyorsan, többlet-költségek nélkül lehet módosítani a feltérési terveket, igazodni lehet a felismert sajátosságokhoz. Az új, könnyen kezelhető eszközök munkaerő-megtakarítást is eredményeznek. A helyszínen a talajban működő feszültségek is mérhetők, aminek jelentősége az új talajmodellek és az újabb, a kezdeti feszültségállapotot is figyelembe vevő számítások szempontjából fontos. A helyszíni mérésekkel szembeni *fő ellenvetések*: a bizonytalan értelmezés és a tisztázatlan peremfeltételek (p1. a drénezési körülményekben) az utóbbi két évtized elméleti kutatómunkájának és a mérési tapasztalatok értékelésének eredményeképpen mindinkább *súlyukat veszti*. Ma már több helyszíni vizsgálat eredményéből nem(csak) korrelációs összefüggésekkel lehet a földsztatikai számításokhoz szükséges paramétereket meghatározni, hanem a mérőeszköz körül lezajló folyamat matematikai leírásának segítségével a mért eredményből a keresett paramétert is „visszaszámíthatjuk”. Mindezek folytán meghaladott az a nálunk még uralkodó nézet, miszerint a helyszíni mérés csak alárendelt kiegészítője a hagyományos módszernek. Számos paraméter meghatározásában, tervezési feladatban és gyakran előforduló sajátos talajadottságok esetén éppen hogy *elsőbbség illetheti* a közvetett módszereket – természetesen csak akkor, ha „világszínvonalú” felszereltséggel, ismeretekkel hajthatók végre ...

A sokféle helyszíni mérési módszert az áttekinthetőség kedvéért sokféle módon szokás csoportosítani. Mi aszerint tárgyaljuk őket, hogy a mérőeszköz lényegi részét hol és hogyan (a felszínen, vagy előre elkészített furatban ill. rudazattal lehajtva) működtetik.

2.3.2. „Felszínen végzett” (roncsolásmentes) mérések

Az „ipari” geofizikai műszerek felbontóképességének növekedése lehetővé tette geotechnikai alkalmazásukat.

- A. A *geoelektromos* és *szeizmikus* módszerek az egyszerűbb – két, legfeljebb háromsztatú – településviszonyok (rétegződés) szerkezet és talajvízszint kutatására alkalmasak. A rétegződés geometriáján túlmenően közvetlenül geotechnikai jellegű információt nem adnak. Gyorsaságuk és olcsóságuk következtében más módszerekkel kombinálva külföldön széleskörűen alkalmazzák őket, p1. az adott helyen közvetlen feltérással megismert talajmechanikai tulajdonságok „kiterjesztésére”. Alkalmazhatóságuk mélységhatára 10-30 m.
- B. A legszélesebb körben alkalmazható berendezés a felszín alatti határfelületekről grafikus képet adó *radar*. A felszín alatt eltemetett tárgyak (archeológiai leletek, csővezetékek, kábelek, stb.) észlelésén kívül alkalmas a rétegződés, geológiai képződményhatárok, víztükör, felszín alatti sziklák, kődarabok, üregek, jéglencsék, folyó- és tófenék stb. kimutatására. Felbontása 0,3- 0,5 m. Vízzel fedett, fagyott vagy jeges talajon is teljes képet nyújt. Hátránya a vezetőképességtől függő behatolási mélység, ami vízzel telített homokban legalább 25 m, jégben 70 m körüli, nedves agyagban 1,5 (!) m, tengervízben alig 30 cm. Előnytelen a nehézsége is - a teljes apparátus kézben (még) nem szállítható.

2.3.3. „Furatban végzett” mérések

Egyik-másik itt említendő eszköz a felszínen, aknában ill. kis mélységig furat nélkül, lesajtolva is működtethető.

- A. A *Standard Penetration Test* (SPT) a legelterjedtebb, 60 éve használt helyszíni mérés. 1977-ben már európai szabványajánlás készült róla. Lényege: egy furat talpa alá 45 cm hosszban levernek egy meghatározott méretű csövet, és mérik az utolsó 30 cm leveréséhez szükséges szabványos energiájú ütések számát. Ez a szondázási eredmény. A csőbe betömörödött talajt a szondával együtt kiemelik, tehát mintavételre is használható. Az *ütésszámból* - a már régóta gyűlölt tapasztalatok alapján - több talajjellemző megállapítható, illetve bizonyos tapasztalati képletekből az alapok süllyedése ill. teherbírása is megbecsülhető. Általános az a vélemény, hogy a homokok megfolyósodási hajlamát legjobban az SPT jelzi.
- B. A *nyírószondát* is általában egy furat aljából kissé lesajtolva működtetik. A nemzetközi gyakorlatban a puha agyagok, szerves, tözeges talajok zárt rendszerben érvényes (drénezetlen) nyírószilárdságának fő vizsgálati eszköze. Ilyen altalajú területeken a fúrással együtt rutinszerűen használják. A kézi hajtású, „egyszemélyes” változattól a gépi működtetésű, automatikus mérő- és értékelő rendszerrel felszerelt változatig nagy választékban készül. A látszólag egyszerű értelmezés ellenére számos bizonytalanság terheli, melyek főleg a nyírási sebesség és az anizotrópia hatásaival magyarázhatók. Ezért a vele mért nyírószilárdságot csak (az ismert Bjerrum-féle szorzóval) csökkentve szabad számításba venni.
- C. A *furat alján*, a talaj összenyomhatóságának mérésére végzett *tárcsás terhelés* nálunk is régóta használatos. Alapvető, lényegében elháríthatatlan hibája, hogy a terhelőlap felfekvése bizonytalan. Ezen segíthet a „*tányérfúróként*” kiképzett terhelő lap alkalmazása. Ezt a furat aljára engedik, majd néhány decimétert még előre hajtják, s csak ezután következik a terhelés. Így - bár a lecsavarás is okoz bizonyos zavarást - a felfekvés biztonságos.
- D. A *pressziométer* jól ismert, használatos hazánkban is. Franciaországban a talajfelderítés egyik fő eszköze. Kifejezetten az így meghatározható paramétereken alapuló méretezési eljárásokat is kidolgoztak. Más országokban kevésbé terjedt el, elsősorban a furat falának zavartságát és a vízszintes terhelési irányt kifogásolják. A táguló üreg körül kialakuló feszültség-állapot elméleti megoldása a módszer terjedését eredményezheti. A zavarást úgy küszöbölik ki, hogy ún. *önlefúró*” eszközként alakítják ki őket.

A pressziométer alá egy fúrószerszám került, mely akkora átmérőjű furatot készít amekkora a pressziométer „alapállapotában” éppen belefér. Az ilyen eszközt szinte egyidejűleg fejlesztették ki Franciaországban PAFSOR, Angliában pedig Camkométer néven (6.ábra). Különbség csupán a fúróeszközben és abban van, hogy az angol eszköz membránjába még egy pórúsvíznyomás-mérőt is beépítettek. Az ilyen berendezéssel a kezdeti feszültség is mérhető.

- E. A *pressziopermeaméter* – a pressziométerhez hasonló áteresztőképesség-vizsgáló eszköz – is ismert hazánkban. Hibájául is ugyanazokat szokták felróni, mint a pressziométernél. Ennek is elkészítették már „önlefűrő” változatát, mely pontosabb eredményt ad.
- F. A furat falát alkotó talajok nyírószilárdságának mérésére szolgál két újabb – még kevésbé elterjedt – eszköz. A *Phikométer* szemcsés talajok belső súrlódási szögének meghatározására alkalmas. Egy rugalmas hengert mérhető nyomással a furat falához szorítanak. Mérhető a létrejövő érintkezési felület is. Ezután a hengert kihúzzák, és mérik az ehhez szükséges erőt. Az adatokból a falon ható normál- és nyírófeszültség, ebből pedig a henger és a talaj közti súrlódási szög számítható. Az USA-ban puha agyagokban használatos *húzószonda* egy fogazott hengerből áll, mely belülről tágítható, így a fogak a furat falába nyomhatók. A henger felhúzásakor a fogak mentén elnyíródik a talaj, a mért erőkből a nyírószilárdság számítható.
- G. *Vízmozgási jellemzők és az áteresztőképesség* mérésére gyakran használják fel – fúrás közben vagy közvetlenül utána – a furatokat. Sok esetben megfelelő bélés-csővezéssel, szűrőzéssel látják el őket, hogy a talajvíz mozgásának hosszabb megfigyelésére vagy későbbi (újabb) áteresztőképesség-vizsgálatokra is alkalmasak maradjanak. Sokszor piezométereket építenek a furatba a későbbi víznyomásváltozások mérésére és/vagy áteresztőképességi vizsgálatra. A furat körüli talaj áteresztőképességét a furatbeli víz emelésével vagy leszívásával kiváltott áramlásból határozzák meg. A vízszint változását folyamatosan regisztrálják, és ebből a különböző rétegviszonyokra levezetett összefüggésekkel az áteresztőképesség számítható. A vízszintet ma már szinte kizárólag elektromos mérőeszközzel határozzák meg.
- H. A *karotázsvizsgálatok* a méréstechnika új vívmányainak eredményeként ma már nagyon finom felbontóképességgel bírnak, így képesek a mikrorétegződés, repedések, vékony betelepülések, elnedvesedett sávok kimutatására. Ezzel jó kiegészítői lehetnek az erre egyre kevésbé képes fúrásos feltárásnak. Általában a következőkből áll a „teljes karotázs”: természetes elektromos potenciál és természetes gammasugárzás mérése, elektromos szondázás, izotópos mérés (neutron – γ és γ - γ), termoszelvényezés. Jellege miatt itt említjük a fúrólyukba lehajtott *akusztikus* szondákkal végezhető méréseket, mely a talajok különböző hangelnyelési és -visszaverési képességét mérve ad képet a rétegződésről.

2.3.4. Felszínről lehajtott szondákkal végzett mérések

A régebbi szondáknál csak a behatolási ellenállás méréséről volt szó, egyes újabb eszközöknél már más adatokat (is) rögzítenek.

- A. A *nyomószondázás* az, melyet (az SPT mellett) a legtöbbször használnak. Már ma is a legszélesebb körben használhatók az eredményei, és - mivel elméletileg „elég jól”

értelmezhető a szonda csúcsa körüli talajviselkedés - elvileg is a legígéretesebbnek tekinthető. Gyakorlatilag mindenütt azonos a szonda mérete (60° kúpszög, 10 cm^2 keresztmetszetű, és 150 cm^2 palástfelület.) A csúcscellenállást (q_c) és a palást súrlódást (f_s) elkülönítve és folytonosan regisztrálják. A „világszínvonalú” szondákba már piezométert is beépítettek, mely a behatoláskor keltett pórusvíznyomást (u) méri. (Ennek csúcshoz viszonyított helye még nem egységes, a közeljövőben ez is rögzítendő, mert nem közömbös.) Újabban az oldalirányú feszültségek mérésére szolgáló cellát, akusztikus, termo-szeizmikus és izotópszondát is helyeznek a köpenyrészbe. Ezek azonban még csak a kutatás szintjén vannak. A korszerű szondákhoz olyan adatfeldolgozó rendszer kapcsolódik, mely a mért jelekből tetszés szerint nyomtatott, kirajzolt, képernyőre kivetített, mágneslemezen rögzített, stb. „talajmechanikai” eredményt adhat. Ezek felhasználása rendkívül széleskörű. A talajazonosítást a nálunk is használatos, Schmertmann által készített, a q_c és az f/q_c adatokra épített diagram mellett nagyon jól segíti a pórusvíznyomás-mérés, mert a szondabehatolás a szemcsés talajokban csekély, a kötöttekben viszont nagy pórusvíznyomást kelt (7. ábra). Ma általában úgy vélik, hogy a statikus szondázás eredményeiből lehet a cölöpök teherbírását a legmegbízhatóbban - bár korántsem kifogástalanul - megbecsülni.

- B. A *dinamikus szondázás* (verőszondázás) alkalmazása az utóbbi évtizedben nem növekedett, jelentősége inkább csökkent. Ennek oka (de következménye is), hogy egységesen elfogadott szondaméret és eljárás nincs. Még a nemzeti szabványosítás sem általános. Általában a talajrétegződés felmérésére és a szemcsés talajok tömörségének becslésére használják, mint nálunk is. Más alkalmazásra (kötött talajok konzisztenciájának, nyírószilárdságának, összenyomhatóságának becslésére) akadnak egyedi, lokális érvényű példák, de általánosan ajánlható korrelációs kapcsolatok nincsenek. Meghatározó, hogy a dinamikus terhelés értelmezéséhez még nincsenek meg a szükséges ismeretek, ezért a nyomószondához hasonló alkalmazásra még várni kell. Ugyanakkor a hasonló SPT-vel már jóval több a tapasztalat.
- C. A *súlyszonda* (más néven szondafúró) a skandináv területen használatos, másutt alig. A szabványos fúrót súlyterhelés mellett forgatják le, és mérik a 20 cm behatoláshoz szükséges félfordulatok számát. Ennek változásából a rétegződés, értékei nagyságából - elég durva korrelációkkal - a talaj tömörsége és szilárdsága becsülhető. A nálunk is használatos Borro kézi fúróberendezésekkel is végrehajtható, azokat ehhez fordulatszám-mérővel szerelték fel. A nyomóerőt ekkor a két kezelő személy súlya adja, ami erőmérővel regisztrálható. Úgy ítélik meg, hogy a nyomószondázás lassan kiszorítja.
- D. A *lapdilatométer* viszonylag új, olasz találmány, használata gyorsan terjed. Egy vékony pengébe membránt építettek, mely belülről gáznyomással terhelhető, Az eszközt lesajtolják a talajba, eközben kb. 20 cm-enként mérést végeznek. Két adatot rögzítenek: a kezdeti (kinyomódás előtti) és a membrán közepének 1 mm-nyi kinyomódását okozó gáznyomásokat. Ezekből három paramétert: a talajazonosítási, az

oldalnyomási indexeket és a dilatométer-modulust lehet meghatározni. Ezekből aztán különböző korrelációs kapcsolatok segítségével a talajok osztályozhatók, megállapítható K_0 értéke, az összenyomódási modulus becsülhető, stb. Mindenképpen ígéretes eszköznek tekinthető.

- E. A talajba sajtolt *feszültségmérő szondák* jelentősége a kezdeti feszültségállapot (közelebbről a K_0 -érték) ismeretének fokozódó igénye miatt növekedett meg. A régóta használatos pengeszerű elemek lesajtolásakor mindig fennállt a zavarás ismeretlen mértékű veszélye. A legjobb eredményeket az ún. *ásó-alakú* (spade-like) *teljes-feszültségmérő* adja. Ígéretesebb eszköz az *Iowa-lépcsős cella* (Iowa stepped blade, **8. ábra**). A négyféle vastagságú pengébe épített cellán mért nyomásból a zérus vastagsághoz tartozót extrapolálva kapják. (Érdekes „filozófiai” kérdés: a zérus mértékű zavarás azonos-e a zavartalansággal. Nincs-e mégis minőségi különbség.)

IV. Hidraulikai alapismeretek

Energiaviszonyok.

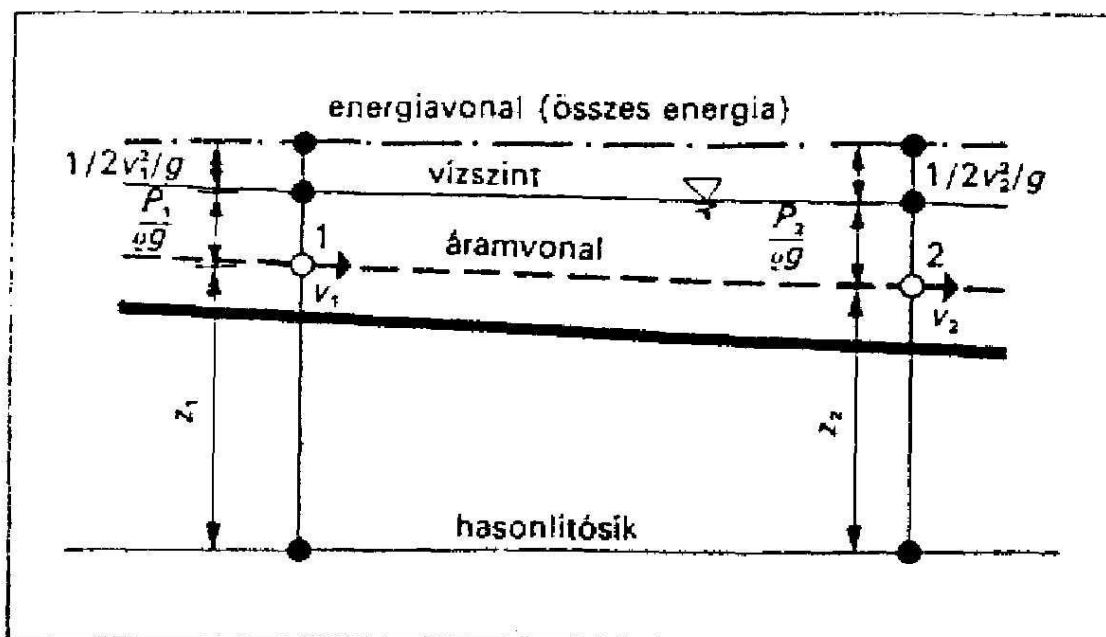
A hidraulikának is az egyik alaptörvénye az *energia-megmaradás elve*. Egy zárt rendszeren belül energia nem veszt el, nem is keletkezhet. A víz mozgása közben különféle energiákkal rendelkezhet. Zárt rendszeren belül ezeknek az energiáknak az összege egy áramvonal különböző pontjain egyenlő.

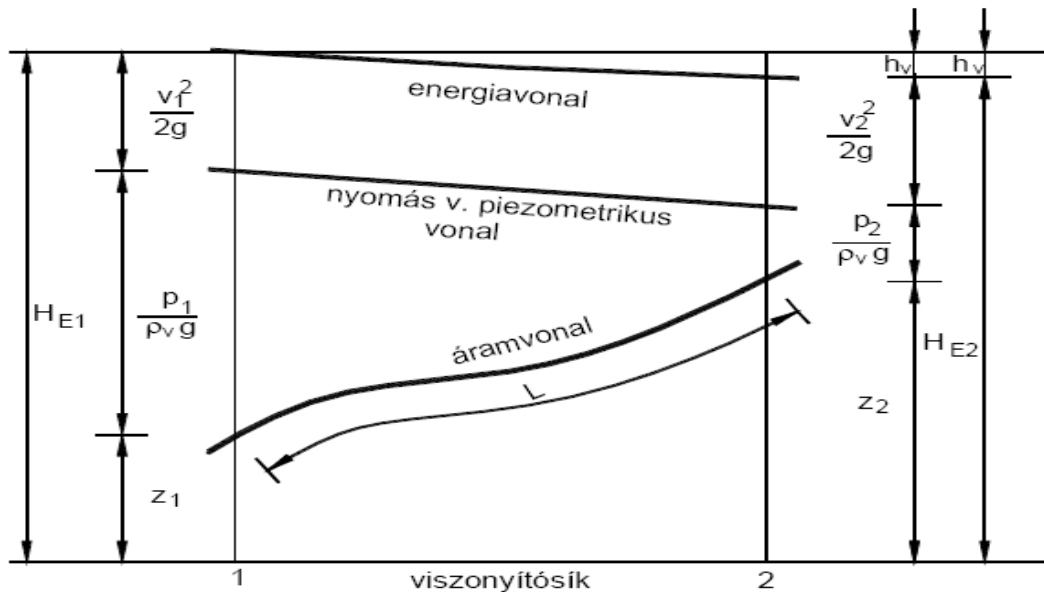
Áramvonalnak nevezzük azt a síkbeli vagy térbeli görbét, amelyen egy elemi vízcsepe az 1 jelű pontból a 2 jelű pontba jutott (3.10. ábra), térfogategységére vonatkozóan három energiatípusra osztható:

- kinetikus vagy mozgási energiával ($1/2\rho v^2$)
- helyzeti energiával ($\rho g z$)
- nyomási energiával (p).

Tételezzük fel, hogy az elemi vízcsepe az 1 jelű pontból a 2 jelű pontba való jutását semmilyen ellenállás nem akadályozza, vagyis energiavesztés nincs, akkor a két pontban a különböző energiák összege egyenlő, vagyis

$$(1/2 \rho v^2 + \rho g z + p)_1 = (1/2 \rho v^2 + \rho g z + p)_2 = \text{állandó}, \quad (3-14)$$





3.10. ábra A mozgási energia fajtái

ahol; v vízrészecske mozgásának sebessége,

ρ a víz sűrűsége,

g a gravitációs gyorsulás,

z a vizsgált pont viszonyítási sík feletti magassága,

p a nyomás.

A (3-14) **összegzés** tehát csak abban az esetben igaz, ha a vízrészecske egy áramvonal mentén mozgott, az áramlás permanens (időben állandó) volt és az energiavesztés elhanyagolható.

Permanens az áramlás abban az esetben, ha az áramlási jellemzők, elsősorban az áramlás sebessége egy adott helyen időben állandó. Akkor, ha az áramlási jellemzők egy adott helyen időben változnak, *nem permanens* (változó) vízmozgásról beszélünk.

A (3-14) összefüggés a *Bernoulli-egyenlet*, amelynek általános alakja

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g z + p = \text{állandó.} \quad (3-15)$$

A gyakorlatban (pl. a talajvízmozgás vizsgálatánál) a kis mozgási sebesség miatt a kinetikai energiát el szokták hanyagolni, így a teljes energiameggység

$$\rho g z + p = \text{állandó.}$$

Ez az összefüggés egységnyi térfogatú folyadékra vonatkozik. Áttérve az egységnyi tömegre vonatkoztatott energiára, az összefüggés:

$$\frac{p}{\rho g} + z = \text{állandó} = h \quad [\text{m}] \quad (3-16)$$

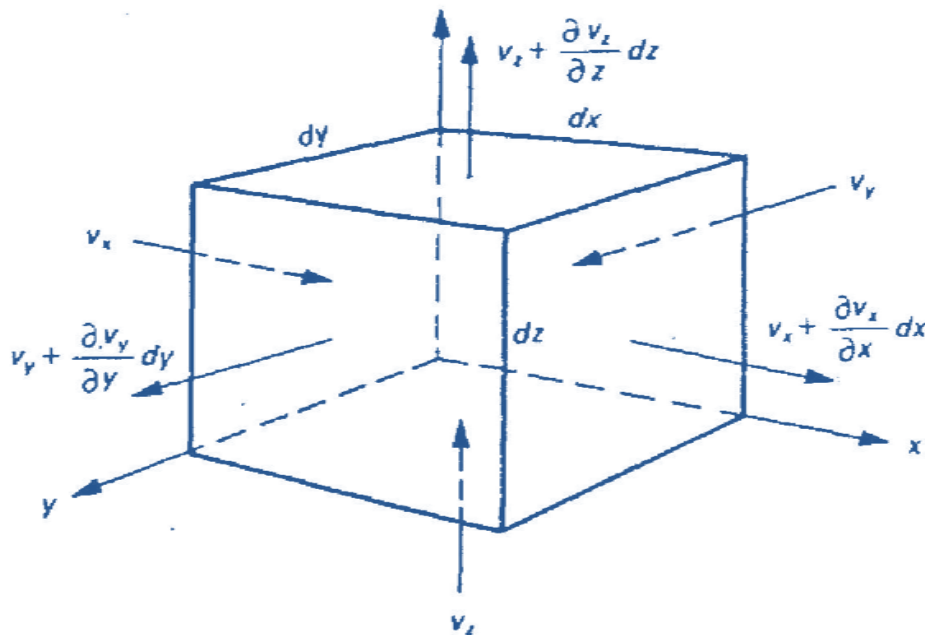
alakú lesz, ahol h a teljes *hidraulikus energia* (az ún. nyomómagasság), ami *nyomási energiára* ($p/\rho g$) és *helyzeti energiára* (z) osztható. A (3-16) összefüggéssel lehet leírni a talajvíz potenciálját, ami tehát a talajvíz szintje alatt tetszőlegesen kiválasztott viszonyítási síkra vonatkozik.

Sebességviszonyok.

A vízmozgás másik fontos alaptörvénye az *anyagmegmaradás elve*. Eszerint egy elemi térfogategységbe beáramló és onnan kiáramló folyadék térfogatának egyenlőnek kell lennie (a vizet ebben az esetben összenyomhatatlannak tartjuk). Az elemi térfogategység legyen egy olyan elemi kocka, amelynek oldalhosszúságai

$$dx = dy = dz \quad (3.11. \text{ ábra}).$$

A folyadék elemi idő alatt (dt) áramlik át a kockán. Az egyenlőségnek nemcsak a belépő és a kilépő víztérfogatra, hanem annak elemi idővel szorzott értékére (tehát lényegében az elemi vízhozamra) is igaznak kell lennie.



3. 11. ábra. Az elemi víztérfogatot jellemző sebességek

Abban az esetben, ha a sebességeloszlást az elemi felületeken egyenletesnek tételezzük fel, x irányban, v_x sebességgel a kocka $dy \cdot dz$ felületén, dt idő alatt lép be a víz, tehát a beáramló víztérfogat

$$v_x \cdot dy \cdot dz \cdot dt.$$

A kiáramlás x irányban az átellenben levő oldalon történik, amelynek méretei megegyeznek a belépőoldal méreteivel, de a sebesség a dx úthossz megtétele alatt megváltozott, amit a

$$v_x + \delta v_x / \delta x \, dx$$

kifejezéssel lehet leírni. Az x irányban kilépő víztérfogat tehát

$$(v_x + \delta v_x / \delta x \, dx) \, dy \cdot dz \cdot dt.$$

A belépő és a kilépő víztérfogat különbsége:

$$\Delta V_x = \left(v_x + \frac{\delta v_x}{\delta x} dx \right) dy \, dz \, dt - v_x \, dy \, dz \, dt. \quad (3-17)$$

A (3-17) összefüggést kifejtve és a kijelölt műveletet elvégezve fel lehet írni

$$\Delta V_x = \frac{\delta v_x}{\delta x} \, dx \, dy \, dz \, dt \quad (3-18)$$

alakban, ami lényegében az x irányban mozgó víztérfogat megváltozását írja le. A (3-18) egyenlet analógiájára fel lehet írni a mozgó víz térfogatának y és z irányú megváltozását is. Az anyagmegmaradás törvénye szerint azonban az elemi térfogategységen átáramló víz teljes térfogatváltozásának 0-nak kell lennie, ezért

$$\frac{\delta v_x}{\delta x} \, dx \, dy \, dz \, dt + \frac{\delta v_y}{\delta y} \, dy \, dx \, dz \, dt + \frac{\delta v_z}{\delta z} \, dz \, dx \, dy \, dt = 0 \quad (3-19)$$

Permanens (időben állandó) esetben az egyenlet egyszerűbb formára hozható:

$$\frac{\delta v_x}{\delta x} + \frac{\delta v_y}{\delta y} + \frac{\delta v_z}{\delta z} = 0, \quad (3-20)$$

ami a *folytonossági* (kontinuitási) *egyenlet* általános formája.

A hidraulikában szokásos az a gyakorlat, hogy a koordináta-rendszer x irányát az áramlási iránnyal párhuzamosan helyezik el úgy, hogy az x tengely érintőlegesen csatlakozzon az áramvonalhoz. Ebben az esetben az y és a z irányú sebességkomponens 0, áramlás csak az x irányban van, tehát az időegység alatti víztérfogat változásának az x irányban kell egyenlőnek lennie 0-val:

$$\left(v_x + \frac{dv_x}{dx} \, dx \right) dy \, dz \, dt - v_x \, dy \, dz \, dt = 0. \quad (3-21)$$

Mivel a $dy \cdot dz$ egy elemi felület (dA), a (3-21) egyenlet felírható

$$v_{x+dx} \, dA - v_x \, dA = 0 \quad (3-22/a)$$

vagy

$$(v \cdot dA)_{x+dx} = (v dA)_x = dQ \quad (3-22/b)$$

alakban is. A dA elemi felületnek (keresztmetszvénynek) megfelelő véges nagyságú felület az A , az ezen a felületen átfolyó vízhozama Q , így a folytonossági egyenlet:

$$Q = \int_A v dA = \bar{v} A \quad (3-23)$$

ahol: \bar{v} az A -felületre (keresztmetszvényre) vonatkozó átlagos sebesség.

A (3-23) összefüggés az áramló folyadékok egyik legfontosabb paraméterének, a *vízhozamnak* (időegység alatt, adott keresztmetszeten áthaladó víztömegnek) a meghatározását teszi lehetővé. Vízfolyásokban, csatornáknál a *vízhozam* meghatározása az áramlás *átlagos sebességének* és a *keresztmetszvény területének* megmérése után a (3-23) összefüggéssel számítható. Az áramló víz sebességét azonban meg lehet határozni az áramlást létrehozó és az azt fékező erők segítségével is. Meghatározott kezdeti feltételek esetén a gravitációs erő mozgásirányú komponenséből meghatározva azt a csúsztatófeszültséget, ami a mozgás ellen hat, a $\tau = \rho g R I$ összefüggéshez, a mozgási energiából levezetve a $\tau = c \rho v^2$ egyenlethez jutunk, ahol tehát τ a csúsztatófeszültség, ρ a víz sűrűsége, g a nehézségi gyorsulás, R a hidraulikus sugár, I a vízszint esése, c dimenzió nélküli állandó, v pedig a vízmozgás sebessége. A két összefüggés egyenlőségéből a v -t kifejezve és a $g/c = C$ helyettesítéssel a

$$v_k = C \sqrt{R I} \quad (3-24)$$

összefüggéshez, a *Chézy-egyenlethez* jutunk,

ahol:

- v_k - a víz középsebessége,
- C - a sebességtényező,
- R - a hidraulikus sugár,
- I - az átlagos hidraulikus esés.

Ez az egyenlet alkalmas *nyílt felszínű vízfolyásokban* a *sebesség* meghatározására. A sebességtényező (C) összefüggések és táblázatok segítségével határozható meg.

A talajcsövek méretezéséhez csőhidraulikai ismeretekre is szükség van.

A (3-23) folytonossági egyenletet ebben az esetben is fel lehet használni a számításhoz, csak a sebesség meghatározásakor kell másképpen eljárni, mint nyílt felszínű esetben. A sebesség meghatározására csövek esetében általában a **Manning - Strickler**-féle összefüggést használják:

$$v = K_M R^{2/3} I^{1/2}, \quad (3-25)$$

ahol:

v - az átlagos vízsebesség,
 K_M - a simasági tényező (értéke flexibilis műanyag csöveknél 70, égetett agyagcsöveknél 65),
 R - a hidraulikus sugár,
 I - az esés.

A hidraulikus sugár $R = d/4$, így a sebesség

$$v = 0,40 K_M d^{2/3} I^{1/2} \quad (3-26)$$

a vízhozam pedig az $A = d^2 \pi r/4$ helyettesítéssel a

$$Q = 0,31 K_M d^{8/3} I^{1/2}, \quad (3-27)$$

ahol: Q a dréncső vízszállító képessége,
 K_M a simasági tényező,
 d a csőátmérő,
 I a cső átlagos esése.

Műanyag csövek méretezésekor gyakran alkalmazzák a **Wesseling - Homma**-féle összefüggést is:

$$Q = 61,62 x d^{2,745} I^{0,573}, \quad (3-28)$$

ahol: Q - a cső vízszállító képessége,
 x - a perforáció minőségétől függő állandó (értéke 0,93-0,98),
 d - a csőátmérő,
 I - a cső átlagos esése.

A szivárgáshidraulikai alapok ismertetése előtt röviden összefoglalunk néhány olyan hidraulikai alapfogalmat, amelyek a következő részben szerepelnek.

Lamináris az áramlás akkor, ha az áramvonalak egymással párhuzamosan futnak, a vírzészecske sebességének egy pontban csak az áramlás irányába eső komponense van.

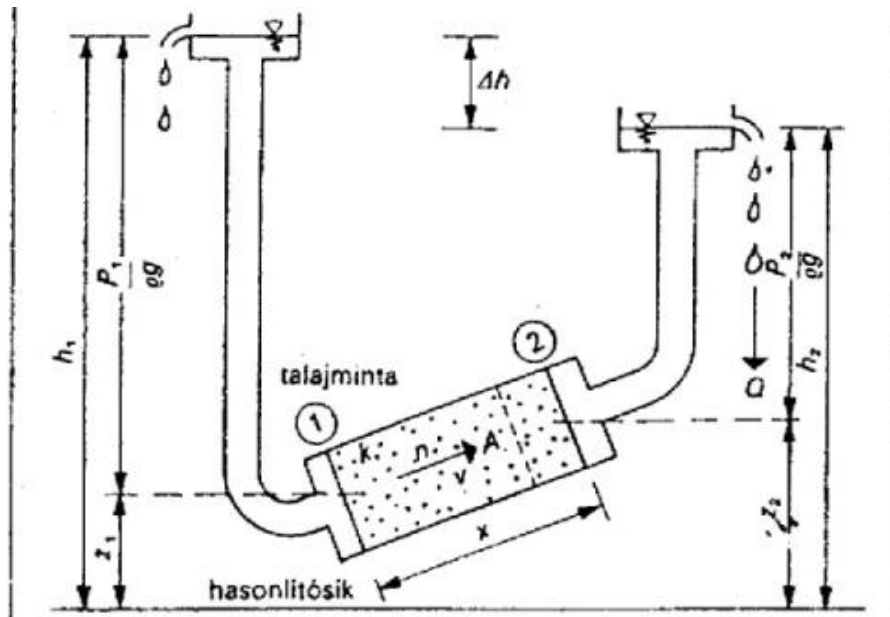
Turbulens vízmozgás esetén a folyadék részecske pulzál, tehát az áramlási iránytól eltérő sebességkomponense is van.

Homogén az áramlási tér (pl. egy talajtér) akkor, ha jellemzői valamennyi helyen megegyeznek és időben állandóak (pl. a talaj porozitása, szivárgási tényezője).

Az *izotropitás* a jellemzőknek az iránytól való függetlenségét jelenti (tehát ha pl. a talaj egy adott pontjában a szivárgási tényező minden irányban azonos, a talaj szivárgás szempontjából izotrop, de ha a vízszintes és a függőleges szivárgási tényező eltérő, a talaj szivárgás szempontjából anizotrop).

Sík mozgás (sík áramlás) esetén a vízmozgás jellemzői csak két irányban (egy síkban) változnak. Mivel a vízmozgás mindig térbeli mozgás, sík áramlás esetén a mozgástér végtelenül sok olyan síkból áll, amelyekben a mozgásjellemzők a harmadik koordináta irányában nem változnak. Ezek a síkok egymással párhuzamosak, bennük azonos paraméterekkel jellemezhető mozgás történik, tehát elegendő egy síkot vizsgálni, és nincs szükség térbeli vizsgálatra.

A *transzmisszivitás* a talaj egy adott rétegének vízszállító képessége, azaz a vízáteresztő képességnek és a rétegvastagságnak a szorzata (kD).



3.12. ábra A Darcy-törvény kísérleti értelmezése

Szivárgáshidraulikai ismeretek.

A gyakorlati hidraulikai feladatok megoldásakor a mozgás közben keletkező *veszteségektől* nem lehet eltekinteni. Szivárgó vízmozgás esetén a talaj a mozgást akadályozza, ellenállást okoz, az áramló vírzecskék a talajszemcsékkel sűrűlnek, és ez energiavesztéssel jár. A valóságban tehát, ahogy azt a 3.12. ábra is mutatja, vízszlopban kifejezhető energiavesztés keletkezik szivárgás közben. A vizsgálatok azt mutatták, hogy ez a veszteség függ az ellenállást okozó talajminta hosszától. Darcy vizsgálatai alapján azt találta, hogy azonos mintahossz, keresztmetszet és energiavesztés esetén a 3.12. ábrán vázolt készüléken átfolyó vízhozam nagysága a minta anyagi minőségétől függ. Ezt az arányossági tényezőt, ami tehát egy anyagi tulajdonság jellemzője, nevezzük vízáteresztő képességnek (szivárgási tényezőnek vagy vízvezető képességnek).

A rendszeren átfolyó vízhozam

$$Q = k \frac{\Delta h}{x} A \quad (3-29)$$

ahol: Q - a vízhozam,

k - szivárgási tényező,
 Δh - az energiaveszteség vízoszlopban kifejezve,
 X - a minta hossza,
 A - a minta keresztmetszeti területe a csőben.

Abban az esetben, ha a vízhozamot elosztjuk a cső keresztmetszeti területével, egy sebességmértékegységű mennyiséget kapunk, ami *szivárgás látszólagos sebessége*:

$$v = \frac{Q}{A} = k \frac{\Delta h}{X} = kI \quad (3-30)$$

ahol: I - a minta egységnyi hosszára jutó nyomásveszteség, más néven a nyomásgradiens.

Mód van arra is, hogy meghatározzuk a talajban a tényleges szivárgási sebességet. Ez nagyobb, mint a látszólagos sebesség. Értékét a talaj hézagterfogatának (pórusvolu menének) ismeretében határozhatjuk meg:

$$v_t = \frac{Q}{nA} = \frac{v}{n} \quad (3-31)$$

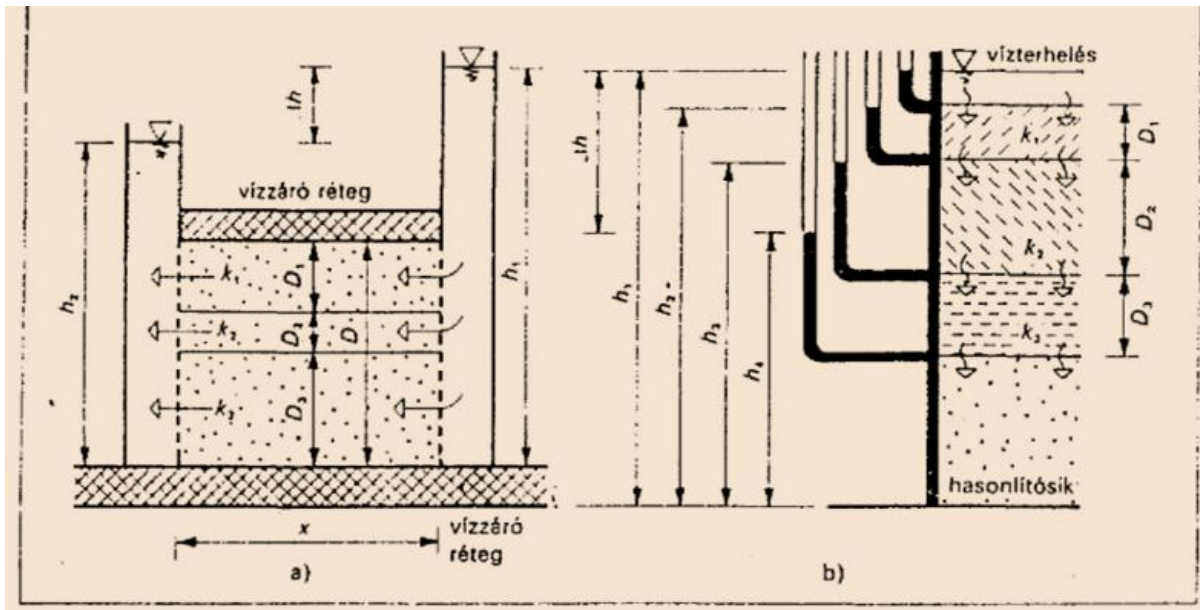
ahol: v_t - a tényleges szivárgási sebesség,
 Q - a vízhozam
 A - a keresztmetszeti terület,
 n - a hézagterfogat,
 v - a látszólagos szivárgási sebesség.

A Darcy-törvény csak lamináris vízmozgásra érvényes, tehát amikor a Reynolds-szám kisebb 5-nél. (A Reynolds-számot az $Re = \frac{d_{eff} \cdot v}{\nu}$ összefüggéssel számítjuk, ahol a d_{eff} az effektív szemcseátmérő, ν a kinematikai viszkozitás, v a talajvízáramlás sebessége.) Fenntartásokkal lehet csak figyelembe venni érvényességét az ún. mikroszivárgási tartományban. Itt ugyanis a szivárgási sebesség már nincs egyenes arányban a nyomásgradienssel, mert inkább a kapilláris erők dominálnak. Az is lényeges feltétel, hogy a Darcy-törvény csak kétfázisú állapotban érvényes. Abban az esetben, ha levegő is van a szivárgási térben, a szivárgási sebességet a nedvességpotenciál határozza meg.

A Darcy-törvény lényege tehát, hogy a sebesség és a nyomásgradiens között egyenes arányosság van és az arányossági tényező a szivárgási tér anyagi jellemzője. A vízáteresztő képességet (vízvezető képességet, szivárgási tényezőt, hidraulikus vezetőképességet) fel lehet fogni egységnyi nyomásgradiens mellett kialakuló szivárgási sebességnek is. Meghatározása a szivárgáshidraulikai feladatok (és így a talajcsövezés) számára elsőrendű fontosságú. A vízáteresztő képesség mérésére szabadföldi és laboratóriumi módszereket dolgoztak ki. Ezeket a módszereket a 4. fejezetben ismertetjük. Meg lehet határozni a *szivárgási tényezőt* elméleti úton is. Tételezzük fel, hogy a talaj mint porózus anyag olyan csövekből áll, amelyeknek átmérője az átlagos pórusnagyságnak felel meg. Ebben az esetben ki lehet indulni a cső vízszállító képességét leíró egyenletből. Megfelelő átalakítások után az egyenlet

$$k = \frac{\rho d^2 \rho g}{32 \eta} \quad (3-32)$$

ahol: k - a szivárgási tényező (vízáteresztő képesség),
 d - az átlagos pórusméret,
 ρ - a sűrűség,
 g - a nehézségi gyorsulás,
 η - a dinamikai viszkozitás.



3.13. ábra A vízáteresztő képesség és a szivárgási sebesség értelmezése rétegzett talaj esetében

A folyadék, így a víz sűrűsége és viszkozitása **függ** a hőmérsékletüktől, ezért a számítások közben hőmérsékleti redukcióra is szükség lehet. A hőmérsékleti redukálást a 4. fejezetben leírt módon kell elvégezni.

Gyakran előfordul a talajcsövezési gyakorlatban, hogy különböző vízáteresztő képességű rétegekből álló talajon keresztül megy végbe a szivárgás. Ebben az esetben a teljes talajszelvényen átszivárgó vízhozamot vagy egy eredő áteresztőképességet kell meghatározni. Abban az esetben, ha a rétegsorok a szivárgás irányával párhuzamosak (3.13/a ábra), a nyomásvesztés létrehozásában a rétegek vastagságuk és áteresztőképességük szerint részesednek. Egy-egy rétegen átszivárgó vízhozam: $q_i = k_i D_i I$, így a teljes vízhozam:

$$q_1 + q_2 + q_3 = \sum q_i = q = (k_1 D_1 + k_2 D_2 + k_3 D_3) I = \sum (k D) I, \quad (3-33)$$

ahol: q - az indexes értékei az egyes rétegek vízhozamát,

q - a teljes vízhozamot,

D - indexes értékei a rétegek vastagságát,

k - indexes értékei az egyes rétegek vízáteresztő képességét,

I - a nyomásgradienst ($\frac{\Delta h}{x}$, l. 3.12. ábra) jelöli.

Meg lehet határozni az átlagos vízáteresztő képességet is:

$$k = \frac{\sum k_i D_i}{D} \quad (3-34)$$

ahol: k az átlagos vízáteresztő képesség (szivárgási tényező),
 D - a teljes (összegezett) rétegvastagság,
 $k_i D_i$ - az i -edik réteg vízszállító képessége (transzmisszivitása).

A szivárgás iránya a rétegsorra merőleges is lehet (3.13/b ábra). Ebben az esetben az egyes rétegekben kialakuló nyomáseséseket külön-külön kell meghatározni, és ezeket kell összegezni teljes nyomáseséssé. Egy-egy réteg sebessége és nyomásesése a következő összefüggésekkel számítható ki:

$$v = k_i \frac{h_i - h_{i+1}}{D_i}, \text{ illetve } v \frac{D_i}{k_i} = h_i - h_{i+1} \quad (3-35)$$

A teljes nyomásesés (Δh) tehát $\sum(h_i - h_{i+1})$, a szivárgási sebesség pedig

$$v = \frac{\Delta h}{\frac{D_1}{k_1} + \frac{D_2}{k_2} + \frac{D_3}{k_3}} = \frac{\Delta h}{c_1 + c_2 + c_3} \quad (3-36)$$

ahol a c értékek az egyes rétegek hidraulikus ellenállását (szivárgási ellenállását) jelölik. A szivárgási ellenállás mértékegysége idő (általában nap). Az ellenállás reciproka értéke $1/c = k/D$, amit a vízszintes szivárgás transzmisszivitásának (kD) analógiájára a függőleges szivárgás transzmisszivitásának is szoktak nevezni.

A talajvízmozgás alapegyenletét a (3-20) egyenletből (a folytonossági egyenletből) kiindulva lehet meghatározni. Tételezzük fel, hogy a szivárgás homogén és izotrop talajban megy végbe, érvényes a Darcy-törvény, $k_x = k_y = k_z = k$. A szivárgási sebesség az x irányban felírható:

$$v_x = -k \frac{\delta h}{\delta x} \quad (3-37)$$

összefüggéssel. Az y és a z irányban hasonló módon lehet felírni a sebességkomponenseket. Mivel a k értéke konstans, a folytonossági egyenlet h -nak, a vízoszlopban kifejezett energia irányonkénti megváltozása összegének zérus voltát fejezi ki, tehát

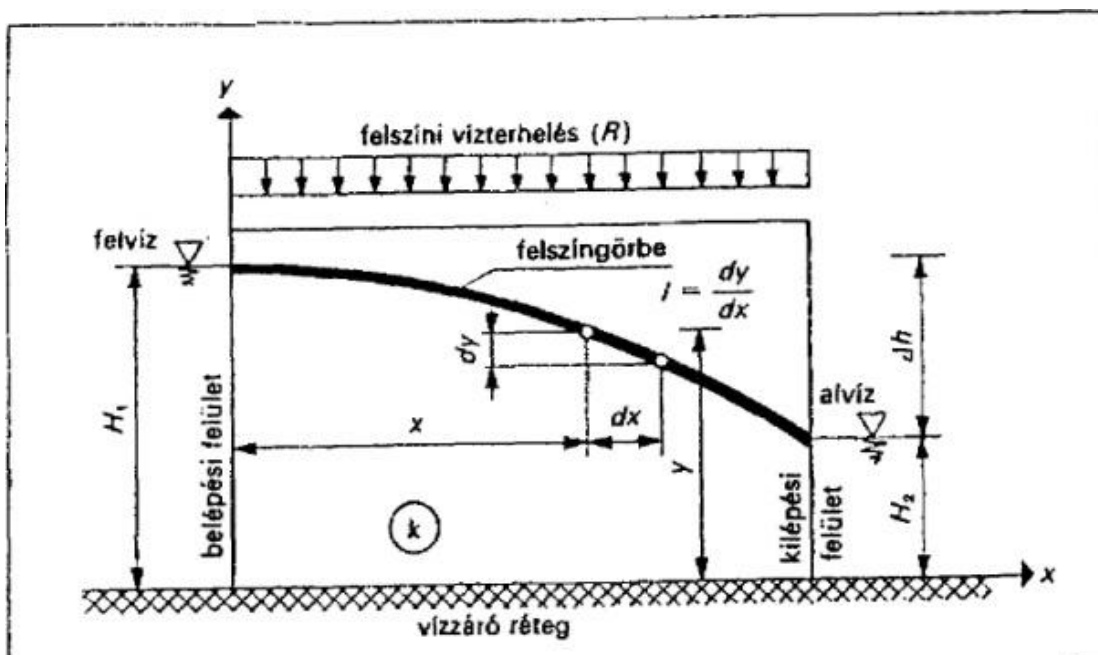
$$\frac{\delta^2 h}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta z^2} = 0 \text{ illetve } \frac{\delta^2 h}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta y^2} = 0 \quad (3-38)$$

alakú az összefüggés a három-, ill. a kétdimenziós szivárgás esetére. *Ez a szivárgás Laplace-féle alapegyenlete.*

A Laplace-egyenlet megoldása teszi lehetővé a talajcsövezéssel való talajvízszint-szabályozás matematikai jellemzését. Az egyenlet megoldásánál ebben az esetben három kiindulási feltételt kell figyelembe venni (Kovács, 1972):

- érvényes a Darcy-törvény, tehát a szivárgási tér homogén, és benne az ellenállás a sebességgel egyenesen (lineárisan) arányos;
- a vízmozgás szabad felszínű sík áramlás;
- a mozgás leírására lehatárolt szivárgási térben mind a belépési, mind a kilépési síkban a határfeltételek időben változatlanok, tehát a mozgás permanens.

A három kiindulási feltételt az áramlás jellemzőinek meghatározása végett további feltételekkel kell kiegészíteni (3.14. ábra):



3.14. ábra. A Dupuit-egyenlet jelöléseinek értelmezése

- a szivárgási térbe belépő és onnan kilépő vízhozam azonos, továbbá az áramlási út mentén, minden, a szivárgási irányra merőleges szelvényen ez a vízhozam áramlik keresztül (ezt a feltételt a későbbiekben levezetett összefüggés módosításával fel lehet oldani);
- a szivárgási tér felett kialakuló kapilláris zóna vízszállítása a teljes vízhozamhoz viszonyítva elhanyagolható;
- a mozgást létrehozó potenciálkülönbség minden áramvonal mentén állandó és arányos a felvíz és az alvíz különbségével, ennek megfelelően az alvízi oldalon nincs vízszakadás, a felszingörbe csatlakozik az alvízszinthez;
- mind a szivárgási teret tápláló, mind az azt megcsapoló víztér a vízvezető réteget teljes mélységben érinti, a csatlakozási felület függőleges;

- az áramlás egy-egy elemi hosszúságú szakaszán a mozgást párhuzamos áramvonalú szivárgásnak tekinthetjük, az erre merőleges potenciálvonalak tehát függőlegesek (Dupuit-féle feltétel):

- a sebesség a szivárgási tér minden függőlegesében állandó, értéke a felszíni esés és a szivárgási tényező szorzataként számítható. Id. a felsorolt feltételekből kiindulva a kontinuitási egyenlet, $q = yv =$ állandó alakú lesz, a sebesség pedig $v = k \frac{dy}{dx}$. Ebből a két egyenletből a mozgást leíró differenciálegyenlet:

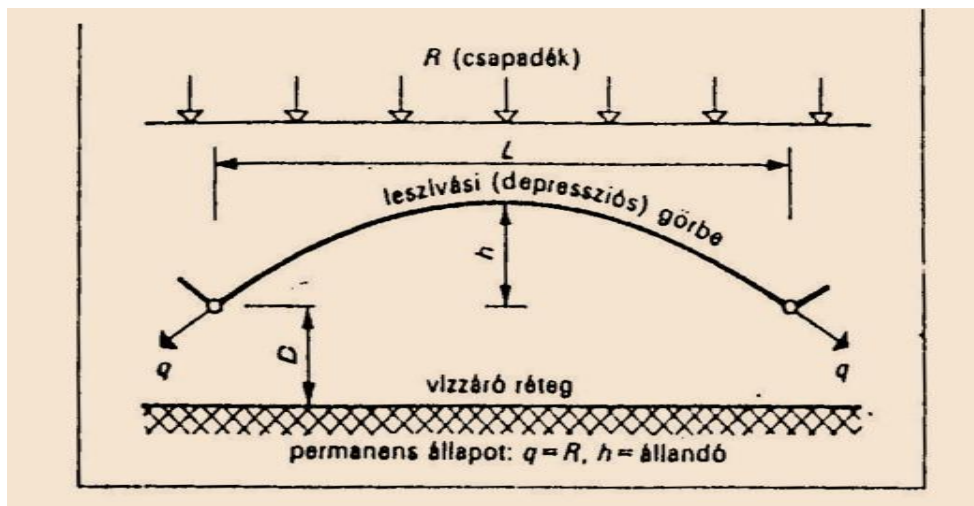
$$q = -ky \frac{dy}{dx} \quad (3-39)$$

A változókat szétválasztva, integrálva és a helyettesítéseket elvégezve a

$$a = \frac{k}{2X} (H_1^2 - H_2^2) \quad (3-40)$$

összefüggést kapjuk, ami a szabad felszínű síkáramlásra vonatkozó *Dupuit-egyenlet*. (A betűjelek értelmezését l. a 3.14. ábrán.) A (3-40) összefüggés, abban az esetben, ha a felületen a teljes szivárgási hosszon valamilyen egyenletes táplálás - R - (pl. csapadék, felszíni víz) van, a következő alakú:

$$q_0 = \frac{k}{2X} (H_1^2 - H_2^2) - \frac{RX}{2} \quad (3-41)$$



3.15. ábra. A talajszövezési paraméterek értelmezése permanens vízmozgás esetén

A talajszövezésnél általános eset, hogy a drénrendszerrel elvezetendő víz felszíni terhelésként, a csapadékból származva jelentkezik. Abban az esetben, ha a felszíni terhelés (R) egyenlő a talajszőhálózaton át elvezetett vízhozammal (q), a leszívási (depressziós) görbe időben állandó. A leszívási görbe időbeli állandósága azt jelenti, hogy az áramlás jellemzői is állandóak, tehát a vízmozgás permanens (3.15. ábra).

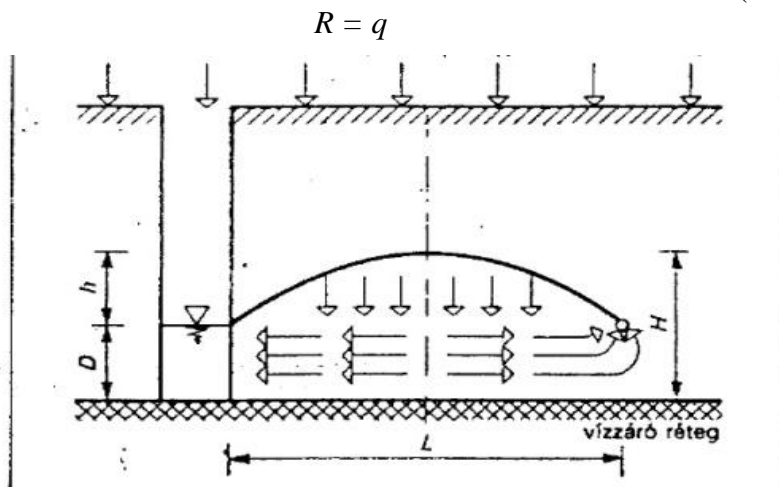
Abban az esetben; ha a vízmozgást jellemző paraméterek egy adott helyen időben változó, nem permanens mozgásról beszélünk. Nem permanens szivárgás esetén egy differenciális méretű elembe való beáramlás és kiáramlás algebrai összege nem lesz egyenlő zérussal, mert az elem tározásra képes. A be- és kiáramlás egyenlegét tehát a tározásváltozás adja meg. A kontinuitási egyenlet ebben az esetben

$$\frac{\delta^2 h}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta y^2} = \frac{\mu}{kD} \frac{\delta h}{\delta t} \quad (3-42)$$

alakú lesz, ahol az egyenlet jobb oldala a tározás időbeli változását írja le. A (3-42) összefüggésben alkalmazott jelölések megegyeznek a kontinuitási egyenletben alkalmazott korábbi jelölésekkel, a μ a talaj vízteleníthető hézagtere, kD a transzmisszivitás, t pedig az idő.

A szivók távolságának számításához alkalmazott szabatos hidraulikai összefüggések a vázolt elméleti alapokból indulnak ki. A talajvízszint-szabályozás legáltalánosabb összefüggései a Dupuit-egyenleten és feltételrendszeren alapulnak. Abban az esetben, ha egy állandó vízterhelést időben állandó hidraulikai feltételek mellett kell a drénrendszernek elvezetnie (tehát a vízmozgás permanens), a Dupuit-egyenletnek megfelelő formában a következő összefüggést lehet felírni (Donnan, 1946):

$$R = q \frac{4k(H^2 - D^2)}{L^2} \quad (3-43)$$



3.16. ábra. A talajcsövezés általános alapegyenletében szereplő változók értelmezése

- ahol: R – a felszíni vízterhelés,
 q – az elvezetendő vízhozam,
 k – a vízáteresztő képesség,
 L – a szivók közötti távolság,
 H – a két drén közötti féltávolságon a vízzáró réteg felett kialakuló vízállás,
 D – a drénben a vízzáró réteg felett kialakuló vízállás (3 16 ábra).

Ebben az esetben a vízelvezető elem nyílt árok. Az egyenletet fel lehet írni más formában is, ugyanis

$H^2 - D^2 = (H+D)(H-D)$. Mivel $H - D = h$, így az összefüggés

$$L^2 = \frac{8kDh}{q} + \frac{4kh^2}{q} \quad (3-44)$$

alakra hozható, ami a talajvízszint-szabályozást szolgáló talajcsövezés egyik alapegyenlete. A talajcsövezés általános eseteit megvizsgálva láthatjuk, hogy *két lényeges szivárgási irányt különböztethetünk meg* a szivárgási térben. A felszíni vízterhelésnek (csapadéknak) először be kell szivárognia a talajtérbe (függőleges szivárgási tartomány), majd a víz elérve a talajvizet, döntően vízszintes irányban mozog tovább (vízszintes szivárgási tartomány). A tényleges talajcsövezési probléma tehát különbözik az eredeti Dupuit-feltételeknek megfelelő esettől, mivel felszíni terhelés van a szivárgási út mentén. Ez az oka, hogy a módosított Dupuit-feltételekből kell kiindulni, így lehet eljutni a (3-44) összefüggéshez. A korszerű talajcsövezési gyakorlat azonban nem nyílt árkokkal, hanem zárt szivókkal dolgozik, tehát a feltételekben további módosítást kell végrehajtani. Ennek az a lényege, hogy a szivárgási térbe helyezett dréncső pontszerű nyelőként működik, tehát környezetében sugárirányú (radiális) áramlás alakul ki (3.16. ábra). A sugárirányú áramlással szemben a talaj nagyobb ellenállást fejt ki, mint a párhuzamos vízszintes vízmozgással szemben. Ez azt jelenti, hogy a nyílt árkokról a dréncsővekre való áttérés, ha egyébként a feltételek változatlanok, a szivótávolság csökkenésével jár együtt.

A függőleges szivárgási tartományt a számítások közben általában nem vizsgálják. A vízszintes és a sugárirányú szivárgás tartománya azonban valamennyi ilyen típusú dréntávolság-összefüggésben felismerhető. Ez az elv azonban azokban az összefüggésekben érvényesül a legjobban, amelyek a mozgást az ellenállások segítségével jellemzik. Általában felírható, hogy permanens esetben a kialakult vízszintkülönbség és az átlagos szivárgási úthossz meghatározta nyomásvesztés a különböző szivárgási tartományok ellenállásainak összegével egyenlő. Áttérve a nyomómagasságokra, az összes vízoszlopban kifejezett nyomás (h) a függőleges (h_f), a vízszintes (h_v) és a sugárirányú (h_r) nyomásvesztésekben emésztődik fel. A nyomásesések, illetve az ellenállások összege (Ernst szerint)

$$h = h_f + h_v + h_r = qe_f + qLe_v + qLe_r \quad (3-45)$$

alakban írható, ahol e_f , e_v , és e_r a függőleges, a vízszintes és a sugárirányú ellenállásokat jelöli. A függőleges és a vízszintes ellenállásokat az áteresztőképesség és a rétegvastagság ismeretében lehet meghatározni. Az ellenállások általános összefüggései:

$$e_f = \frac{D_f}{k_v} \quad e_v = \frac{L}{uk_i D_i} \quad e_r = \frac{1}{\pi k} \ln \frac{aD}{u} \quad (3-46)$$

ahol: D - (és indexes változatai) rétegvastagságot,
 k - (és indexes változatai) vízáteresztő képességet,
 L - szivótávolságot,

a - geometriai paraméter,
 u - a vízvezető elem nedvesített területét jelöli.

A függőleges ellen állást elhanyagolva az ezen az elven szerkesztett összefüggések általában

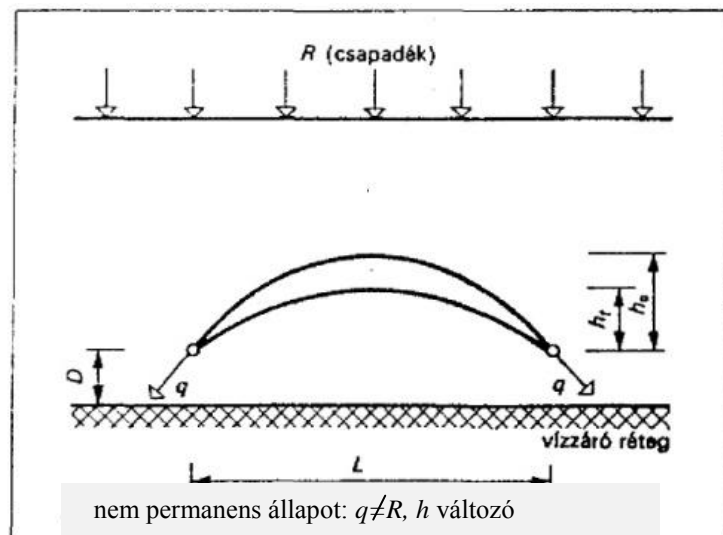
$$L = L_0 - C_0 \text{ alakúak,} \quad (3-47)$$

ahol: L - a szívótávolság,

L_0 - a vízszintes szivárgási tartományból számítható szívótávolság,

C_0 - a sugárirányú ellenállás miatti redukció.

A nem permanens szívótávolság számítási összefüggéseinek levezetésénél a (3-42) összefüggés egydimenziós változatából indulnak ki. Az időben való változást a felszíni vízterhelés változása okozza. A vízterhelés változása miatt a leszívási görbe sem állandó az időben (3.17. ábra). Akkor viszont, ha a leszívási görbe változik, más és más nyomómagasság alakul ki, tehát az elfolyó vízhozam is változik (azonos geometriai feltételek mellett), illetve a szívótávolság meghatározásakor az időben változó nyomómagassággal kell számolni. A nem permanens összefüggéseknél a talajtér tározókéességét (j) is figyelembe lehet venni.



3.17. ábra. A talajcsövezési paraméterek értelmezése nem permanens állapot esetén

A Dupuit-egyenlet egydimenziós változata nem permanens esetre a következő alakban írható fel;

$$kD \frac{\delta^2 h}{\delta x^2} = \mu \frac{\delta h}{\delta t} - R \quad (3-48)$$

illetve abban az esetben, ha $R = 0$

$$kD \frac{\delta^2 h}{\delta x^2} = \mu \frac{\delta h}{\delta t} \quad (3-49)$$

ahol; kD - a transzmisszivitás,

B - a felszíni vízterhelés,

h - a nyomómagasság,

x - a vízszintes változó koordináta,

t – az idő,
p – a vízteleníthető hézagter.

A talajcsövezésnél az egyes összefüggések levezetésében és érvényességük meghatározásában nagy szerepük van a *kerületi feltételeknek* és a levezetés közben tett *elhanyagolásoknak*. Ebben az értelemben szükséges annak vizsgálata, hogy az *időben állandó állapot* feltételezése megengedhető-e. A következő lényeges kérdés a *vízzáró réteg* helyének, mélységének tisztázása. A vízzáró réteg és az alagsó elhelyezkedése, egymáshoz való viszonya is befolyásolja az összefüggéseket. Abban az esetben, ha a vízzáró réteg határa viszonylag mélyen helyezkedik el, a teljes vízáteresztő réteg nem vesz részt érdemben a vízszállításban. Ebben az esetben meg kell határozni a tényleges (hatékony) szivárgási tartomány mélységét, az ún. *egyenértékű mélységet*. Az egyenértékű mélység függ a szivótávolságtól is, tehát értékét csak fokozatos közelítéssel lehet kiszámítani. Különös gonddal kell eljárni, ha *rétegezett* a talaj. Ebben az esetben ugyanis a rétegek egymáshoz viszonyított vízáteresztő képességének és vastagságának is nagy jelentősége lehet. Számos összefüggés tartalmaz geometriai paramétereket. Ezeket nem szabad elhanyagolni, hanem az összefüggés levezetésénél megadott módon kell számítani. Gyakori, hogy az összefüggésekben szerepe van a *talajcső átmérőjének* (amit pl. éppen a sugárirányú ellenállások csökkentése céljából szűrőzéssel is hatékonyabbá szoktak tenni), de ez az összefüggésből nem derül ki. Fontos lehet annak vizsgálata, hogy *szimmetrikus áramlásról* van-e szó (amit sík vidéki viszonyok között általában fel lehet tételezni). Eséssel rendelkező területek talajcsövezésekor a szivárgási kép nem szimmetrikus, meg kell tehát vizsgálni, hogy a megnövekedett esés, illetve a megnövekedett szivárgási úthossz milyen arányban van egymással, nincs-e szükség az alagsótávolság redukálására vagy növelésére. A vízmozgás jellemzésére (pl. egy adott szivárgási térben vagy talajvíz-mozgás esetén) gyakran van szükség a vízrészecskék útjának, az *áramvonalaknak* az ismeretére. A gyakorlatban azonban az áramvonalak meghatározása nehézkes, ezért meghatározásuk közvetett módon történik. Írjuk fel a Darcy-egyenletet kétdimenziós áramlás esetére:

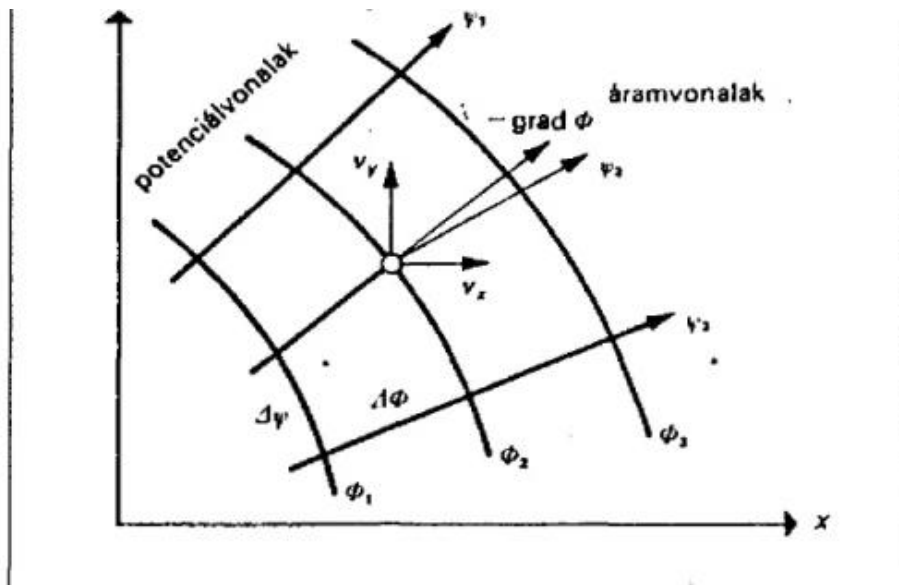
$$v_x = -k \frac{\delta h}{\delta x} \quad \text{és} \quad v_y = -k \frac{\delta h}{\delta y} \quad (3-50)$$

A nyomómagasság (h) ebben az esetben skalár mennyiség, k pedig állandó.

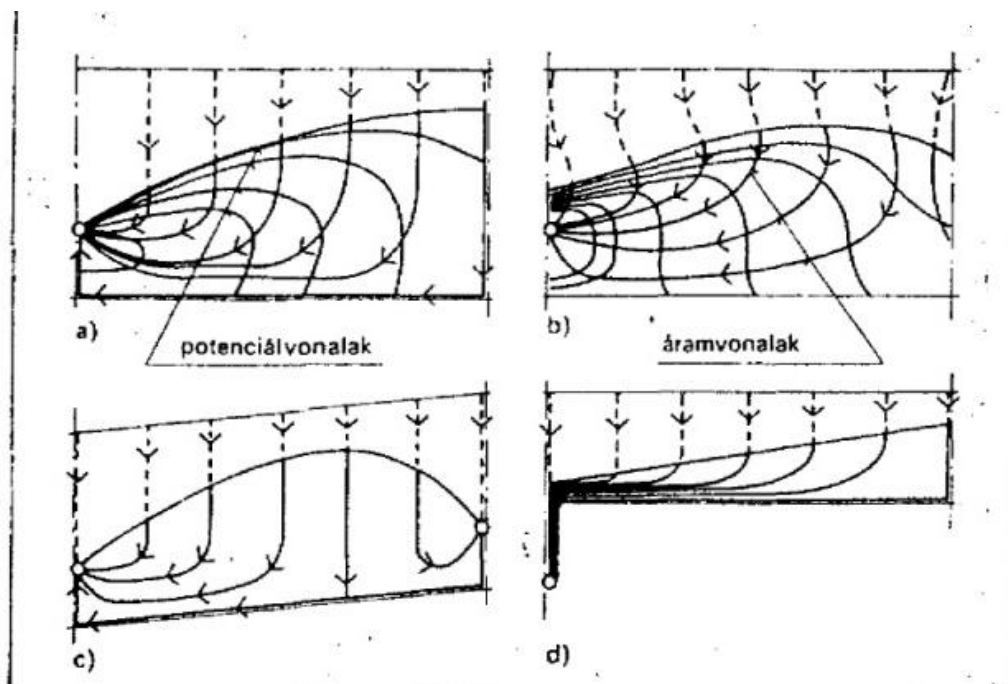
A teljes sebesség (amely vektormennyiség, hiszen iránya is van) felírható a következő formában (3.18. ábra)

$$v = -grad\Phi \quad \text{ahol} \quad \Phi = kh = k(z+p/\rho g). \quad (3-51)$$

A Φ értéke az ún. *sebességpotenciál*. Megvizsgálva a sebességpotenciálokat, az $x - y$ síkban találhatunk olyan pontokat, amelyekben a sebességpotenciálok egyenlőek. Ezeket a pontokat összekötve *ekvipotenciális vonalakat* (*potenciálvonalakat*) kapunk. A leszívási görbe maga is potenciálvonal.



3.18. ábra. Az áramvonalak és a potenciálvonalak értelmezése



3.19. ábra. A talajcsövezésnél kialakuló különböző áramképek

- a) elméleti áramkép a potenciális síkáramlás alapján.
- b) a valóságos áramkép az inhomogenitás és az anizotrópia hatása miatt,
- c) lejtős területen kialakuló aszimmetrikus áramkép,
- d) sík vidéki kombinált talajcsövezés áramképe

A (3-50) egyenletbeli sebességkomponenseket fel lehet írni a következő formában is

$$v_x = -\frac{\delta\phi}{\delta y} \quad \text{és} \quad v_y = +\frac{\delta\phi}{\delta x} \quad (3-52)$$

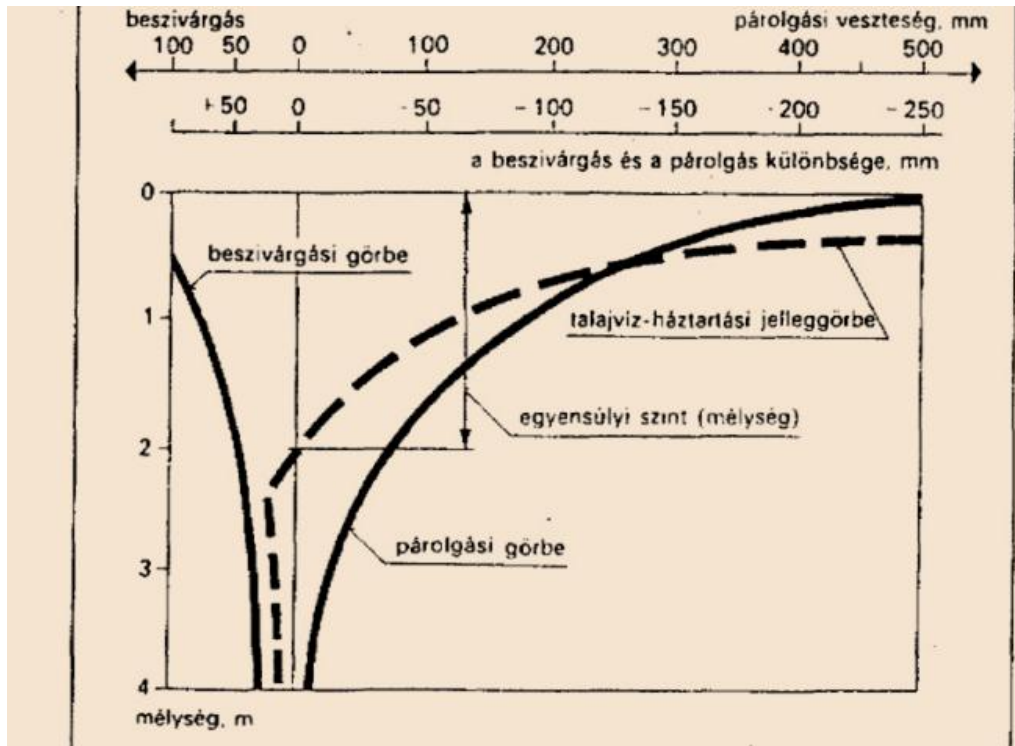
Behelyettesítve a (3-5) összefüggésekben megadott értékeket a kontinuitási egyenletbe, azt kapjuk, hogy $\varphi(x,y) = \text{állandó}$. Ez a függvény az ún. *áramfüggvény*, az állandó φ -nek megfelelő vonal az *áramvonal*. Mivel a kétdimenziós áramlásban a potenciálfüggvény x szerinti deriváltja egyenlő az áramfüggvény y szerinti deriváltjával, a potenciálvonalak és az áramvonalak merőlegesek egymásra. Abban az esetben, ha a potenciálvonalakat és az áramvonalakat egyenlő intervallumokkal szerkesztjük meg, olyan szabályos vagy torzított négyzeteket kapunk, amelyek megkönnyítik a szerkesztést. A potenciálfüggvény és az áramfüggvény gyakorlati alkalmazásának előnye, hogy a lényegesen könnyebben mérhető potenciálértékeket elegendő meghatározni. Ezeknek a segítségével a potenciálvonalak, majd az áramvonalak megszerkeszthetők. A módszer az analóg modellezésnél, illetve a talajvízmozgás jellemzésénél egyaránt felhasználható. A 3.19. ábrán a talajcsövezés néhány jellemző áramképét mutatjuk be.

3.3. A talajcsövezés hidrológiai alapjai

A talajcsövezést igénylő két legátfogóbb szabályozási terület a *talajvízszint-szabályozás* és a *talajnedvesség-szabályozás*. Mindkettőt elsősorban hidrológiai okok teszik szükségessé. A hidrológiai alapok, a hidrológiai vizsgálati módszerek áttekintése azonban nemcsak a kiváltó okok miatt fontos, hanem azért is, mert a talajcsövezés mint vízrendezési beavatkozás változást hoz létre a hidrológiai folyamatban is, és ennek a hatásnak (az ún. drénhatásnak) a vizsgálata és figyelembevétele fontos szempont.

A talajcsövezendő talajrétegben kialakuló vízbőség megjelenési formája szerint a hidrológia két fontos szakterületéhez tartozik: a *talajvíz-hidrológiához* és az ún. *telítetlen zóna hidrológiai* vizsgálatához. A talajvíz hidrológiai vizsgálatának évtizedekre visszatekintő módszere, gyakorlata van. Hidrológiai értelemben a *talajvíz* a talaj felszín-közeli rétegeiben, a legfelső vízzáró réteg fölött kialakuló, a réteg(ek) hézagterét teljesen kitöltő összefüggő gravitációs víz. Kialakulásához tehát szükség van a vízzáró rétegre, ami a gravitációs víz mélyebbre való beszivárgását akadályozza meg. A talajvíznek egy adott szelvényben való alakulását (akkor, ha a vízszintes irányú vízmozgástól eltekintünk) a csapadék, a beszivárgási, a párolgási és a talaj kapilláris vízemelési körülményei befolyásolják. A talajvíz talajszelvényen belüli alakulását a *talajvízszinttel* (talajvíztükörrel) lehet jellemezni. A talajvízszint lényegében egy feltételezett szint, amit a szelvényben elhelyezett észlelőkúttal lehet meghatározni. A talajvízszint kialakulásának elvi alapját a talajvíz-háztartási jelleggörbe segítségével lehet áttekinteni (Kovács, 1972).

A *talajvíz-háztartási jelleggörbe* (3.20. ábra) a beszivárgás és a párolgás egyenlegéből indul ki. Egy talaj beszivárgási és párolgási görbéjének a mélység függvényében való előállítás után a két görbét összegezve határozhatjuk meg azt a szintet, ahol a talajvíztükör kialakul. A talajvíz-háztartási jelleggörbéből megállapítható az egyensúlyi szint (a jelleggörbe zéruspontja). Az egyensúlyi szint fölötti tartományban a párolgási veszteség meghaladja a



3.20. ábra. A talajvíz-háztartási jelleggörbe

beszivárgást, így a talajvízfelszín csak akkor állandósul ebben a tartományban, ha folyamatos áramlás táplálja a talajvízteret. Az egyensúlyi szint alatti tartományban beszivárgási többlet jelentkezik, tehát itt a talajvízszint állandósításához folyamatos megcsapolás (természetes vagy mesterséges, pl. talajcsövezés) szükséges.

A talajvíz vízszintes mozgása potenciálkülönbség hatására jön létre. A víz értelemszerűen mindig a magasabb talaj vízszintű területről az alacsonyabb vízszintű felé áramlik. Létrehozhat talajvízáramlást természetes vagy mesterséges vízfolyások, tavak, tározók viszonylag magas vízszintje is. A vízszintes talaj vízmozgás meghatározására szolgáló egyszerű módszer a betáplálás és a befogadó (esetleg drénezendő) terület közötti áramkép meghatározása. A potenciálértékeket talajvízkutak segítségével lehet meghatározni. Ezek után egy egyenlő intervallumú ($\Delta\Phi = \Delta\varphi$) áramképet kell szerkeszteni. Egy adott szelvényen beáramló vízhozam (Q):

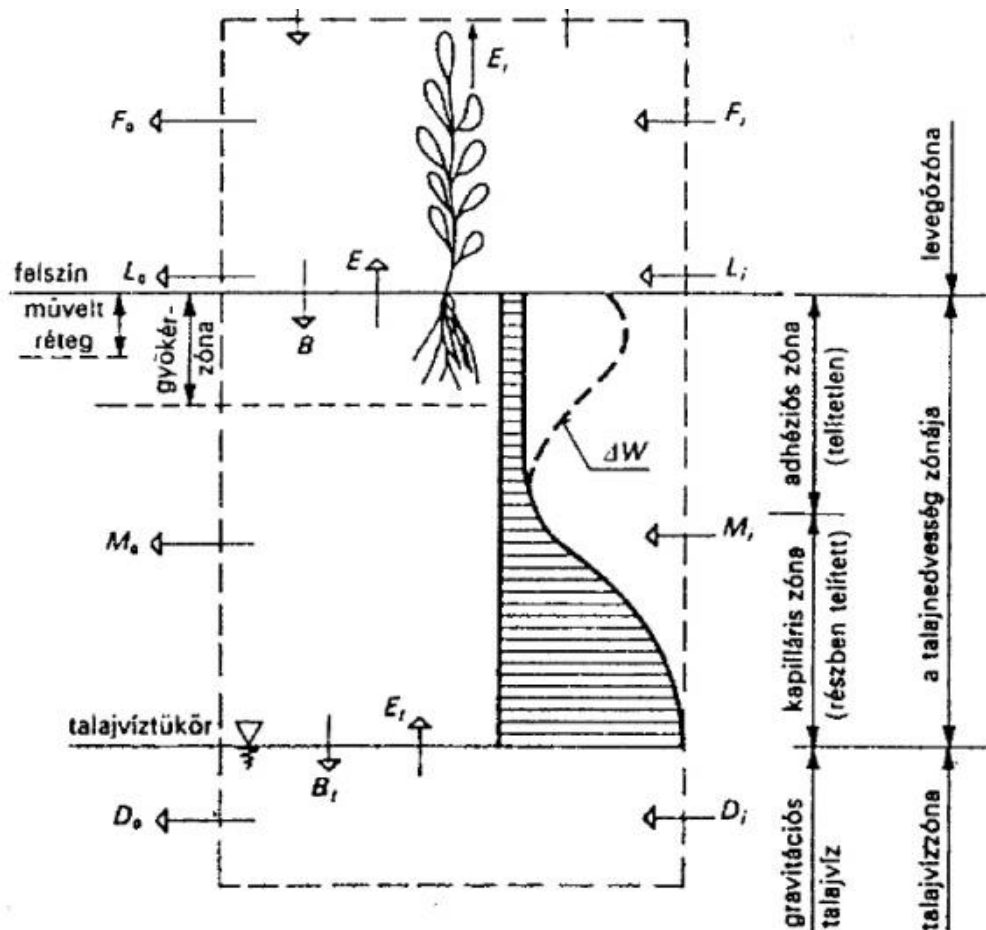
$$Q = n\Delta h k D \quad (3-53)$$

ahol n - a beáramlási felületen az intervallumok száma ($\Delta\Phi$),

Δh - a vízszintkülönbség,

kD - a transzmisszivitás.

A talajvíz szintjét tehát függőleges (beszivárgás, párolgás) és vízszintes (talajvízmozgás, -áramlás) vízforgalmi tényezők egyaránt befolyásolják, a mindenkori víztükör tehát összetett hatások eredményeképpen alakul ki. Természetes állapotban, amikor a függőleges vízforgalom dominál (vagy legalábbis hatása nem hanyagolható el), a talajvízszint alakulását elsősorban a hidrometeorológiai tényezők befolyásolják. Ezek a hatások alakítják a talajvízjárást, a talajvízszint változásának éves és több éves menetét. Az általános víz- és nedvesség-felhalmozódási és -fogyasztási jellegnek megfelelően a talajvíz a legmélyebben nyár végén, ősz elején helyezkedik el, majd az őszi, téli csapadékok hatására tavasszal éri el maximális értékét. Ezt az éves menetet kiegészíti egy több éves periódus, ami az időjárásban tapasztalható szárazabb és nedvesebb szakaszoknak megfelelően tartósan magasabb vagy mélyebb talajvízállást (pl. évi átlagot) okozhat. Magyarországon természetes körülmények között általában nem alakulhat ki időben hosszan tartó (több évtizedes), egyirányú változás a talajvízállásban. Az ilyen tartós, trend jellegű változást mesterséges körülmények okozzák. A talajnedvesség zónájának (a háromfázisú zónának) a vízháztartását az atmoszferikus hatások jobban befolyásolják, mint a talajvízzel telített rétegét. Hatással van rá a tényleges és a potenciális evapotranszpiráció aránya, a felszíni lefolyás, a beszivárgás mennyisége, a nedvességtartalomtól függő aránya. A talajnedvesség zónájának vízháztartását vázlatosan a 3.21. ábra segítségével mutatjuk be (Kovács, 1978). Az ábrán az ehhez a zónához alulról, illetve felülről csatlakozó talajvízzónát és levegőzónát is feltüntettük. Az így körülhatárolt rendszerbe a levegőben páramozgás formájában (E_i , F_0) a felszínen felszíni lefolyásként (L_i , L_0), a talajnedvesség-zónában



3.21. ábra. A háromfázisú zóna vízháztartásának elvi vázlata

nedvesség-mozgás formájában M_i , M_o) és a talajvíztükör alatt talajvízáramlás (D_i , D_o) formájában történik be- és kilépés. A teljes rendszerből függőleges irányban az evapotranszpiráció (E_a) útján távozik víz, a belépés pedig ebből az irányból a csapadék (C). A talajnedvesség-alrendszerbe beszivárgás (B) útján juthat be a víz, és ezt a zónát táplálja a talajvízből történő párolgás (E_t) is. A háromfázisú réteg függőleges irányban vizet evapotranszpiráció (E) formájában, valamint a talajvízbe való beszivárgás (B_i) tud leadni. A talajnedvesség zónája a vizet a talaj tulajdonságai alapján kialakuló talajvíz-retenciós görbének megfelelően tárolja akkor, ha a nedvességállapotban egyensúlyi helyzet következett be. A beszivárgás megbontja ezt az egyensúlyi helyzetet, és a felső talajrétegben növeli a talaj nedvességtartalmát. A víz-utánpótlódás megszűnése után a talajnedvesség-zónában ható erők ismét az egyensúlyi állapot helyreállítására törekszenek. A talajvíz retenciós görbéje homogén talaj esetén a talaj pF-görbéje segítségével állítható elő.

A talajvíz- és a talajnedvesség-zóna vízháztartását egyaránt fel lehet írni. A gyakorlatban alkalmazott vízháztartási egyenletekben általában rögzítik azt az alrendszert (zónát), amelyikre az egyenletet felírják, és ugyancsak rögzítésre kerül az alrendszer síkbeli kiterjedése és a vizsgálat időlépcsője. A talajcsövezési vizsgálatoknál általában a talajnedvesség zónájára felírt vízháztartási egyenletből indulunk ki, a terület kiterjedése a vizsgált mezőgazdasági tábla (vagy vízháztartási szempontból homogénnek tekinthető táblarész), a vizsgálati időlépcső minimuma 1 nap (ennél részletesebb adatok általában nem

állnak rendelkezésre), de alkalmaznak ennél hosszabb időlépcsőket is (pl. a víztelenítés időtartama, a növények víztűrési ideje stb.).

A háromfázisú zóna vízháztartási egyenletét a 3.21. ábra alapján a következőképpen lehet felírni:

$$B + E_t + M_i = E + E_i M_0 + B_t + \Delta W \text{ [mm]} \quad (3-54)$$

ahol: B - a beszivárgás,
 E_t - a párolgás a talajvízből,
 M_i - a talajnedvesség belépése,
E - az evaporáció,
 E_i - a transzspiráció,
 M_0 - a talajnedvesség kilépése vízszintes irányban,
 B_t - a talajvizet elérő beszivárgás,
 ΔW - a talaj nedvességekészletének megváltozása.

A (3-54) összefüggést gyakorlati alkalmazás céljára kisebb elhanyagolásokkal át lehet alakítani. A talajnedvesség vízszintes irányú mozgása ugyanis akkor, ha a vízmérleg területegysége a tábla, elhanyagolható. Az evaporáció és a transzspiráció értékét összevonva az evapotranszspirációt lehet figyelembe venni. A talajvízből való vízbelépést el lehet hanyagolni, és kötött talajok esetén ugyancsak elhanyagolható a talajvizet elérő beszivárgás. A beszivárgás csapadékból vagy mesterséges úton a területre juttatott vízből (öntözővízből) származik. Ezt a felszínre jutó vizet kell további részekre bontani a felszíni lefolyás és a beszivárgás arányában. Sík vidéki területeken kísérleti tapasztalatok szerint a felszíni lefolyás talajcsövezett körülmények között elhanyagolható, és nem kell számolni a más területekről a felszínen érkező vízzel sem. Dombvidéki körülmények között a felszíni lefolyást természetesen nem lehet elhanyagolni. Az alagsövezett területet úgy kell kialakítani, hogy a területre ne legyen felszíni ráfolyás és a csapadékból származó víz felszínen lefolyó része a tábla más részén se jusson be a drénrendszerbe, hanem a felszínen hagyja el a táblát. Az utóbbi időszak vízháztartási vizsgálataiban a korábbiaknál nagyobb szerepet kapott az intercepció vizsgálata. Ez elsősorban azért fontos, mert a felszínt ténylegesen elérő csapadék mennyisége az intercepció (a növényzet felületén ideiglenesen visszatartott csapadék) miatt kisebb, mint a szabványos körülmények között mért csapadékmennyiség, másrészt ha az evapotranszspirációt számítással a potenciális evapotranszspirációból határozzuk meg, értékét redukálni kell, mivel ennek egy részét az intercepció víz elégíti ki.

Külön kell szólni a vízháztartási egyenletekben szereplő nedvességtartalom-értékről, illetve ennek változásáról. Ez a nedvességváltozás egy adott talajrétegre vonatkozik, és két korlátja van: minimális értéke az adott talaj-szelvényben kialakuló egyensúlyi nedvességállapothoz tartozó össznedvességtartalom-érték, fizikailag lehetséges maximális értéke pedig az egész talaj-szelvény teljes telítődéséhez tartozó nedvességtartalom. Természetesen a talaj teljes telítődése vagy egyáltalán nem engedhető meg, vagy csak korlátozott mértékben (korlátozott mélységig és időtartamig), így a vízháztartási egyenletben figyelembe vehető

nedvességtartalom felső határa a szelvény vízoszlopban kifejezhető vízkapacitása és telítettsége között helyezkedik el.

A vízháztartási egyenletben a mesterséges elvezetést is figyelembe kell venni. Ez lényegében az alagcsőrendszer tervezése szempontjából figyelembe veendő elvezetendő víztömeg. Az elvezetendő víztömegnek vízháztartási egyenlettel való meghatározása részletesen megtalálható a szakirodalomban (Fehér, 1980).

A talajcsővezetett területek egyszerűsített vízháztartási egyenletét sík vidéki és dombvidéki területekre, egy mezőgazdasági táblára (vagy táblarészre) hosszabb időegységre (dekád, tűrési idő, megkívánt levezetési idő stb.) a következőképpen lehet felírni:

$$V_D = (C + \ddot{O}) - (L_0 + E_t) \pm \Delta W \quad [\text{mm}] \quad (3-55/a)$$

$$V_D = (C + \ddot{O}) - E_t \pm \Delta W \quad [\text{mm}] \quad (3-55/b)$$

ahol: V_D – a talajcsőrendszeren elvezetendő víz,

C – a csapadékösszeg,

\ddot{O} – az öntözéssel kiadott vízmennyiség,

L_0 – a felszíni lefolyás

E_t – az evapotranszpiráció,

ΔW – a talaj nedvességkészletének megváltozása.

A (3-55/a) összefüggés a dombvidéki, a (3-55/b) összefüggés a sík vidéki viszonyokra vonatkozik.

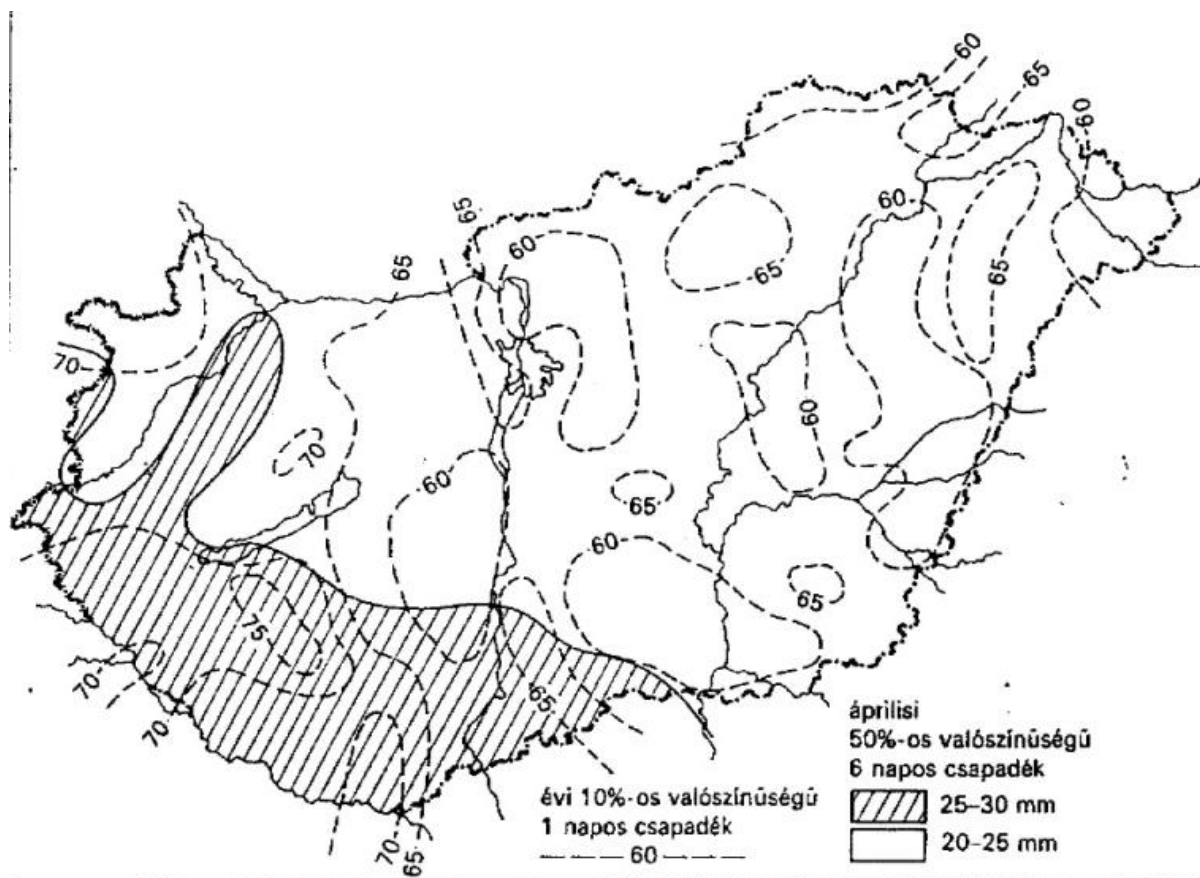
A talajvízszint-szabályozás hidrológiai alapját a talajvíz-háztartási jelleggörbe adja meg (3.20. ábra). A talajcsővezetés szempontjából két alapvető eset lehetséges: az egyensúlyi szint fölött kialakuló víztükör esete és az egyensúlyi szint alatti talajvízszint bekövetkezése. Az egyensúlyi szint feletti tartományban csak akkor állandósul a talajvízszint, ha folyamatos áramlás táplálja a talajvizet. Ez a tény tehát valamilyen természetes vagy mesterséges eredetű talajvízáramlásra utal. A vízutánpótlódás megszüntetése az egyensúlyi állapot visszaállításához vezet. Abban az esetben azonban, ha a táplálást nem lehet megszüntetni, vagy valamilyen ok miatt a talajvízszintet az egyensúlyi állapot alatt kell tartani, folyamatos megcsapolásra (talajcsővezésre) van szükség. Az elvezetendő víztömeg a víztáplálásból, illetve a beszivárgási többletből ered.

A vízháztartási vizsgálatokhoz szükség van egyes részfolyamatok (ún. fizikai-hidrológiai folyamatok) jellemzésére, leírására is. A talajcsővezetés szempontjából a csapadék, a beszivárgás, az evapotranszpiráció és a felszíni lefolyás vizsgálatára van szükség. A csapadék vizsgálatával, jellemzésével a szakirodalom részletesen foglalkozik (Goda, 1956; Babos, 1975). Talajcsővezetés szempontjából elsősorban a csapadék mennyisége a döntő, intenzitása a mértékadó helyzet kialakulását lényegében nem befolyásolja. Ennek az az oka, hogy dombvidéki területen nagy intenzitású csapadék esetén megnő a felszíni lefolyási hányad, így a drénrendszer terhelése nem kritikus, sík vidéki területen viszont, ahol lényegében nincs felszíni lefolyás, általában nem a nagy intenzitású csapadékból származó víz a mértékadó.

A csapadék mennyiségét a vízháztartási vizsgálatokhoz a napi csapadékatatok összesítésével lehet meghatározni. A mértékadó helyzetekben való számításokhoz általában valamilyen statisztikai módszerrel kiszámított csapadékjellemzőt használunk. Egyes módszerekben a

10%-os valószínűségű, egynapos maximális csapadék értékét tekintik mértékadó csapadéknak, de előfordulhat ennél kisebb valószínűségű (pl. a 2%-os valószínűségű) értékre történő méretezés is. Más vizsgálatok a hosszabb időtartamú csapadék-értékeket tartják mértékadónak, így a 10%-os valószínűségű, évi hatnapos maximális érték, vagy az áprilisi 50%-os valószínűségű, hatnapos csapadék is felhasználható a számításokhoz. Ezeket az értékeket a hivatkozott szakirodalmakban megtalálhatjuk, illetve egyszerű módszerek és segédletek állnak rendelkezésre kiszámításukhoz.

Az 50%-os valószínűségű, hatnapos áprilisi és a 10%-os valószínűségű, egynapos maximális csapadék területi eloszlását hazánkban a 3.22. ábrán mutatjuk be. Felhívjuk a figyelmet azonban arra, hogy ezeket a csapadék- értékeket csak a talajcsövezéshez, az üzemi (táblaméretű) vizsgálatokhoz lehet felhasználni, tehát értéküket térségre, öblözetre vonatkozóan nem szabad általánosítani.



3.22. ábra. Az áprilisi 50%-os valószínűségű, hatnapos csapadék és a 10%-os valószínűségű, évi egynapos maximális csapadék eloszlása Magyarországon

A **beszivárgási folyamat** a hidrológiában különböző egyenletekkel jellemezhető. Abban az esetben, ha a beszivárgás csak a felső talajréteg nedvességtartalmát növeli, és hatása csak viszonylag lassan adódik tovább a mélyebb talajrétegek felé, a folyamatot két részfolyamattal lehet jellemezni. Az egyik részfolyamat egy meghatározott talajréteg telítődéséből áll, a másik pedig ezen telített talajrétegen keresztül való függőleges vízmozgásból. A beszivárgást leíró összefüggések felépítése is megfelel a részfolyamatnak, pl. a beszivárgási intenzitást egy talajréteg telítődési intenzitásának, majd telítődés utáni áteresztőképességének az összegévé] lehet jellemezni.

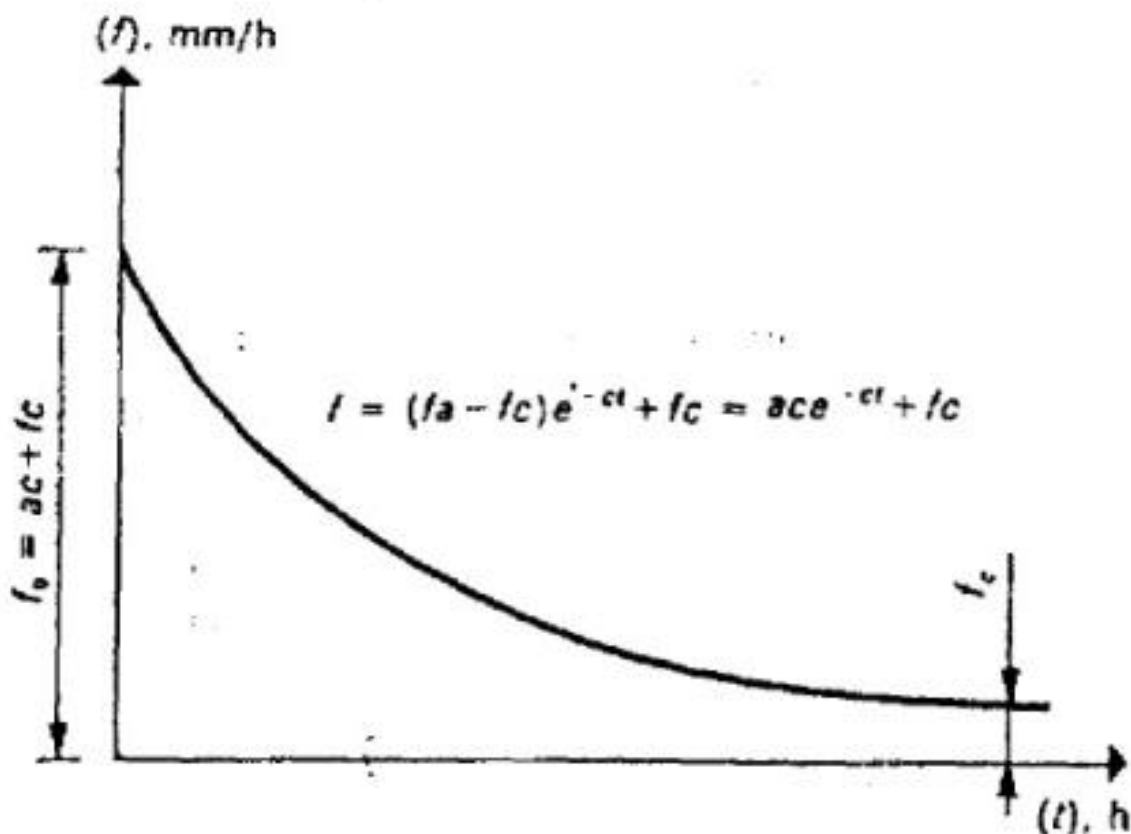
A beszivárgást a *beszivárgási intenzitás* időbeli változásával szokták jellemezni, de lehetséges más jellegű függvénykapcsolat is, pl. a beszivárgási intenzitásnak a talajban még rendelkezésre álló szabad pórusok mennyiségével való kapcsolata. A beszivárgást az idő függvényében leíró összefüggések közül leginkább a *Philip-féle* és a *Horton-féle egyenlet* terjedt el. A tényleges beszivárgási folyamatokat egyik egyenlet sem közelíti meg pontosan. Vizsgálataink szerint (*Fehér, 1973*) a beszivárgás kezdeti, nagy intenzitású szakaszát a Philip-egyenlet, a kisebb intenzitású szakaszt a Horton-egyenlet közelíti meg. A vízrendezési vizsgálatokhoz a *Horton-féle egyenlet alkalmazását* javasoljuk:

$$f = (f_0 - f_c)e^{-ct} + f_c \quad [\text{mm/h}], \quad (3-56)$$

ahol; f - a beszivárgási intenzitás [mm/h],
 f_0 - az ún. kezdeti beszivárgási intenzitás (a holtvíz-tartalomig kiszáritott talaj beszivárgási intenzitása [mm/h],
 f_c - az állandósult beszivárgási intenzitás [mm/b],
 e - a természetes logaritmus alapja,
 t - az idő [h],
 c - a talajtól függő paraméter.

Az egyenlet paramétereit a 3.23. ábra segítségével tekinthetjük át. Az állandósult beszivárgás értéke gyakorlatilag megegyezik a talaj függőleges vízáteresztő képességével. Az $f_0 - f_c$ értéket matematikai átalakítás után fel lehet írni $a \cdot c$ formában, ahol az a érték megegyezik egy adott talajszelvény (talajréteg) mm-ben kifejezett vízkapacitásával. A beszivárgási egyenlet paramétereit néhány fizikai talajféleségre a 3.3. táblázatban adjuk meg.

A **párolgás** összetett folyamat, hiszen értéke a páraleadó és a párafelvevő rendszer állapotától egyaránt függ. A páraleadó rendszer a talaj (evaporáció), a növény (transzspiráció), illetve a talaj és a növény együttese (evapotranszspiráció). A párafelvevő rendszer a légtér, aktuális hőmérsékletével és páratartalmával. A lehetséges párolgást (potenciális evapotranszspiráció) az határozza meg, hogy a légtér milyen mennyiségű párat tud fogadni, mekkora a páraéhsége, a telítettségi hiánya. A tényleges párolgás nemcsak a légtér páraéhségétől függ, hanem attól is, hogy a talajban van-e elpárologtatható vízkészlet. A párolgás lehetséges minimális értéke nulla (nem beszélünk itt a kondenzációs folyamatokról), amikor a levegő teljesen telített. A maximális érték a talaj és a növény párologtató-képességétől függ. Ez általában kisebb, mint a levegő ezzel egy időben kialakuló párahiánya, tehát a lehetséges párolgás nagyobb, mint a tényleges. Gyakran előfordul, hogy a levegő páraéhségét a nedvességekészlet hiánya miatt nem elégíti ki a párolgás.



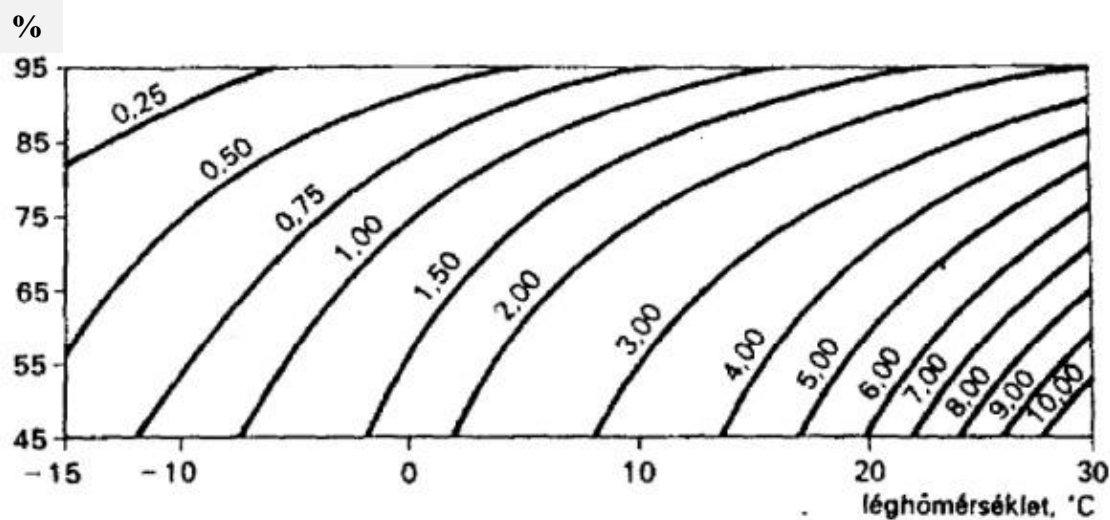
3.23. ábra. A Horton-féle beszivárgási egyenlet paramétereinek értelmezése

A párolgás számítására szolgáló összefüggések a *potenciális párolgásból* indulnak ki. A potenciális párolgást a levegő hőmérséklete, páratartalma és a szélviszonyok határozzák meg (az utóbbinak a páratelt levegő elszállításában és száraz levegőre cserélésében van szerepe). A hazai viszonyokra (többek között) *Antal* dolgozott ki párolgási összefüggést, amelynél a szél hatása a paraméterekbe van beépítve. Az összefüggés

$$ET_{pot} = 0,9 E^{0,7} (1 - r)^{0,7} \left(1 + \frac{t}{273}\right)^{4,8} \quad [\text{mm/nap}] \quad (3-57)$$

3.3. táblázat. A Horton-féle beszivárgási egyenlet paramétereinek néhány fizikai talajféleségre (szántóföldi kultúrák) (Fehér, 1973)

Talaj	a mm	c	f _c (b) mm/h
Homok	350-400	0,06 - 0,10	6,0 - 50,0
Iszap	300-350	0,10 - 0,20	4,0 - 6,0
Könnyű agyag	200 - 300	0,20 - 0,30,	2,0 - 4,0
Agyag	150-200	0,30 - 0,50	0,5 - 2,0
Szikes kötött talaj	100 -150	0,04 - 0,08	0,2 - 0,5



3.24. ábra. A potenciális párolgás a levegő relatív nedvességtartalmának és a léghőmérsékletnek a függvényében

ahol: ET_{pot} - a potenciális párolgás (mm/nap),
 E - a levegő lehetséges páratartalmának a napi középértéke [g/cm^3],
 r - a levegő relatív páratartalmának napi középértéke [g/cm^3],
 t - a levegő napi középhőmérséklete [$^{\circ}\text{C}$].

A potenciális evapotranszpiráció a léghőmérséklet és a levegő relatív páratartalmának függvényében a 3.24. ábra segítségével határozható meg.

A potenciális evapotranszpirációból a tényleges párolgást a talaj nedvességtartalmának, a növény fajtájának és fejlettségi fokának megfelelő redukciónak után lehet meghatározni (Kienitz, 1974; Antal-Posza, 1966). A tényleges párolgás (E_t) az

$$E_t = \alpha ET_{pot} \quad \text{ahol} \quad \alpha = \frac{\sigma + B}{1 + B} \quad (3-58)$$

összefüggésből számítható ki, ahol B az ún. növényeszoró (a növény fajtájától és fejlettségi fokától függő állandó, értékét a 3.4. táblázatban adjuk meg), σ pedig a talaj telítettségétől függő érték, amit ki lehet fejezni a pórus nedvességtartalma (r), illetve egy adott talajréteg mm-ben kifejezett nedvességtartalma (N) függvényében:

$$\sigma = \frac{r - r_0}{1 - r_0} = \frac{N - N_{min}}{N_{max} - N_{min}} \quad (3-59)$$

[A (3-59) összefüggésben az r , illetve az aktuális, illetve a minimális pórusnedvességtartalom (%) N , N_{min} , N_{max} egy adott talajréteg aktuális, minimális és maximális nedvességtartalma (mm).] Gyakorlati számítások céljára, elhanyagolások után a következő összefüggést ajánljuk az α számítására:

$$\alpha = \frac{1}{1 + B} \left(\frac{N^2}{N_{max}^2} + B \frac{N}{N_{max}} \right) \quad (3-60)$$

3.4. táblázat. Az Antal-féle párolgási összefüggés növényiszorzójának (B) értékei (ANTAL- POSZA, 1970)

Hónap, dekád	Cukorrépa	Lucerna	Őszi búza	Kukorica	Gyep	
Április	I.	0,04	0,28	0,21	0,00	0,17
	II.	0,11	0,34	0,33	0,00	0,26
	III.	0,18	0,48	0,47	0,04	0,38
Május	I.	0,30	0,80	0,66	0,10	0,52
	II.	0,40	0,70	0,89	0,18	0,61
	III.	0,50	0,60	1,00	0,24	0,72
Június	I.	0,60	0,82	1,00	0,32	0,82
	II.	0,70	0,96	0,90	0,46	0,86
	III.	0,81	0,45	0,59	0,68	0,92
Július	I.	0,96	0,68	0,11	0,92	0,96
	II.	1,00	0,94	0,00	1,00	1,00
	III.	0,96	1,00	0,00	0,96	1,00
Augusztus	I.	0,85	0,65	-	0,89	0,99
	II.	0,74	0,99	-	0,73	0,93
	III.	0,62	0,92	-	0,58	0,88
Szeptember	I.	0,52	0,78	-	0,45	0,79
	II.	0,42	0,65	-	0,32	0,71
	III.	0,33	0,99	-	0,20	0,55
Október	I.	0,26	0,85	-	0,10	0,25
	II.	0,22	0,60	-	0,04	0,12
	III.	0,18	0,40	-	0,00	0,10

November 1. - Március 31. között a növényiszorzó (E) értéke 0,00.

ahol a jelölések megfelelnek a (3- 58) és a (3- 59) összefüggésben alkalmazott jelölésekkel.

A felszíni lefolyás a Chezy-egyenletből kiindulva számítható. Lepelszerű vízmozgás esetén az átalakítás (Salamin, 1969):

$$q = Av = AC\sqrt{RI} \quad A=h \cdot Im \quad R = h \quad C=10, \\ q = Ch^{3/2}I^{1/2} = 10h^{3/2}I^{1/2} \quad (3-61)$$

ahol: q - a lejtő egységnyi (1 m) széles sávjára vonatkozó vízhozam,
 v - az átlagos vízsebesség,
 G - a sebességtényező,
 A - a szelvényterület,
 R - a hidraulikus sugár,
 I - az esés,
 h - a vízmélység.

A vízháztartási egyenletből meg lehet határozni az átlagos vízmélységet. Ennek, valamint az esésnek az ismeretében a felszíni lefolyás kiszámítható.

Ábrajegyzék

3.10. ÁBRA A MOZGÁSI ENERGIA FAJTÁI	18
3.11. ÁBRA. AZ ELEMI VÍZTÉRFOGATOT JELLEMZŐ SEBESSÉGEK	19
3.12. ÁBRA A DARCY-TÖRVÉNY KÍSÉRLETI ÉRTELMEZÉSE	23
3.13. ÁBRA A VÍZÁTERESZTŐ KÉPESSÉG ÉS A SZIVÁRGÁSI SEBESSÉG ÉRTELMEZÉSE RÉTEGZETT TALAJ ESETÉBEN.....	25
3.14. ÁBRA. A DUPUIT-EGYENLET JELÖLÉSEINEK ÉRTELMEZÉSE.....	27
3.15. ÁBRA. A TALAJCSÖVEZÉSI PARAMÉTEREK ÉRTELMEZÉSE PERMANENS VÍZMOZGÁS ESETÉN	28
3.16. ÁBRA. A TALAJCSÖVEZÉS ÁLTALÁNOS ALAPEGYENLETÉBEN SZEREPLŐ VÁLTOZÓK ÉRTELMEZÉSE.....	29
3.17. ÁBRA. A TALAJCSÖVEZÉSI PARAMÉTEREK ÉRTELMEZÉSE NEM PERMANENS ÁLLAPOT ESETÉN	31
3.18. ÁBRA. AZ ÁRAMVONALAK ÉS A POTENCIÁLVONALAK ÉRTELMEZÉSE.....	33
3.19. ÁBRA. A TALAJCSÖVEZÉSNEK KIALAKULÓ KÜLÖNBÖZŐ ÁRAMKÉPEK.....	33
3.20. ÁBRA. A TALAJVÍZ-HÁZTARTÁSI JELLEGGÖRBE	35
3.21. ÁBRA. A HÁROMFÁZISÚ ZÓNA VÍZHÁZTARTÁSÁNAK ELVI VÁZLATA	37
3.22. ÁBRA. AZ ÁPRILISI 50%-OS VALÓSZÍNŰSÉGŰ, HATNAPOS CSAPADÉK ÉS A 10%-OS VALÓSZÍNŰSÉGŰ, ÉVI EGYNAPOS MAXIMÁLIS CSAPADÉK ELOSZLÁSA MAGYARORSZÁGON	40
3.23. ÁBRA. A HORTON-FÉLE BESZIVÁRGÁSI EGYENLET PARAMÉTEREINEK ÉRTELMEZÉSE	42
3.3. TÁBLÁZAT. A HORTON-FÉLE BESZIVÁRGÁSI EGYENLET PARAMÉTEREI NÉHÁNY FIZIKAI TALAJFÉLESÉGRE (SZÁNTÓFÖLDI KULTÚRÁK) (FEHÉR, 1973)	42
3.24. ÁBRA. A POTENCIÁLIS PÁROLGÁS A LEVEGŐ RELATÍV NEDVESSÉGTARTALMÁNAK ÉS A LÉGHŐMÉRSÉKLETNEK A FÜGGVÉNYÉBEN. 43	
3.4. TÁBLÁZAT. AZ ANTAL-FÉLE PÁROLGÁSI ÖSSZEFÜGGÉS NÖVÉNYSZORZÓJÁNAK (B) ÉRTÉKEI (ANTAL- POSZA, 1970)	44