



# **TÉNYFELTÁRÁS**

## **KLÓROZOTT SZÉNHYDROGÉNEKKEL SZENNYEZETT TERÜLETEKEN**





# TÉNYFELTÁRÁS KLÓROZOTT SZÉNHIDROGÉNEKKEL SZENNYEZETT TERÜLETEKEN

## Módszertani kézikönyv

készítette a



BGT Hungaria Környezettechnológiai Kft.  
1113 Budapest, Bartók Béla út 152/H



Felelős kiadó: Dr. Mezőszentgyörgyi Dávid főigazgató

Szerkesztette: Halmóczki Szabolcs

Szerzők: Finta Béla, Dr. Gondi Ferenc, Halmóczki Szabolcs, Szabó Imre, Tóth Roland

Grafikai munka: Tóth Zoltán – LizArt Design

Budapest, 2016

ISBN 978-963-309-076-3

Nyomdai kivitelezés: Adu Press Kft.

# TARTALOM

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. BEVEZETÉS .....</b>   | <b>3</b>  |
| <b>2. KLÓROZOTT SZÉNHIIDROGÉNEK FAJTÁI, FIZIKAI, KÉMIAI JELLEMZŐI .....</b>   | <b>7</b>  |
| <b>3. A KLÓROZOTT SZÉNHIIDROGÉNEK MEGJELENÉSI FORMÁI<br/>A FELSZÍN ALATTI KÖRNYEZETBEN .....</b>                                  | <b>10</b> |
| <b>4. A KLÓROZOTT SZÉNHIIDROGÉNEKSEL SZENNYEZETT TERÜLETEKEN<br/>SZERZETT EDDIGI TAPASZTALATOK ÖSSZEFOGLALÓ ISMERTETÉSE .....</b> | <b>21</b> |
| 4.1. KEVÉSSÉ SIKERES KÁRMENTESÍTÉSEK .....  | 21        |
| 4.2. A SZENNYEZETTSÉG VÍZSZINT FELETTI RÉSZÉNEK FONTOSSÁGA .....  | 22        |
| 4.3. A KIS ÁTERESZTŐKÉPESSÉGŰ RÉTEGEK JELENTŐSÉGE .....   | 23        |
| 4.4. JELENTŐS KIHÍVÁS A GÓCETERÜLETEK LEHATÁROLÁSA .....  | 23        |
| <b>5. A FELTÁRÁSOK ESZKÖZTÁRA .....</b>   | <b>24</b> |
| 5.1. KÚPBEHATOLÁSI VIZSGÁLAT .....  | 24        |
| 5.2. KORSZERŰ IN SITU MŰSZERES VIZSGÁLATOK .....  | 32        |
| 5.3. MINTAVÉTELI ELJÁRÁSOK .....  | 37        |
| 5.3.1. Hagyományos fúrásos feltárások és mintavételi eljárások .....  | 37        |
| 5.3.2. Egyszeri pontmintavételi eljárások .....   | 38        |
| 5.3.2.1. GeoNordic gáz- és vízmintavételi módszer .....   | 39        |
| 5.3.2.2. ConeSipper vízmintavételi módszer .....  | 40        |
| 5.3.2.3. Waterloo profiler vízmintavételi módszer .....   | 41        |
| 5.3.2.4. Mintavétel a földtani közegből vibrációs (szónikus),<br>sajtolásos és veréses eljárásokkal .....                         | 43        |
| 5.4. MEGFIGYELŐ (MONITORING) KUTAK .....  | 49        |
| 5.4.1. Hagyományos fúrt kutak .....   | 49        |
| 5.4.2. Kis átmérőjű kutak .....   | 50        |
| 5.4.3. Waterloo típusú kutak .....  | 53        |
| 5.4.4. CMT típusú kutak .....   | 56        |
| 5.4.5. FLUTE kutak .....  | 58        |
| 5.4.6. A monitoring kutak szűrőhosszainak jelentősége .....   | 59        |
| <b>6. A TÉNYFELTÁRÁS ELVEI ÉS SAJÁTOSÁGAI VÍZNÉL NEHEZEBB<br/>SZENNYEZŐANYAGOK ESETÉN .....</b>                                   | <b>61</b> |
| <b>FELHASZNÁLT IRODALOM .....</b>   | <b>67</b> |
| <b>A KÉZIKÖNYVBEN HASZNÁLT IDEGEN KIFEJEZÉSEK, RÖVIDÍTÉSEK .....</b>  | <b>68</b> |



# 1. BEVEZETÉS

Magyarországon az elmúlt évszázadban jelentősen nőtt a felhasznált kockázatos vegyi anyagok mennyisége. A kockázatos vegyi anyagok közül a klórozott szénhidrogéneket hazánkban legalább 50-70 év óta alkalmazzák különféle ipari tevékenységek során. Németországban, az Egyesült Királyságban és az Amerikai Egyesült Államokban a XX. század elejétől állítanak elő klórozott oldószereket ipari méretekben. A klórozott szénhidrogének környezeti elemekre és az élővilágra kifejtett káros hatásainak felismerése és kezelése alig több mint 40 évvel ezelőtt kezdődött.

Felismerték, hogy a környezeti elemek (talaj, földtani közeg, felszín alatti víz, felszíni víz, levegő) tisztasága komoly jelentőséggel bír a földi élet fennmaradása és minősége szempontjából, és a szennyezettség mértéke pénzben is mérhető és kifejezhető.

Az ezredfordulón megalkotott jogszabály (10/2000. (VI. 2.) KöM-EüM-FVM-KHVM együttes rendelet a felszín alatti víz és a földtani közeg minőségi védelméhez szükséges határértékekről) nevesített sokféle klórozott szénhidrogént és megteremtődött a jogi alap a felszín alatti környezetbe került kockázatos vegyi anyag koncentrációk szabályozásához.

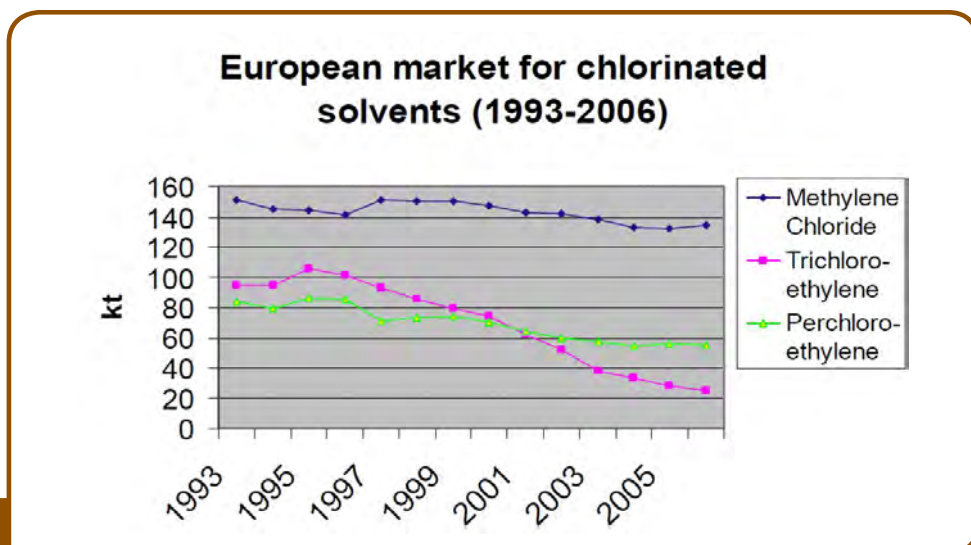
Sajnos az elmúlt évtizedekben felhasznált, valamint a környezeti elemekbe került klórozott szénhidrogének mennyiségére vonatkozó becslés nem áll rendelkezésünkre, de tudható, hogy az iparban és a legkülönbözőbb szolgáltatások kapcsán elterjedt volt és jelenleg is széleskörű a használata. Nagymennyiségű klórozott oldószer került felhasználásra hazánkban a gépgyártás, elektronikai ipar, fémmegmunkálás, vegytisztítás, gyógyszergyártás, a mezőgazdasági vegyszergyártás (peszticidek), műanyagipar szükségleteinek kielégítése céljából.

A teljesség igénye nélkül az alábbi módon kerülhettek klórozott oldószerek a felszín alatti környezetbe: a hulladékká vált oldószerek talajfelszínre történő kiöntése, gödrökbe, „méregkutakba”, történő bevezetése, a szállítás és tárolás során a technológiai fejelem megsértése, ipari balesetek (csővezeték meghibásodás, lyukas tartályokból való kiszivárgás, tartály túltöltés, közúti baleset) során. Gyakori eset, hogy a csapadékvíz vagy szennyvíz elvezetésére szolgáló csatornába került oldószerek a csatorna nyomvonala mentén a repedéseken, töréseken keresztül a földtani közegbe és a felszín alatti vízbe jutottak.

A hulladékká vált klórozott szénhidrogének általánosan elterjedt elhelyezési módja volt

az oldószerek kiöntése a talaj felszínére, gödrökbe, ezt néhány oldószergyártó a 70-es évekig ajánlotta is az oldószerek biztonsági adatlapjain. Ez a fajta elhelyezés abból a felismerésből fakadt, hogy az oldószerek gőznyomása jelentős, és ezért párolgásra hajlamosak. Azzal viszont korábban nem számoltak, hogy az oldószerek képesek beszivárogni a felszín alatti környezetbe, és tartós környezetkárosodást okozhatnak. A XX. század 70-es, 80-as éveigi a klórozott oldószerek jelenlétét a környezeti elemekben azért sem ismerték fel, mert a kimutatásukra képes kémiai analitikai eszközök és módszerek nem voltak általánosan elterjedtek.

A klórozott oldószerek kiterjedt használatát jelzi, hogy 1993 és 2006 közt Európában értékesített három legfontosabb klórozott alifás oldószer mennyisége minden évben meghaladta a 200 ezer tonnát (1. ábra).



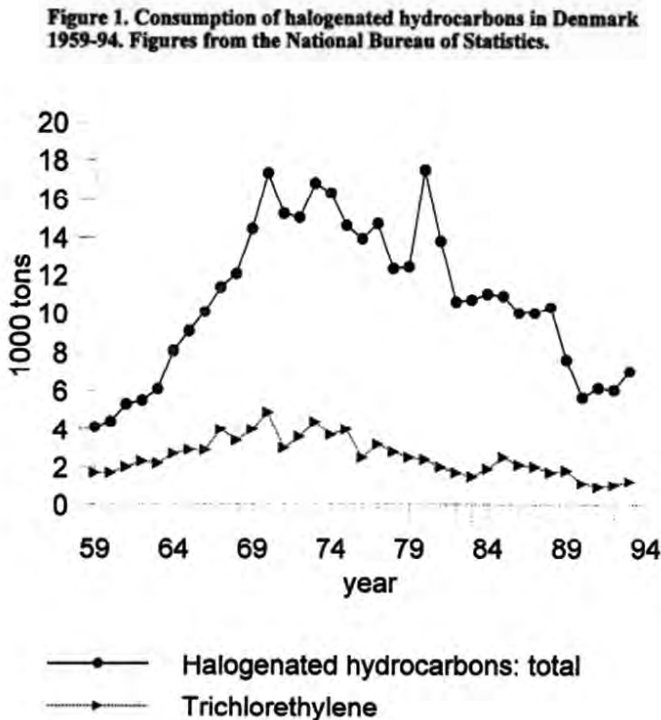
**1. ábra: Klórozott oldószerek eladott mennyisége Európában 1993 és 2006 közt**  
(Forrás: [http://www.eurochlor.org/media/12850/5-1-2-3\\_perchloroethylene\\_-\\_white\\_paper.pdf](http://www.eurochlor.org/media/12850/5-1-2-3_perchloroethylene_-_white_paper.pdf))

Örvendetes előrelépés, hogy ma már egyre több iparágban váltják ki a klórozott oldószereket egyéb, a környezetre kevésbé ártalmas vegyi anyagokkal, a műszaki védelem egyre javul az oldószerek szállítása, tárolása, a veszélyes hulladékká vált vegyi anyagok elhelyezése során, továbbá a zárt rendszerű oldószer felhasználás és újrahasznosítás is egyre jelentősebb méreteket ölt, tehát a jövőben valószínűleg egyre kisebb mennyiségű halogénezett oldószer fogja terhelni a környezetet. Az atmoszférikus ózon védelme érdekében és az élővilágra kifejtett bizonyított rákkeltő hatások következtében megszűnt több klórozott szénhidrogén vegyület gyártása és felhasználása. Például az 1,1,1-triklór-etán és a freonok gyártása 1995-ben szűnt meg véglegesen a Montreáli egyezmény értelmében, a szén-tetraklorid használatának hazai korlátozására az „A sztratoszférikus

ózonréteg védelméről szóló nemzetközi egyezmény végrehajtásáról szóló 22/1993. (VII. 20.) KTM rendelet” miatt került sor. A 41/2000. (XII. 20.) EÜM-KÖM együttes rendelet (Az egyes veszélyes anyagokkal, illetve veszélyes készítményekkel kapcsolatos egyes tevékenységek korlátozásáról) korlátozza számos klórozott, illetve halogénezett szénhidrogén (pl. vinil-klorid, kloroform, 1,1,2,2-tetraklóretán, 1,1-diklór-etilén, PCB vegyületek, PCT, PCP, PBB, stb.) felhasználását hazánkban.

Sajnos az eddigi környezetvédelmi tényfeltárási tapasztalatok azt mutatják, hogy a korábban klórozott oldószerek tárolásával, használatával, elhelyezésével érintett területeken kimutathatók az oldószerek vagy azok bomlástermékei a felszín alatti környezetben is.

A hazánkban felhasznált klórozott oldószerek mennyiségéről nem áll rendelkezésünkre adat, de a Dán Királyságban gyűjtött adatok alapján 1959-94 közt évente több ezer tonnányi klórozott oldószert használtak fel (2. ábra), ami támpontot ad a hazánkban felhasznált klórozott oldószermennyiség nagyságrendjének becsléséhez.



2. ábra: Klórozott oldószerek felhasználása a Dán Királyságban 1959 és 1994 közt  
(Forrás: Kurt Rasmussen: Chlorinated solvents, 1997)

Hazánkban több százra tehető a klórozott szénhidrogénekkal szennyezett területek száma, bár megbízható felmérési eredmény nem áll rendelkezésre. A klórozott szénhidrogénekkal szennyezett területeken a sekély felszín alatti víz (talajvíz) mellett mélyebb víztartók elszennyeződésével is számolni kell, ami esetenként vízbázisok vízminőségét is veszélyeztetheti, amint azt az elmúlt évtizedek tapasztalatai megerősítik. Jelenleg hazánkban még kevésbé felismert tény, hogy nem csak az oldószerekkel szennyezett víz, hanem a felszín alatt jelenlévő oldószergőzők épületekbe bepárologva is veszélyeztethetik az emberi egészséget. A földtani közeg és a felszín alatti víz, mint környezeti elemek „emlékezete” tartós. Széleskörű tapasztalat, hogy a természetben elő nem forduló klórozott szénhidrogének egy része hosszú évtizedeken át megmarad a felszín alatti környezetben, nagy kiterjedésű és térfogatú felszín alatti vízkészleteket képes elszennyezni.

Az elmúlt évtizedekben nyilvánvalóvá vált, hogy a klórozott szénhidrogénekkal szennyezett területek feltárása és a szennyezettség mértékének csökkentésére irányuló erőfeszítések komoly kihívást jelentenek. Ezt jelzi, hogy a vizsgálati eszközök, módszerek és kármentesítési technológiák nem teljesen kiforrottak, napjainkban is fejlesztés alatt állnak új diagnosztikai eszközök és kármentesítési technológiák.

A hatékonyabb, pontosabb, megbízhatóbb tényfeltárást és kármentesítést szolgáló eszközök és technológiák fejlesztése és alkalmazása mellett talán még fontosabb a helyes és műszakilag megvalósítható célok meghatározására összpontosítani.

Jelen kézikönyv célja, hogy segítséget nyújtson a klórozott szénhidrogénekkal szennyezett területek kezelése kapcsán valamennyi érintettnek, azaz a szennyezett területek tulajdonosainak, a környezeti terhet viselőknak, a felszín alatti környezet minőségét vizsgálóknak, szakértőknak, a műszaki beavatkozásokat végzőknak, a kapcsolódó jogi eljárásokat folytatóknak. Ez a segítség részben műszaki jellegű, hiszen néhány korszerű diagnosztikai eszköz is bemutatásra kerül, azonban jelen könyv elsősorban a szennyezett területekkel kapcsolatos stratégiai jellegű gondolkodás előmozdítására hivatott. Ez utóbbira azért van szükség, mert a hibás elképzelésekből fakadó nem ésszerű elvárások sok esetben nem megfelelő intézkedésekbe, műszaki beavatkozásokba torkollhatnak, amelyek nem hozzák meg az elvárt környezetminőség javulást. Ez pedig sokaknál, főleg a megbízói és hatósági oldalon a türelem elvesztését, reménytelenséget vonhat maga után.

Bízunk benne, hogy ez utóbbiak helyett jelen kézikönyv elolvasása után az érintettek inkább újraértékelik a látókörükbe eső klórozott oldószerekkel szennyezett területen eddig tett erőfeszítéseket, összegyűjtik, ismételten kiértékelik a rendelkezésre álló ismereteket, meghatározzák a legsürgetőbb ismerethiányokat, és újragondolják a teendőket.





## 2. KLÓROZOTT SZÉNHYDROGÉNEK FAJTÁI, FIZIKAI, KÉMIAI JELLEMZŐI

A klórozott szénhidrogének a víznél nagyobb sűrűségű vegyi anyagok közé tartoznak. A leggyakrabban használt klórozott szénhidrogének a klórozott etének (etilének), etánok és metánok, de a felszín alatti környezetben ritkábban egyéb klórozott aromás és poli-aromás vegyületek (pl. klórbenzolok, PCB, PCP, PCT, stb.) jelenlétével is számolni lehet. Bár nem tárgyai a jelen útmutatónak, de meg kell említeni, hogy szintén víznél nagyobb sűrűségű vegyületsorozat a fluor-, bróm- és jódtartalmú szerves vegyületek köre (HFC, CFC, HCFC, FC, PFC, PBDE, PBB, stb.), a szénkátrány, higany, bizonyos nyers kőolajtípusok és a vízfázisú, víznél nehezebb oldatok köre (pl. szervesetlen savak oldatai, nagy sótartalmú oldatok).

A klórozott szénhidrogének lehetnek egykomponensű vagy több vegyületet is tartalmazó keverékek. A felszín alatti környezetben általában többkomponensű klórozott szénhidrogénnel lehet találkozni, mert egyfelől az egykomponensű oldószerekben is jelen vannak egyéb „szennyező” vegyületek, másfelől a felszín alatti környezetben bekövetkező bomlás köztes termékei is megjelenhetnek.

A klórozott szénhidrogének sorsát a felszín alatti környezetben a földtani közeg sajátosságain kívül az adott vegyi anyag fizikai, kémiai jellemzői befolyásolják, ezek a teljesség igénye nélkül a sűrűség, kinematikai viszkozitás, felületi feszültség, kémiai összetétel, oldhatóság vízben és egyéb oldószerekben, gőznyomás, Henry-állandó, nedvesítő képesség.

Az 1. táblázat néhány gyakori klórozott oldószer főbb fizikai és kémiai jellemzőjét foglalja össze.

| vegyület               | rövidített név | képlet                              | móltömeg (g/mól) | oldhatóság vízben (mg/dm <sup>3</sup> ) | sűrűség (kg/m <sup>3</sup> ) | gőznyomás (Hgmm 25°C) | Henry állandó (atm·m <sup>3</sup> /mol 25°C) | kinematikai viszkozitás (cP) | K <sub>oc</sub> (dm <sup>3</sup> /kg) |
|------------------------|----------------|-------------------------------------|------------------|---|------------------------------|-----------------------|--|------------------------------|---------------------------------------|
| tetraklóretilén        | PCE            | CCl <sub>2</sub> =CCl <sub>2</sub>  | 165,83           | 200                                     | 1620                         | 18,4                  | 0,0177                                       | 0,9                          | 107                                   |
| triklóretilén          | TCE            | CHCl=CCl <sub>2</sub>               | 131,39           | 1100                                    | 1460                         | 72                    | 0,00985                                      | 0,57                         | 67,7                                  |
| cisz 1,2-diklóretilén  | DCE            | CHCl=CHCl                           | 96,94            | 4930                                    | 1280                         | 175                   | 0,00408                                      | 0,4                          | 43,8                                  |
| vinil-klorid           | VC             | CH <sub>2</sub> =CHCl               | 62,50            | 2760                                    | (gáz)                        | 2800                  | 0,0278                                       | (gáz)                        | 23,7                                  |
| széntetraklorid        | CT             | CCl <sub>4</sub>                    | 153,82           | 805                                     | 1590                         | 112                   | 0,0276                                       | 0,97                         | 48,8                                  |
| kloroform              | CF             | CHCl <sub>3</sub>                   | 119,38           | 7920                                    | 1480                         | 198                   | 0,00367                                      | 0,56                         | 35                                    |
| diklór-metán           | DCM            | CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>     | 84,93            | 15400                                   | 1327                         | 455                   | 0,00325                                      | 0,43                         | 23,7                                  |
| 1,1,2,2-tetraklór-etán | PCA, TeCA      | CHCl <sub>2</sub> CHCl <sub>2</sub> | 167,85           | 2970                                    | 1595                         | 5,2                   | 0,000367                                     | 1,75                         | 107                                   |
| 1,1,1-triklóretán      | TCA            | CCl <sub>3</sub> CH <sub>3</sub>    | 133,40           | 1330                                    | 1330                         | 124                   | 0,0172                                       | 0,84                         | 48,6                                  |
| 1,1-diklór-etán        | DCA            | CHCl <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>   | 98,96            | 5500                                    | 1176                         | 228                   | 0,00562                                      | 0,44                         | 35                                    |
| klórbenzol             |                | C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Cl    | 112,56           | 502                                     | 1110                         | 12,1                  | 0,00311                                      | 0,8                          | 268                                   |
| Aroclor 1221 (PCB)     |                | (változó)                           | 188,66           | 0,2                                     | 1180                         | 0,0067                | 0,000228                                     | 5                            | 10300                                 |

1. táblázat: Néhány kiválasztott klórozott oldószer főbb fizikai és kémiai jellemzői

A klórozott szénhidrogének szélesebb körének főbb fizikai és kémiai jellemzőit többek közt a felhasznált irodalomban jelzett „DNAPL site evaluation, 1993, Robert M. Cohen, James W. Mercer, USEPA” című munka „A” jelű függeléke tartalmazza.

Az ipari hasznosítású klórozott alifás oldószerek sűrűsége az 1,1-1,6 kg/m<sup>3</sup> tartományban van, viszkozitása 0,57-1,0 cP, tehát a víznél nagyobb sűrűségűek, és kisebb kinematikai viszkozitásúak (A víz dinamikai viszkozitása 20 °C hőmérsékleten 1,002 cP, 1 cP / centipoise/ = 0,001 Pa·s). Ezek a tulajdonságok elősegítik a felszín alatti környezetben a klórozott alifás oldószerek viszonylag gyors mozgását önálló fázisként, és a tapasztalatok, modelleredmények szerint a felszín alatti környezetbe jutást követően néhány éven belül befejeződik az önálló fázisban történő mozgás.

Az iparban használt klórozott alifás szénhidrogének illékonyak, és előre jelezhető megjelenésük a gázfázisban a vízzel nem telített földtani közeg pórusterében. Ezen vegyületek  $K_{oc}$  értékei viszonylag alacsonyak, ami a felszín alatti vízben oldott szennyezőanyagok csekély retardációját vetíti előre. A  $K_{oc}$  érték írja le egy szerves vegyület megoszlását a víz és a szilárd fázis szerves anyag frakciója közt. Magas  $K_{oc}$  értékek jellemzők az erős megkötődési képességű szerves vegyületekre, ezért az ilyen vegyületek terjedési sebessége lényegesen alacsonyabb a felszín alatti víz szivárgási sebességéhez képest. A klórozott alifás szénhidrogének viszonylag alacsony  $K_{oc}$  értékei előrevetítik, hogy a klórozott alifás szénhidrogének viszonylag kevésbé hajlamosak megkötődni a földtani közeg szerves anyagán, és oldott állapotban terjedési sebességük nagyobb, mint például a PAH, PCB vegyületeké, vagy a nagyobb szénatomszámú ásványolaj eredetű alifás szénhidrogénéké.

A poliklórozott bifenileket (PCB) 209 vegyület alkotja, 1-10 klóratom kapcsolódik a bifenilhez. A PCB előállítása ipari méretekben 1930-as években kezdődött. Főként transzformátorokban, nyomdafestékekben, festékekben, peszticidekben használták, és a termékek neveit a kémiai összetétel alapján adták. A Monsanto által használt Aroclor terméknév utáni négyjegyű szám első két jegye a bifenil szénatomszámát jelzi, a második két számjegy a klór súlyszázalékát. Például az Aroclor 1254 nevű termék 12 szénatomot tartalmazó bifenilt, és 54 súlyszázaléknyi klórtartalmat jelez. Ma már nem gyártanak PCB vegyületeket, mert felismerték veszélyességét és bioakkumulációs képességét állati, emberi szövetekben. A PCB vegyületeket gyakran keverték egyéb vegyületekkel, klórbenzolokkal, ásványolaj eredetű szénhidrogénekkal, így a PCB tartalmú termékek sűrűsége 1,1-1,5 kg/m<sup>3</sup>, dinamikai viszkozitása 10-50 cP tartományban jellemző. A nagy viszkozitás következtében a nagy sűrűség ellenére hosszú ideig, akár évtizedekig is mozgásban lehetnek a felszín alatti környezetben a PCB tartalmú olajok. A legtöbb PCB vegyület erősen hidrofób, ezért erősen megtapad a szilárd szemcséken, felületeken. Ezért ahol a felszín alatti vízben PCB mutatható ki, ott a szennyezettség másodlagos forrása a mintavételi hely mellett közvetlenül felvízi irányban található.

Magyarországon kisszámú területen várható PCB típusú szennyezettség, azonban kü-

## 2. KLÓROZOTT SZÉNHYDROGÉNEK FAJTÁI, FIZIKAI, KÉMIAI JELLEMZŐI

lönösen transzformátorok, nyomdák, és peszticid gyártó, kiszerelő létesítmények környezetében érdemes szűrővizsgálatot végezni PCB vegyületekre a felszín alatti környezetből vett mintákon.

A felszín alatti környezetben az elkülönülő szerves fázist és az oldott csóvát alkotó klórozott szénhidrogén állhat egy vegyületből, de alkothatja több szerves vegyület is, köztük víznél kisebb sűrűségűek is. A vegytisztítók esetében általában csak tetraklóretilént használtak, de a valóságban a több vegyület alkotó oldószer keverékek gyakoribbak. Példaként említjük egy külföldi oldószer-regeneráló üzem környezetéből vett elkülönülő szerves fázis összetételét (2. táblázat).

| vegyület                | tömegszázalék |
|-------------------------|---------------|
| 1,1,1-TCA (Triklóretán) | 0,7           |
| TCE (Triklóretilén)     | 3,7           |
| PCE (Tetraklóretilén)   | 14,3          |
| toluolok                | 4,7           |
| m-xilol                 | 0,3           |
| o,p-xilolok             | 2,3           |
| 1,2,4-TCB               | 0,1           |
| PCB-1242                | 40,6          |
| PCB-1254                | 7,1           |
| TPH (>C7)               | 26,2          |

**2. táblázat: Példa egy külföldi helyszínen vett több vegyületből álló víznél nehezebb elkülönülő szerves fázis kémiai összetételére**

A keverék a víznél nagyobb sűrűségű klórozott alifás és PCB vegyületeken kívül tartalmaz víznél kisebb sűrűségű alifás és aromás szénhidrogéneket, amelyek mindegyike képes kioldódni az önálló szerves fázisból a vízfázisba. A fenti keverék szerves fázis sűrűsége  $1200 \text{ kg/m}^3$ , tehát összességében a víznél nagyobb sűrűségű.

A fenti példa azért fontos, mert egyfelől felhívja a figyelmet arra, hogy az elkülönülő szerves fázis, mint az oldott csóva forrása vegyileg összetett lehet (és az összetétel akár egyetlen szennyezett területen belül részterületenként is eltérő lehet), másfelől az ipari tevékenység során felszín alatti környezetbe került oldószerek fizikai, kémiai jellemzői lényegesen eltérhetnek a kémiailag tiszta oldószerektől.

A klórozott alifás szénhidrogének tehát

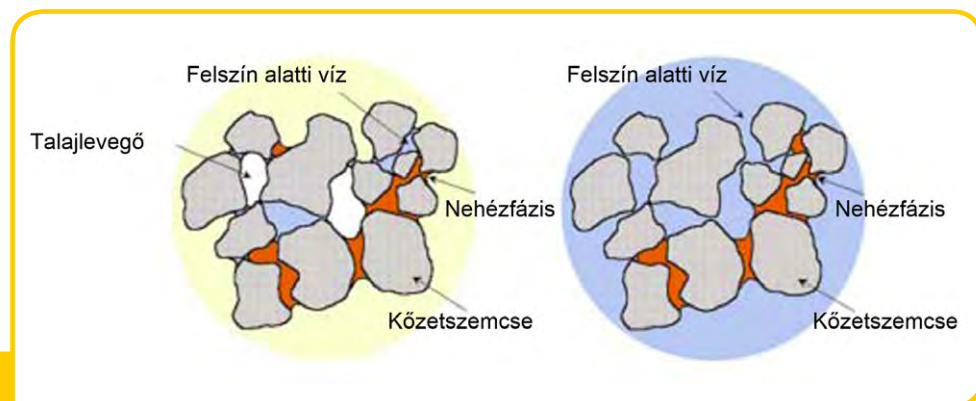
- általában kevésbé oldhatók vízben, elkülönülő fázisban is képesek megjelenni a felszín alatti vízben,
- a víznél nagyobb sűrűségűek, ezért képesek lejutni a vízszint alá is, ahol a felszín alatti vízbe beoldódva és a felszín alatti vízzel terjedve nagy víztérfogatokat képesek elszennyezni,
- magas gőznyomásuk és Henry-állandójuk miatt hajlamosak kipárolgásra,
- a felszíni vagy felszínközeli eredetű szennyezőanyagok képesek hosszú ideig megmaradni a felszín alatti környezetben, amely elsősorban viszonylag alacsony oldhatóságuk, és lassú bomlásuk következménye.



### 3. A KLÓROZOTT SZÉNHYDROGÉNEK MEGJELENÉSI FORMÁI A FELSZÍN ALATTI KÖRNYEZETBEN

A felszín alatti környezetbe került vízzel nem elegyedő és a víznél nagyobb sűrűségű klórozott szénhidrogének a gravitáció hatására a földtani közeg áteresztőképessége és szerkezeti sajátosságai által meghatározott irányokban terjednek, és kiszorítják a pórustérből, repedésekből a levegőt és a vizet. A szerves fázis tovább mozogva már csak részlegesen tölti ki a pórusteret, repedéseket, és szerves fázis cseppeket, ereket (az angol nyelvű irodalomban „residual DNAPL”) hagy hátra maga után, amelyeket a kapilláris erő tapaszt a szemcsékhez, repedések falához, mert a víz és szerves folyadék fázisok, illetve a gáz és szerves folyadék fázisok közt kialakul a felületi feszültség. Az ilyen típusú szerves fázis még jelentős hidraulikus gradiens hatására sem képes elmozdulni, és szivattyúzás hatására a kútba belépni, mert kapilláris erő tapasztja a szilárd szemcsékhez, felületekhez.

A nem összefüggő cseppek és erek hálózata előfordulhat a vízszint felett és alatt is. A 3. ábra szemlélteti a maradék telítettséget képező elkülönülő szerves fázis elhelyezkedését porózus földtani közegben a telítetlen és a vízzel telített zónában.



3. ábra: Fázisok elvi megoszlása a telítetlen és a telített zónában

### 3. A KLÓROZOTT SZÉNHYDROGÉNEK MEGJELÉSI FORMÁI A FELSZÍN ALATTI KÖRNYEZETBEN

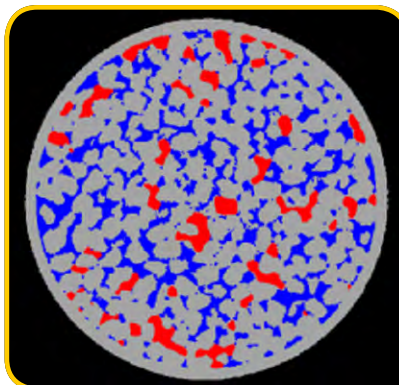
A 4. ábra részecskegyorsítóban (szinkrotron) előállított röntgensugárral készült számítógépes szeletfelvételt (CT) mutat egy elkülönülő klórozott szénhidrogén fázist is tartalmazó fúrómagról.

Az elkülönülő szerves fázis összefüggő folyadéktestként is megjelenhet (az angol nyelvű szakirodalomban „pooled DNAPL”), ez általában elegendő utánpótlás esetén alacsony áteresztőképességű, szivárgáslassító képződmények felszínén valószínű.

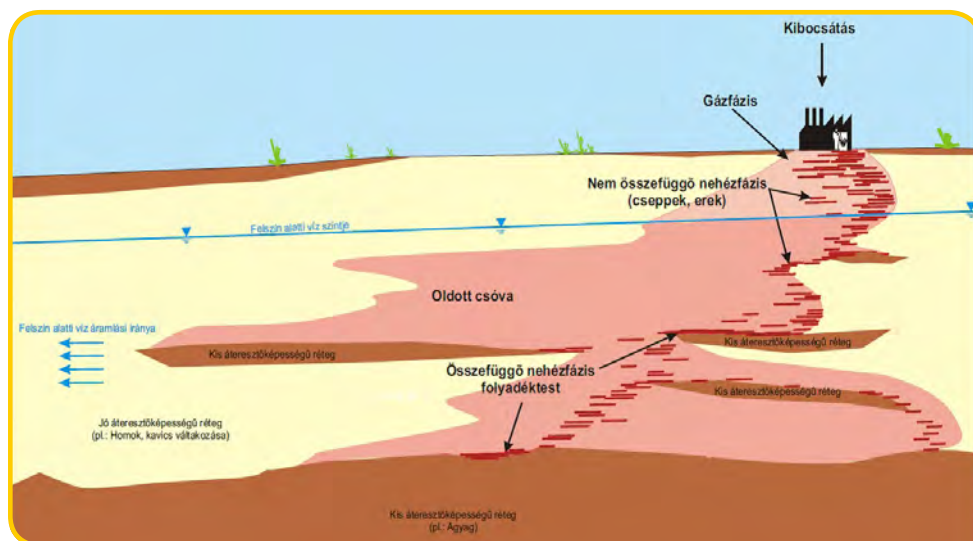
Ahol a szerves fázis megjelent akár egymástól elkülönült cseppek, erek formájában részlegesen telítve a pórusteret, akár összefüggő folyadékfázisként, ott az oldószerek beoldódnak a felszín alatti vízbe, kipárolognak a telítetlen zóna pórusaiba, és megkötődnek a szilárd szemcsék felületén (adszorpció).

A klórozott szénhidrogének felszín alatti környezetbe kerülése során az önálló szerves fázis mellett létrejönnek a vízben oldott, a gázfázisú és a talajszemcsék felszínén megkötött szennyezettség-típusok.

A földtani közeg heterogenitása miatt az áteresztőképessége is inhomogén eloszlású. Az alábbi rajzok két különböző földtani környezetben szemléltetik a klórozott szénhidrogén megjelenési formáinak térbeli eloszlását. Az 5. ábrán laza törmelékes üledékben



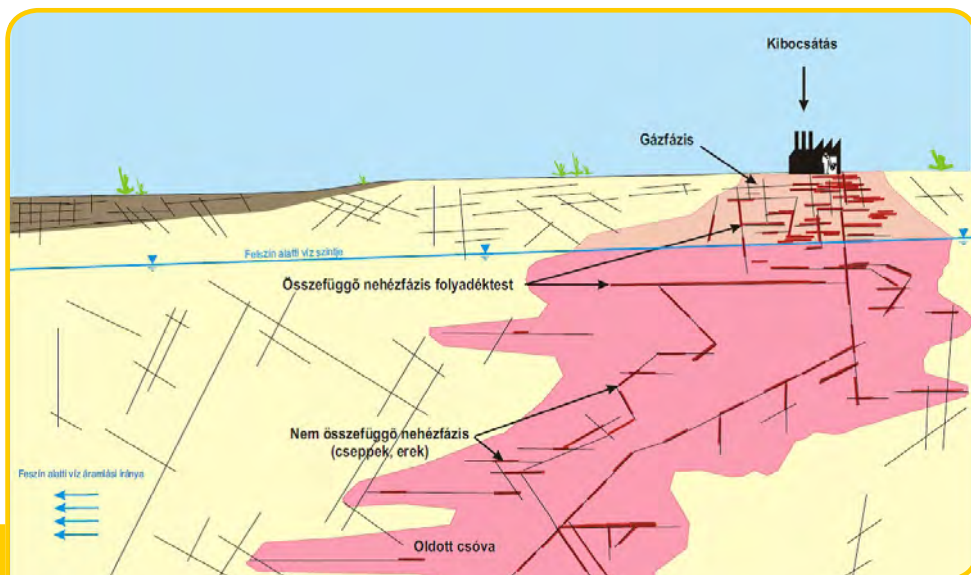
4. ábra: Számítógépes szeletfelvétel (CT) részecskegyorsítóban (szinkrotron) előállított röntgensugárral. A közetszemcsék szürkék, a víz kék, az oldószer piros.



5. ábra: Klórozott szénhidrogén elvi eloszlása laza törmelékes üledékekben

kek által alkotott horizontálisan rétegzett finomszemcsés szivárgálassító (agyag, iszap, homokliszt frakciók keverékei) és közepes, nagy átteresztőképességű rétegek (homok, kavics) láthatók.

A 6. ábra repedezett földtani közegben (vulkanitok, konszolidált üledékes képződmények, metamorfitek) mutatja a klórozott szénhidrogének elvroszlását.



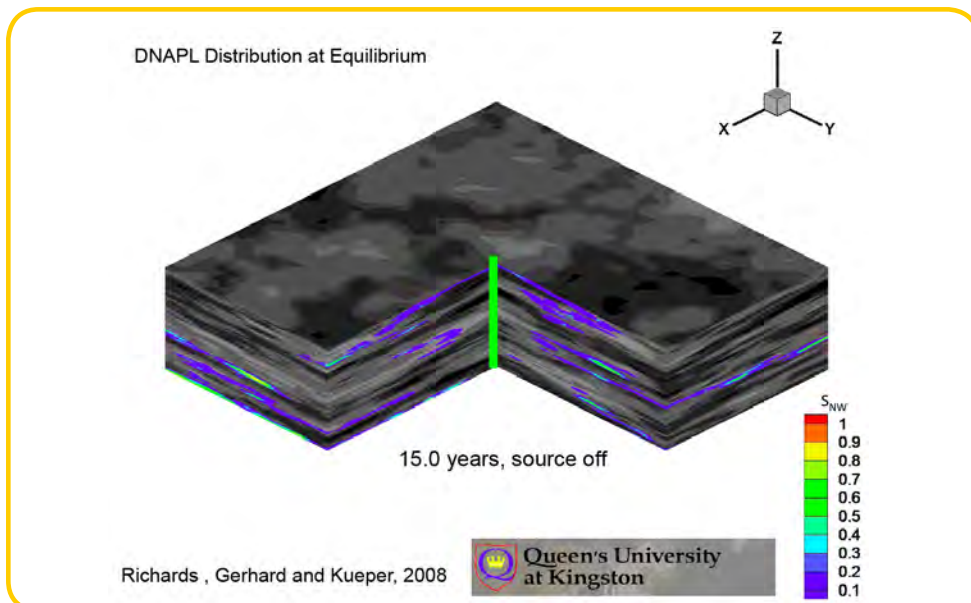
6. ábra: Klórozott szénhidrogén elvroszlása repedezett képződményekben

Az elkülönülő szerves fázis két megjelenési formáját különböztetjük meg, az összefüggő folyadéktestet, amelynél a pórustér nagyrészt szerves fázissal kitöltött, és a szerves fázissal részlegesen telített pórustérben kialakuló egymástól elkülönülő cseppeket, ereket. Az utóbbi esetben az elkülönülő szerves fázis egységeket nem szerves fázisok (szilárd, víz, a telítetlen zónában levegő) veszik körül.

Az önálló szerves fázis feltárása, és megtalálása komoly kihívás nehezen előrejelezhető térbeli elvroszlása miatt. A 7. ábra modell tömbszelvénye jól szemlélteti heterogén porózus földtani közegben az elkülönülő szerves fázis szeszélyes térbeli elvroszlását, valamint a pórusok általánosan jellemző viszonylag alacsony telítettségét szerves fázissal. Jól látható, hogy a bebocsátás helyétől távoli helyeken a legkülönbözőbb mélységekben is megjelenhet az elkülönülő szerves fázis, azonban 15 évvel az oldószer beszivárgását követően alapvetően az elkülönülő cseppek, erek és nem az összefüggő folyadéktestek képezik a szerves fázissal érintett térfogat zömét.

A 7. ábra kapcsán levonható másik fontos tanulság, hogy a szerves fázisú oldószerrel szennyezett területen körültekintően kell eljárni a mélyebb fúrásos feltárások tervezése, létesítése, a kármentesítési technológiák kiválasztása, valamint a kármentesítéstől elvárható környezetminőségi célkitűzések meghatározása során.

### 3. A KLÓROZOTT SZÉNHYDROGÉNEK MEGJELENÉSI FORMÁI A FELSZÍN ALATTI KÖRNYEZETBEN



7. ábra: Klórozott szénhidrogén elvi eloszlása heterogén törmelékes üledékben

Az elkülönülő szerves fázis cseppekből, erekből, összefüggő folyadéktestekből lassan oldódnak be a klórozott szénhidrogén vegyületek a felszín alatti vízbe és kialakul az oldott csóva. A klórozott oldószerek oldhatósága általában viszonylag alacsony, a felszín alatti víz szivárgási sebessége is kicsi, ezért természetes körülmények közt hosszú évtizedekig, egyes helyszíneken talán évszázadokig tarthat az önálló fázisú oldószerteljes beoldódása. A telítetlen zónában az elkülönülő szerves fázisból a gázfázisba (párolgás) vagy a pórusteret csak részlegesen kitöltő vízfázisba lép ki a klórozott szénhidrogén vegyület. Ez utóbbi a gravitáció hatására beszivároghat az összefüggő felszín alatti vízterbe. A klórozott szénhidrogén vegyületek gőznyomása viszonylag nagy, ezért az elkülönülő szerves fázis tartóssága a telítetlen zónában kisebb lehet, mint a vízzel telített zónában. A telítetlen zónában gyakran kerülnek azonosításra klórozott szénhidrogének gázfázisban és a szilárd szemcsékhez kötött formában, azonban a beszivárgás óta eltelt idő növekedésével egyre csökkenő koncentrációban. Az elkülönülő szerves fázis hiánya a telítetlen zónában nem jelenti azt, hogy ne érte volna el a vízszintet korábban.

A szerves fázis összefüggő folyadéktesteket is alkothat finomabb szemcsés törmelékes üledékes képződmények (agyag, iszap, homokliszt, finomhomok képződmények, vagy ezek keverékei) felett, a pórúsér nagyobbik része ilyenkor szerves fázissal telített. A víznél nagyobb sűrűségű elkülönülő szerves fázis („nehézfázis”) vastagsága egy szivárgáslassító réteg felett fordítottan arányos a szivárgáslassító átteresztőképességével, tehát agyag felett vastagabb lehet, mint egy iszapos finomhomok réteg felett. Az összefüggő folyadéktest vastagsága annál nagyobb, minél nagyobb a szerves fázis-víz közötti felüle-

ti feszültség, minél kisebb a szerves fázis sűrűsége, és minél kisebb a kapilláris ellenállás (szemcsemérettől függ). Az összefüggő szerves fázis folyadéktest viszonylag könnyen elmozdulhat a hidraulikus gradiens növekedése esetén, szemben a nem összefüggő cseppek, erek hálózatával. Fentiek miatt különös elővigyázatossággal kell eljárni a gócterületeken a mélyebb felszín alatti vizet megcsapoló fúrások, kutak tervezése és kivitelezése során, és ezért kell a tényfeltárás során követni a kívülről befelé haladás elvét.

Kísérleti eredményekből ismeretes, hogy a klórozott oldószer kis térfogatáramú, hosszú ideig tartó beszivárgása esetén valószínűbb az elkülönülő szerves fázis mélyebbre jutása, mint egyszeri, nagy hozamú betáplálás esetén.

Bonyolult feladat az elkülönülő szerves fázist tartalmazó gócterület horizontális kiterjedésének meghatározása. Az elkülönülő fázis tekervényes, szeszélyes beszivárgási útvonala és a szerves fázis fizikai jellemzői következtében kevéssé valószínű, hogy a jobb áteresztőképességű képződményekben elkülönülő fázist azonosítunk a hagyományos fúrások feltárások során. Általános tapasztalat, hogy a gócterületeken nem kerül azonosításra szerves fázis sem összefüggő folyadéktestként, sem cseppek, erek formájában. A szerves fázis jelenlétének valószínűsítéséhez bizonyítékok láncolatát használják egyes szakértők (*An illustrated handbook of DNAPL transport and fate in the subsurface; 2003; Environment Agency R&D Publication 133*).

A porózus földtani közegben a modell eredmények és tapasztalatok alapján 5-20 %-ra tehető a víznél nagyobb sűrűségű szerves fázis maradék telítettsége, amely cseppek, erek formájában van jelen. Ennek oka az, hogy nem minden pórusba képes behatolni a szerves fázis, és a nagyobb áteresztőképességű zónákon keresztül valószínűbb a szivárgása. Minél kisebb sűrűségű, nagyobb viszkozitású a szerves fázis, és minél nagyobb a szerves fázis és víz közti felületi feszültség, annál hajlamosabb a szerves fázis oldalirányú szétterülésre, azonban a bebocsátás helyétől általában nem terjed szét a szerves fázis néhány tíz vagy száz méternél távolabbra oldalirányban.

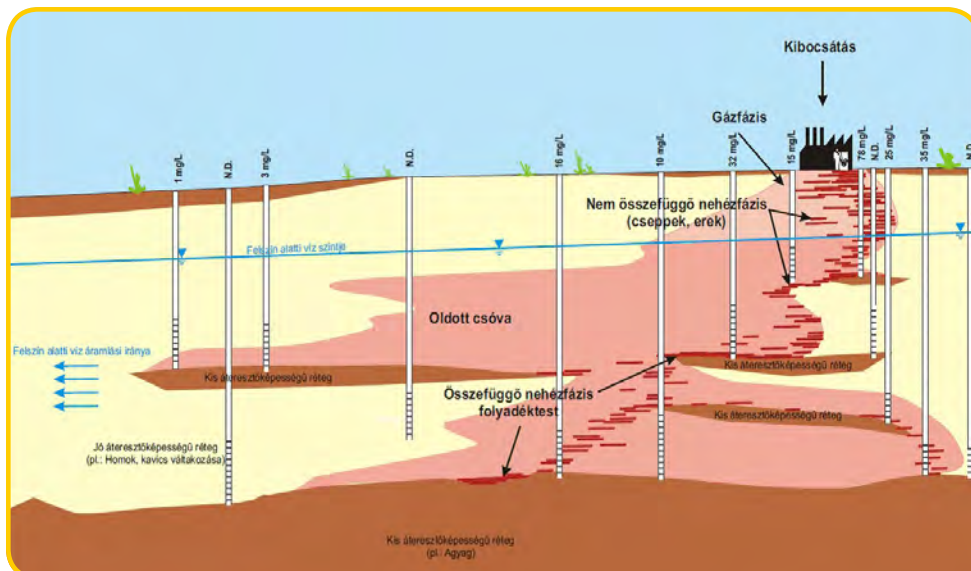
Az elkülönülő szerves fázis szeszélyes térbeli eloszlásának a következménye, hogy a belőle kilépő egyedi oldott csóvák zónájában a felszín alatti vízben oldott klórozott szénhidrogén koncentrációk térben igen változékonyak. Ezért fordulhat elő az, hogy a gócterülettől a felszín alatti víz szivárgási irányában haladva nem feltétlenül csökkenő koncentrációkkal találkozunk különböző mélységközöket megcsapoló kutakban (8. ábra).

Bár műszakilag megvalósítható a sűrű mintavétel a felszín alatti környezetből, azonban a góccok és a csóvák részletes, igen nagy felbontású feltárása nem szükséges a kármentesítés megalapozásához, és általában a rendelkezésre álló idő és anyagi források szűkössége miatt ez nem is lehetséges.

A tapasztalatok szerint a szerves fázis cseppeket és ereket tartalmazó gócterületeken található monitoring kutakból nyerhető vízminták szennyező anyag koncentrációi akár nagyságrendekkel kisebbek lehetnek, mint a megcsapolt térrész valamely pontjáról származó pontszerű vízminta szennyező anyag koncentrációja. A gócterülettől alvízi



### 3. A KLÓROZOTT SZÉNHYDROGÉNEK MEGJELÉSI FORMÁI A FELSZÍN ALATTI KÖRNYEZETBEN



8. ábra: Oldott klórozott szénhidrogén koncentrációk eloszlása monitoring kutakban

irányban, de még a gócterületeken sem fordul elő, hogy az adott klórozott szénhidrogén vegyület koncentrációja elérje a vízben jellemző oldhatóságot. Ez egyrészt a szennyezőanyag terjedés során bekövetkező diszperzió, másrészt a csóva magjától való eltérés, harmadrészt annak következménye, hogy a szűrőzött szakasz általában viszonylag hosszú, és nem csak az elkülönülő szerves fázis környezetéből kilépő erősen szennyezett vizet csapolja meg (hígulás).

Általánosan elfogadott ökol szabály, hogy ha a felszín alatti vízben mért koncentráció meghaladja az adott klórozott szénhidrogén effektív oldhatóságának 1 %-át, akkor felvízi irányban elkülönülő szerves fázis lehet jelen (US EPA, 1992). Természetesen a szerves fázis jelenlétét bizonyítékokra kell alapozni, de a fenti ökol szabály azért jó, mert körültekintésre int a fúrásos feltárások, kutak tervezése során.

Ha az elkülönülő szerves fázist több vegyület alkotja, akkor az egyes vegyületek vízben mért koncentrációja alacsonyabb lesz, mint oldhatósági koncentrációjuk egyedi vegyületként. A vegyületek „versenyeznek” az oldatba lépésért, Raoult-törvénye írja le az egyes vegyületek oldhatóságát többkomponensű fázisban, amely szerint egy alkotó vegyület effektív oldhatósága megegyezik a keverékben meglévő mólaránya és egyedi vegyületként való oldhatósága szorzatával:

$$C_i = m_i * S_i$$

ahol  $C_i$  az  $i$  jelű vegyület effektív oldhatósága,  
 $M_i$  az  $i$  jelű vegyület mólaránya a keverékben,  
 $S_i$  az  $i$  jelű vegyület oldhatósága vízben.

A fenti törvény egyik lényeges gyakorlati vonatkozása, hogy a legmagasabb effektív oldhatóságú vegyületek oldódnak ki először, ezek koncentrációja idővel csökken a göcök közelében. Ezzel egyidőben az egyre kisebb effektív oldhatóságú vegyületek koncentrációja egyre növekszik az idő előrehaladtával, míg a nagy effektív oldhatóságú vegyületek mólaránya csökken a szerves fázisban. A keverék szerves fázisból kilépő oldott anyagok összesített koncentrációja idővel csökkenni fog, mert az egyre kevésbé oldható vegyületek kezdenek kilépni nagyobb tömegárammal az elkülönülő fázisból. A göctől alvízi irányban mérhető összesített oldott szennyezőanyag koncentrációk csökkenése nem jelenti feltétlenül az elkülönülő szerves fázis hiányát, vagy elfogyását, mert az is előfordulhat, hogy bizonyos nagyobb effektív oldhatóságú vegyületek korábban már kioldódtak.

Raoult törvénye érvényét veszti, ha koszolvens, például kis molekulatömegű alkohol van jelen a szerves fázisban, és jelentősen megnő a klórozott szénhidrogének oldott koncentrációja a vízben való oldhatóságukhoz képest.

Repedezett kőzetekben is megjelenhet az elkülönülő szerves fázis folyadéktestként és cseppek, erek formájában is. A szerves fázis repedésbe való belépéshez szükséges nyomás egyenesen arányos a felületi feszültséggel, és fordítottan arányos a repedés, rés szélességével. Tehát valószínűbb az elkülönülő szerves fázis belépése a szélesebb résekbe, ezért a repedésrendszeren belül a szélesebb rések csapása és dőlése határozza meg az elkülönülő szerves fázis mozgásának irányát. Természetesen a repedésbe belépés valószínűsége nő a szerves fázis sűrűségének növekedésével.

Modellszámítások eredményei és a gyakorlat azt mutatják, hogy néhány vagy néhány tíz mikrométer széles vízzel telített résekbe képesek belépni a klórozott szénhidrogének elkülönülő fázisban és ott elmozdulni (a hajszál kb. 50 mikrométer vastag). Ebből következően fel kell készülni arra, hogy az elkülönülő szerves fázis repedezett kőzetekben a kibocsátás helyétől igen távolra is eljuthat.

A repedezett kőzetek szerves fázis visszatartó képessége általában kicsi, repedezettségből eredő porozitásuk 0,001-0,01 közötti tartományban valószínű. 200 liter beszivárgó szerves fázis 20 % átlagos telítettség esetén 100-1000 m<sup>3</sup> repedezett kőzetben képes elkülönülő szerves fázisként megjelenni, azaz viszonylag kis oldószermennyiség képes hatalmas kőzettérfogatokat elszennyezni. Ezért repedezett kőzetek, vízádók feletti göcsterületeken különös gondossággal kell megtervezni a fúrásos feltárásokat, nehogy maga a feltárás okozza mélyebb víztartók elszennyeződését.

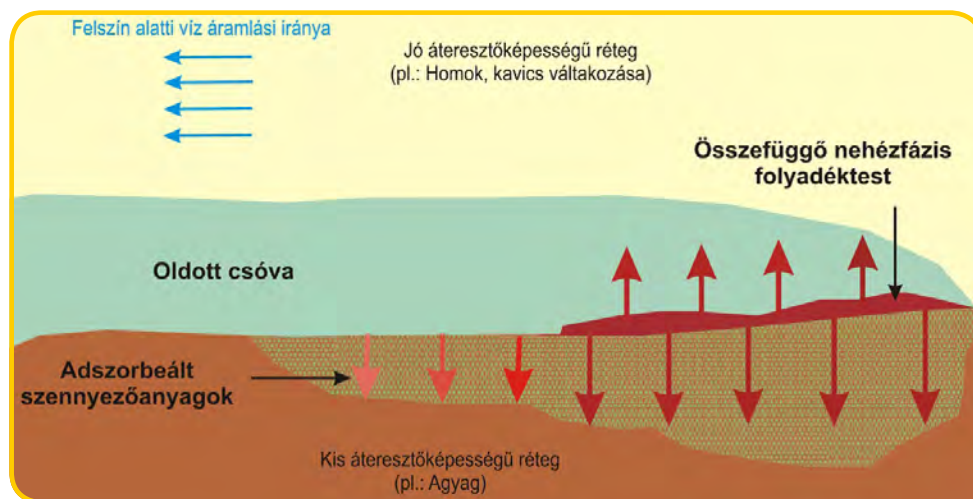
Hasonlóan a porózus képződményekhez a repedezett képződményekben is létrejönnek a felszín alatti vízben oldott, a kőzetbe diffundált, a repedés falán megkötött, valamint a telítetlen zónában gázfázisban jelenlévő szennyezési formák. A kőzetmátrixba diffúzió útján bejutott szennyező vegyületek a repedésrendszerben lévő víz megtisztulását követően a kis áteresztőképességű szemcsés laza üledékekhez hasonlóan hosszú ideig

### 3. A KLÓROZOTT SZÉNHIIDROGÉNEK MEGJELENÉSI FORMÁI A FELSZÍN ALATTI KÖRNYEZETBEN

képesek a repedésekbe diffúzió útján visszaoldódni a repedésrendszert kitöltő felszín alatti vízbe.

A földtani közeg heterogenitásának egyik következménye, hogy az elkülönülő szerves fázis inkább a nagyobb áteresztőképességű képződményekben fog mozogni, mert a kapilláris erők akadályozzák a belépését az alacsonyabb áteresztőképességű képződményekbe. A kis áteresztőképességű képződmények áteresztőképességét másodlagosan megnövelhetik a repedezettség, gyökérnyomok, állatok járatai is.

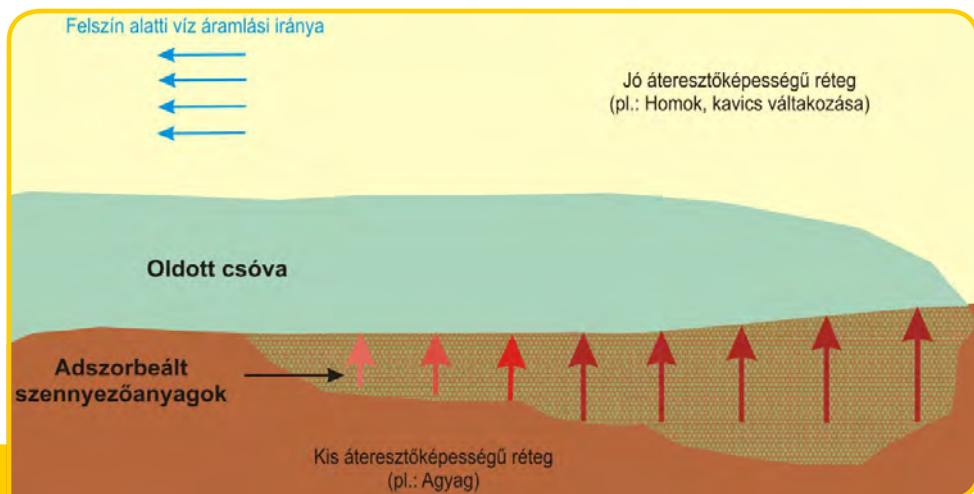
Az elkülönülő szerves fázisból idővel a felszín alatti vízbe és a talajgázba kilépnek az illékony vegyi anyagok, és a nagyobb áteresztőképességű képződményekben oldott csóva jön létre, valamint dúsulnak az illékony szennyezők a talajgázban. Ezzel egyidőben megkezdődik a szennyezett felszín alatti vízből és a talajgázból a szennyező anyagok diffúziója a kisebb áteresztőképességű képződményekbe a koncentráció különbségek kiegyenlítődése következtében (Fick-törvényei). Így a kis áteresztőképességű képződményekben is idővel létrejön az oldott és a szemcsék felületén vagy a szemcsék belsejében megkötődött (adszorbeált) szennyezettség (9. ábra).



9. ábra: Klórozott szénhidrogén fázisátmenet elkülönülő szerves fázisból oldott és adszorbeált fázisokba

Természetesen ez a jelenség nemcsak porózus, hanem repedezett képződményekben is végbemegy. Ennek a folyamatnak aztán jelentőségteljes és tartós következményei lesznek a klórozott szénhidrogénnel szennyezett felszín alatti víz és földtani közeg mentesíthetőségére. Hiába távolítható el viszonylag hamar a nagy áteresztőképességű képződményekből az oldott vagy talajgázban dúsult szennyező anyag, a kis áteresztőképességű képződményekbe diffúzió útján bejutott és megkötődött szennyezőanyagok hosszú időn keresztül képesek szintén diffúzió útján visszajutni a csökkent szennye-

zóanyag koncentrációjú, nagyobb átteresztőképességű képződményekbe (10. ábra), biztosítva így a szennyezettség tartós jelenlétét oldott és gáz fázisban.



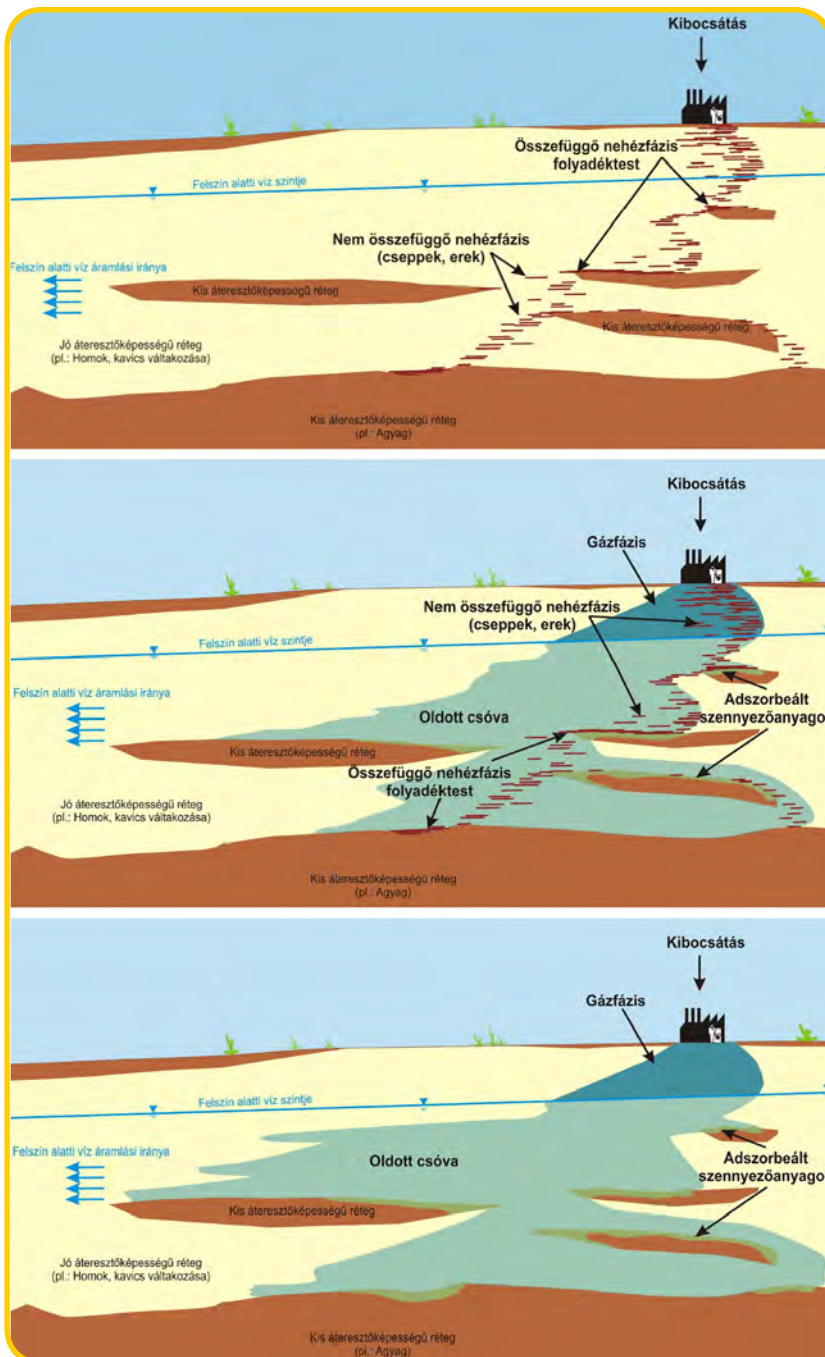
10. ábra: Klórozott szénhidrogén fázisátmenet adszorbeált fázisból oldott fázisba

A klórozott szénhidrogénnel szennyezett területeken várható, hogy idővel fogy az elkülönülő szerves fázis mennyisége, mert a klórozott szénhidrogének diffúzió útján belépnek a kis átteresztőképességű képződményekbe, ott megkötődnek, akumulálódnak, valamint beoldódnak a felszín alatti vízbe. Meg kell említeni, hogy még röviddel a szennyezést követően is rendkívül ritka, hogy a fúrásos feltárások során a furadékból, magmintában vagy a kutakban megjelenik az elkülönülő szerves fázis. Később ennek valószínűsége még inkább csökken, mert a diffúzió révén egyre inkább az alacsony átteresztőképességű képződményekben akumulálódik a szennyező anyag. A szennyezettség ilyen értelmű „előregedése” függ a felszín alatti környezetbe kibocsátott oldószeres térfogatától, az oldószer oldhatóságától, a szivárgási sebességtől, és az átteresztő-szivárgáslassító képződmények eloszlásától, vastagsági viszonyaitól.

A 11. ábra mutatja a szennyezettség fent leírt evolúcióját.

A szennyezőanyagok térbeli kiterjedéséről és eloszlásáról hagyományos fúrásos feltárások, mintavételek és kémiai analitikai eljárások segítségével nyert kép hiányos, mert általában csak pontszerű, vagy éppen integrált jellegű (pl. hosszan szűrőzött kutak) kémiai ismeretek gyűjtésére kerül sor. A hagyományos monitoring kutak elsősorban a nagyobb átteresztőképességű rétegek vízminőségéről szolgáltatnak ismereteket, és nem tájékoztatnak a kis átteresztőképességű képződményekben tározódó szennyezőanyagok koncentrációjáról, mennyiségéről, és nem adnak közvetlen ismereteket az önálló szerves fázis és gázfázis jelenlétéről, eloszlásáról.

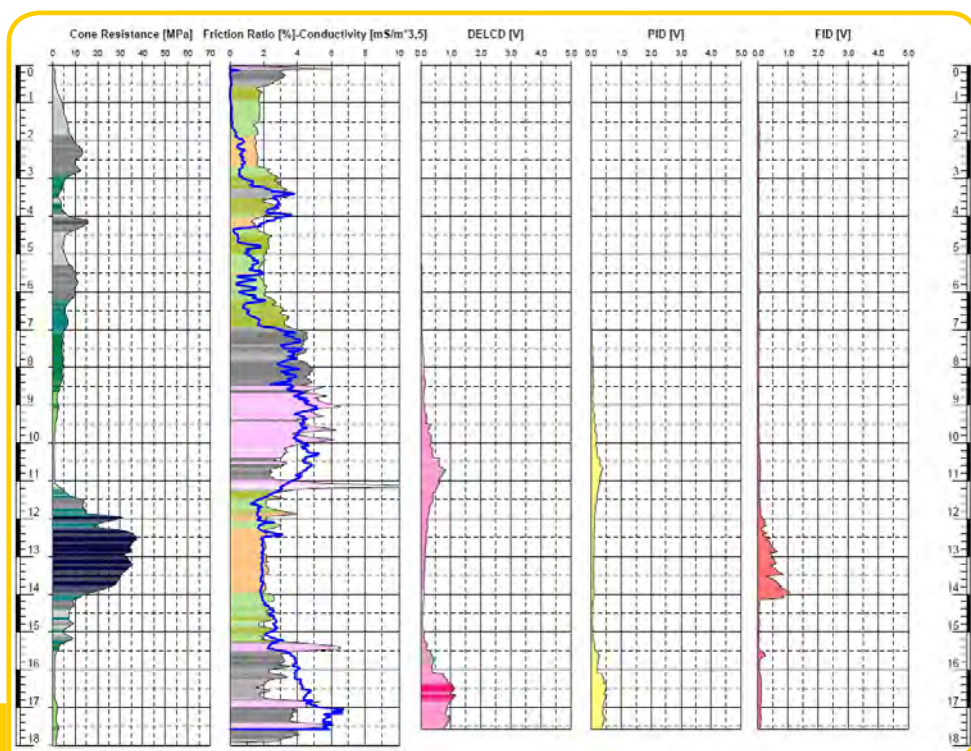
### 3. A KLÓROZOTT SZÉNHYDROGÉN MEGJELENÉSI FORMÁI A FELSZÍN ALATTI KÖRNYEZETBEN



11. ábra: Klórozott szénhidrogén szennyezettség fázisváltásai, fejlődése a felszín alatti környezetben

A felszín alatti víz kitermelése és kezelése, mint a szennyezettség gócterületein sok helyen alkalmazott kármentesítési eljárás gyakran sikertelen, a tényfeltárás során létesített monitoring kutakkal elsősorban a nagy átteresztőképességű rétegekből nyert vízkémiai ismeretekre alapozott műszaki beavatkozás általában nem célravezető belátható időtávon. Ennek fő oka, hogy csak a nagy átteresztőképességű rétegekben kimutatott oldott szennyezőanyagok koncentrációit vették figyelembe a tervezéskor, az egyéb fázisokban (elkülönülő szerves fázis, adszorbeált fázis, gázfázis) és az alacsony átteresztőképességű rétegekben tározódó szennyezőanyagok jelenlétével pedig nem számoltak.

A 12. ábrán látható in situ műszeres diagnosztikai regisztrátumon a klórozott szénhidrogének koncentrációjával arányos nagyságú DELCD és PID detektor jelek jól mutatják, hogy a klórozott szénhidrogének a kis átteresztőképességű agyagrétegben (rózsaszínnel és szürkével jelzett képződmények balról a második eredményoszlopban) koncentrálnak, és nem a jobb átteresztőképességű homok rétegekben (narancs és zöld színnel jelzett képződmények).



12 ábra: Klórozott szénhidrogének dúsulása szivárgáslassító képződményekben



## 4. A KLÓROZOTT SZÉNHIDROGÉNEK- KEL SZENNYEZETT TERÜLETEKEN SZERZETT EDDIGI TAPASZTALATOK ÖSSZEFOGLALÓ ISMERTETÉSE

### 4.1. Kevésé sikeres kármentesítések

A klórozott szénhidrogénnel szennyezett területeken végzett kármentesítések kevésé voltak sikeresek, ennek okai a következők:

- helytelenül megtervezett műszaki beavatkozások (pl szennyezett felszín alatti víz kitermelése, mint kármentesítési eljárás alkalmazása a göcökben, vagy a földtani közeg heterogenitásából fakadó bizonytalanságok figyelmen kívül hagyása a kármentesítés tervezése során)
- nem megfelelően alkalmazott kármentesítési technológiák
- téves elvárások az egyes kármentesítési technológiákkal szemben
- hiányos ismeret a göcsterületek térbeli kiterjedéséről és benne a szennyező anyagok eloszlásáról, továbbá annak figyelmen kívül hagyása, hogy a göcsterületek pontos és teljeskörű lehatárolása műszakilag korlátozott
- a kármentesítés során nyert tapasztalatokból a következtetések levonásának, és a kármentesítési technológia célszerű módosításának elmaradása
- csak igen hosszú időtávon elérhető kármentesítési célok kitűzése, ahelyett, hogy műszakilag megvalósítható, és a jelenleg meglévő technológiákkal rövidebb távon is elérhető célok kerültek volna kitűzésre.

Fenti hibák elkerülése érdekében az érdekelték (a szennyezett és a veszélyeztetett ingatlanok tulajdonosai, a területet használók, a hatóságok, a kármentesítést végzők, a tényfeltárást végzők, egyéb szakértők) közötti rendszeres egyeztetés során az alábbi tevékenységeket kell elvégezni több lépésben, folyamatosan iterálva:

- a probléma felismerése,
- kockázatok azonosítása,
- kezelési lehetőségek azonosítása,
- döntéshozatal,
- intézkedések,
- értékelés.

Az elmúlt években a klórozott szénhidrogénnel szennyezett területek feltárása és kármentesítése során szerzett tapasztalatok hozzásegítenek ahhoz, hogy okuljunk a múltbeli hibákból.

Az alábbi néhány példa jól szemlélteti, hogy a korábbi hibás felfogással szemben milyen új felfogás bizonyult igaznak:

- a szennyezett víztartók megtisztíthatók a szennyezett felszín alatti víz kitermelése révén - ezzel szemben azt tapasztaljuk, hogy lassú és sokszor csak átmeneti jellegű vízminőségjavulás érhető el ezzel a módszerrel, mert az elkülönülő szerves fázis és a kis áteresztőképességű képződményekben tározódó szennyező anyagok hosszú ideig képesek elszennyezni a felszín alatti vizet
- a klórozott oldószerek nem hajlamosak bomlásra – természetes úton és bizonyos művi környezetben képesek bomlani
- a korszerű technológiák alkalmazásával a gócterületek megtisztíthatók – a korszerű technológiák segítségével a gócterületeken tározódó szennyezőanyagok tömege nagymértékben csökkenthető, azonban ez nem mindig vezet a gócterület megtisztulásához, teljes felszámolásához
- a gócterületek kármentesítését követően a kockázatok elfogadható szintre csökkennek és a továbbiakban már nem kell költeni a szennyezett terület kármentesítésére – a gyakorlatban a góccezelés ellenére a gócs és a csóva területén egyaránt szennyezett marad a felszín alatti víz és a földtani közeg, ami még hosszú ideig komoly kiadásokkal jár
- a gócterületek felszámolása elengedhetetlen eleme a kármentesítésnek – nem minden esetben szükséges vagy ésszerű a gócterület felszámolása, mert a csóva trejedésének megakadályozása vagy a természetes koncentrációcsökkenés is megfelelő és költséghatékony kockázatsökkentő eszközök lehetnek
- a felszín alatti víz a legfontosabb szennyezett és ezért kezelendő környezeti elem – a szennyezett talajgáz sokszor nagyobb veszélyt jelent a hatásviselőkre, mint a szennyezett felszín alatti víz.

## 4.2. A szennyezett vízszint feletti részének fontossága

A klórozott szénhidrogének megjelenhetnek a vízszint felett a földtani közeg pórusaiban, repedéseiben gáz halmazállapotban, elkülönülő szerves fázisban, a talajszemcsékhez kötötten és oldott fázisban. A vízszint feletti környezetből képesek egyfelől beszivárogni vagy a gázfázis diffúziója útján bejutni az összefüggő felszín alatti vízbe, másfelől a gázfázisú szennyezők a talajgáz mozgásával (advekción) vagy diffúzió útján képesek kipárologni, és zárt terekben, épületekben felhalmozódni. Az illékony szennyezők kipárolgása magából a szennyezett felszín alatti vízből is történhet, nem csak a telítetlen zónából. A diffúziós együtthatók négy nagyságrenddel nagyobbak levegőben mint vízben. Ezért kis víztartalmú közegben a diffúzió révén rövid idő alatt nagy távolságokra eljuthat az illékony vegyi anyag, szemben a vízben történő diffúzióval.

A víztartalom növekedésével a gázfázisú szennyezők terjedése lelassul, mert a levegővel kitöltött pórustér csökkenésével a terjedési útvonalak hossza megnő (tortuozitás), és a pórusvízben is kezdenek dúsulni a szennyezők. Idővel beoldódhatnak a szennyezők a vízfázisba és megkötődhetnek a szilárd szemcsék felületén, létrehozva így a szennyezettesség további tartós forrásait, hasonlóképpen a diffúzió útján elszennyeződött vízszint alatti kis áteresztőképességű rétegekhez.

Matematikai összefüggésekkel megkísérrelhető a szennyezett felszín alatti környezet feletti zárt térben kialakuló szennyező anyag koncentrációk becslése, azonban ezek meg-



## 4. A KLÓROZOTT SZÉNHIIDROGÉNEKKEL SZENNYEZETT TERÜLETEKEN SZERZETT EDDIGI TAPASZTALATOK ÖSSZEFOGLALÓ ISMERTETÉSE

bízhatósága és érvényessége kérdéses. Ennek okai, hogy

- a felszín alatti és a felszín feletti környezetben időben és térben változékonyak a szennyező anyag koncentrációk az inhomogenitások és környezeti paraméterek változékonyága miatt
- természetes és emberi eredetű inhomogenitások (pl. bolygatott talaj a közművek környezetében) hatással vannak a szennyező anyagok terjedésére.
- az épületekben a klórozott szennyezők háttértértékei eleve emelkedettek lehetnek (háztartási vegyszerek, bútorok kipárolgásai, stb.), és ezért nehéz elkülöníteni a felszín alatti és felszín feletti forrásokból származó vegyi anyagokat.

### 4.3. A kis áteresztőképességű rétegek jelentősége

A kis áteresztőképességű képződményekben tárolt szennyezők hosszú ideig képesek elszennyezni a felszín alatti vizet. A kis áteresztőképességű képződményekben tárolt szennyezőanyagok mennyisége függ a kis és nagy áteresztőképességű képződmények térfogatának arányától, a szennyező anyag kémiai jellemzőitől és koncentrációjától, a szennyező anyag természetes bomlásának mértékétől, a vízszivárgás sebességétől, a szerves széntartalomtól, és a szennyezőanyag jelenlétének időtartamától a felszín alatti környezetben. A kis áteresztőképességű rétegekben tározódó szennyezőanyagok miatt olyan helyszíneken is tartósan fennmaradhat az oldott csóva, ahol nincs jelen elkülönülő szerves fázis. A góc tökéletes elszigetelése vagy felszámolása ellenére sokáig megmaradhat az oldott csóva, mert a csóva területén a kis áteresztőképességű rétegekből diffúzió útján belép a szennyező anyag a nagyobb áteresztőképességű rétegekbe.

Fenti jelenségek arra hívják fel a figyelmet, hogy nem elegendő felszámolni az elkülönülő szerves fázist vagy csak a nagy áteresztőképességű rétegekben tározódó oldott fázisú szennyezőket, hanem a kis áteresztőképességű rétegekben tárolt szennyezőanyagokkal és azok nagyobb áteresztőképességű rétegekbe történő visszajutásával is számolni kell.

### 4.4. Jelentős kihívás a gócterületek lehatárolása

Az esetek többségében a gócterületek lehatárolása nem történik meg vagy nem kielégítő pontosságú. Az elkülönülő szerves fázis és a szennyező anyag többi fázisa szeszélyes térbeli eloszlású, ezért komoly kihívást jelent elhelyezkedésük és kiterjedésük pontos meghatározása, térfogatuk, súlyuk számszerűsítése.

A több méter hosszan szűrőzött és nagy áteresztőképességű rétegeket megcsapoló monitoring kutak vízkémiai eredményei alapján nem állapítható meg, hogy milyen a megoszlás a szennyező anyag fázisai (elkülönülő szerves fázis, különféle áteresztőképességű rétegekben oldott vagy talajszemcsékhez kötött) között. A régebben történt szennyezéseknél a szennyező anyag többsége már oldatba mehetett, azonban általában nem vizsgálják a kis áteresztőképességű rétegek szennyezőanyag tartalmát, holott ezek tartós forrásai lehetnek az oldott csóvának.

Az elkülönülő szerves fázist tartalmazó góc és a csóva egymástól történő pontos elhatárolása nehéz, mert egyfelől igen szeszélyes lehet a cseppek erek rendszerének térbeli határa, másfelől nagy mennyiségű szennyező anyagot tárolhat a korábbi elkülönülő fázis kis áteresztőképességű környezete.



## 5. A FELTÁRÁSOK ESZKÖZTÁRA

### 5.1. Kúpbehatolási vizsgálat

A kúpbehatolási vizsgálat (CPT, cone penetration test) laza üledékek, talajok azonosítására a világ számos részén már évtizedek óta elfogadott és előszeretettel alkalmazott vizsgálati módszer. A főbb talajfizikai paraméterekről, és az ebből származtatható szemcseösszetételről folyamatos, gyors, megbízható és megismételhető mérési eredményeket szolgáltat és nem utolsósorban költséghatékony. A szondát elsősorban a geotechnikában, az alapozások tervezéséhez használják előszeretettel, azonban alkalmazása egyre elterjedtebb a környezetvédelemben is az utóbbi években. Jelen kiadványban természetesen a környezetvédelemben való alkalmazhatóság szempontjából adunk áttekintést a vizsgálati módszerről.

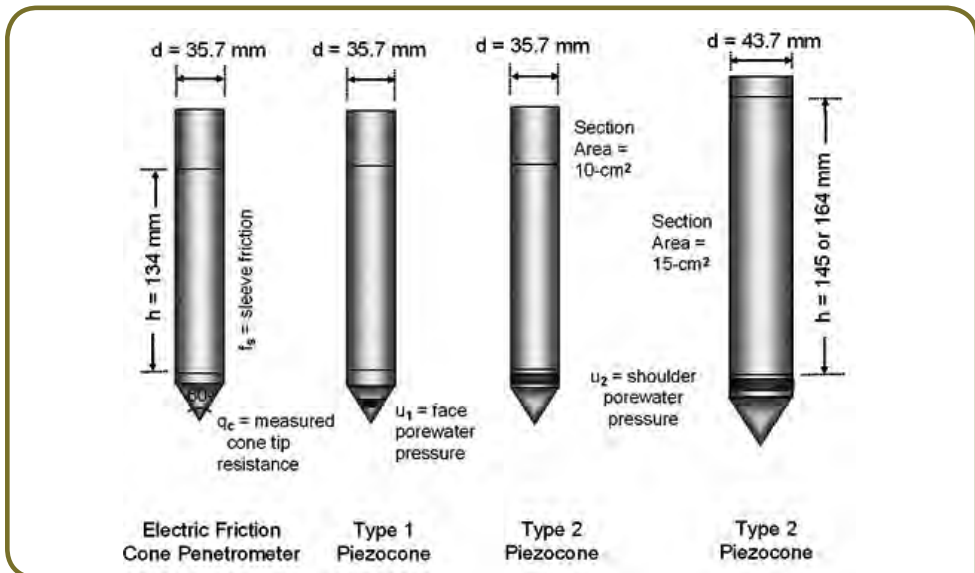
Az elektronikus CPT a szondafejbe épített nagy érzékenységgű erőmérő celláknak köszönhetően jóval pontosabb mérést tesz lehetővé a mechanikus szondához képest, és biztosítja a folyamatos mérés és regisztrálás lehetőségét. A 70-es évek közepén a szondákat alkalmassá tették a behatolás közbeni pórusvíznyomás mérésére is, melynek eredményeképpen a napjainkban használatos CPT szondák egyidejűleg három paraméter (csúcscellenállás  $q_c$ , palástsúrlódás  $f_s$ , behatolás közbeni pórusvíznyomás  $u$ ) mérését teszik lehetővé. A pórusvíznyomás mérésére használt szűrőket korábban a szondafej különböző részein helyezték el ( $u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_3$ ), mára azonban a szondacsúcs mögötti pórusvíznyomás mérés ( $u_2$ ) vált a leginkább elfogadott és javasolt megoldássá.

#### Szondafejek

A két leggyakrabban használt és egyben szabványosított típus a 35,7 mm ( $A=10 \text{ cm}^2$ ) és a 43,7 mm átmérőjű ( $A=15 \text{ cm}^2$ ) szondafej, melyek egyaránt egy  $60^\circ$ -os kúpszögű csúcsban végződnek. A  $10 \text{ cm}^2$  keresztmetszeti területű szondafej esetében  $A_s=150 \text{ cm}^2$  felületű paláston mérik a behatolás közbeni palástsúrlódást, míg a nagyobb,  $15 \text{ cm}^2$  keresztmetszeti területű szondafejhez  $A_s=200\text{-}300 \text{ cm}^2$  felületű palást tartozik (13. ábra). A pórusvíznyomás mérése leggyakrabban a szondacsúcs mögött elhelyezett szűrőelemeken keresztül történik, s az ebben a pozícióban mért pórusvíznyomást jelölik  $u_2$ -vel.

A geotechnikában inkább a kisebb átmérőjű ( $A=10 \text{ cm}^2$ ) szondafejet használják és a szakirodalomban fellelhető információk is főleg erre a típusra vonatkoznak, de a vi-

szonylagos robusztussága miatt a nagyobb szondafejet ( $A=15 \text{ cm}^2$ ) is egyre több cég alkalmazza. A nagyobb átmérőjű szonda alkalmazása mellett szól az is, hogy ennél a szondánál lehetőség van további érzékelőket beépíteni a fejbe, és nem szükséges külön sűrűdás-csökkentőt használni a szondafej után. A kiegészítő érzékelőkkel felszerelt CPT szondák (MIP, ROST, FFD, SMP, stb.) környezetvédelmi feladatokban való alkalmazása az utóbbi időkben nagy népszerűséget és elismertséget vívott ki magának, köszönhetően a gyors, megbízható és viszonylagosan olcsó eredményeknek, melyeket szolgáltatnak.



13 ábra: Különböző típusú CPT szondák méretei

### Mérés

A mérés során a szondafejet egy hidraulikus sajtó segítségével, állandó sebességgel ( $2,0 \text{ cm/sec}$ ) a talajba sajtolják, miközben mérik a szondacsúcsra adódó nyomást ( $q_c$ -csúcsellenállás), a paláston ébredő sűrűdést ( $f_s$ -palástsűrűdés) és a porózus szűrőgyűrűn keresztül átadódó pórúsvíznyomást ( $u$ -pórúsvíznyomás). Újabban a szondákba elhajlászó mérőket is beépítenek, így lehetőség van arra, hogy meghatározzuk a szonda lenyomása közben a függőlegestől való eltérés nagyságát is. Az elhajlás pontos irányát azonban csak azoknál a szondafejeknél tudjuk meghatározni, melyekbe kétirányú ( $x, y$ ) elhajlászó mérő van beépítve.

### Nyomógépek

A CPT szondázás elvégzéséhez mindenképpen szükség van egy hidraulikus nyomóberendezésre, mely lehet akár egy hagyományos fúróberendezés is, de sokkal gyakoribb a

kifejezetten erre a célra kifejlesztett eszközök alkalmazása. A kifejezetten CPT szondázásra használt nyomógépeknek nagyon sok változatát használják a szondázási igényektől, körülményektől függően. Alapvetően két csoportra oszthatók a nyomógépek:

Az egyik csoportba azok a gépek tartoznak, melyeket nem szükséges leborgonyozni (14. és 15. ábra) Ezeknél a berendezés önsúlya biztosítja a szonda lenyomásához szükséges ellensúlyt, mely általában 20 tonna, de léteznek 25 és 30 tonnás önjáró nyomógépek is.



14 ábra: 20 tonnás tehergépjárműre szerelt CPT mérőkocsi



15 ábra: Lánctalpas járműre szerelt CPT nyomógép

A másik csoportba azok a gépek tartoznak, melyeket le kell horgonyozni vagy csavarral rögzíteni (16. és 17. ábra). Ezeknél a berendezés viszonylag kis önsúlya nem teszi lehetővé, hogy horgonyzás nélkül el lehessen végezni a szondázást. Elvileg az ilyen típusú berendezések többsége is alkalmas a 20 tonnás terhelésre, azonban gyakorta előfordul, hogy a horgonyok kihúzódása miatt már kisebb terhelés mellett abba kell hagyni a mérést.



16 ábra: Lánctalpas járműre szerelt, horgonyos CPT nyomógép

### Mélység

A nagy önsúlyal rendelkező CPT nyomógépek akár 100 m mélységig is lehetővé teszik a szondázást puha képződményekben. Hazánkban készült már 60 m mély szondázás a Tisza árterén. Az elérhető mélységet lehet fokozni a szondarudazat súrlódásának csökkentésével, melyre ún. súrlódáscsökkentőket szoktak használni. Ezek a szondafej mögött elhelyezett, a szondarudazatnál nagyobb átmérőjű egységek, melyek a le-



17 ábra: Hordozható CPT nyomógép

nyomáskor a szondarudazatnál nagyobb átmérőjű üreget alakítanak ki a földtani közegben, ezáltal nagyban csökkentve a talajföldtani közeg és a rudazat között ébredő súrlódási ellenállást.

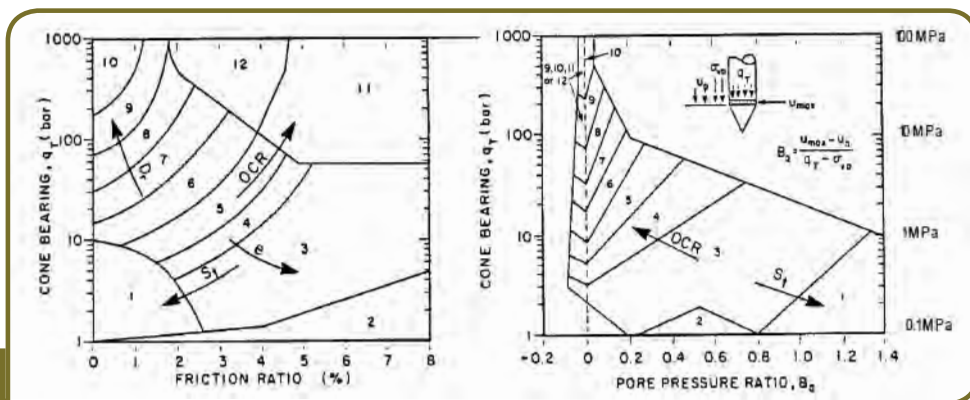
Általánosságban elmondható, hogy a CPT szonda csak laza törmelékes üledékekben (agyag, homok, iszap, apró kavics, esetleg finomszemcsés, nem diagenizált vulkanoklasztit) használható. Egy erősen cementált homok vagy túlkonzolidált agyagréteg, nem beszélve a durva kavicsról a szonda számára áthatolhatatlan akadályt képeznek. Tömörebb, keményebb képződményekben általában a nagyobb ( $A=15 \text{ cm}^2$ ) szondafejlet részesítik előnyben annak robusztussága miatt.

### Földtani képződmények, rétegződés

A statikus kúpbehatólási vizsgálat tökéletes módszer a laza törmelékes üledékek részletes megismeréséhez, a sűrű mérési adatoknak köszönhetően még az esetleg néhány centiméter vastagságú rétegek is pontosan azonosíthatók. A CPT szonda alkalmas a földtani közeg szemcseösszetétel szerinti típusainak (agyag, iszap, homok, kavics, szerves üledék) közelítő meghatározására is, melyre a szakirodalomban számos módszert lehet fellelni. Általános ajánlásként fogalmazható meg, hogy a CPT szondázások mellett készüljön legalább egy magfúrás is, melynek rétegsorát fel lehet használni a CPT szondák által meghatározott rétegsor kalibrációjára. Ökölszabályként elmondható:

- a kötött képződmények (agyag, iszap) csúcscellenállása ( $q_c$ )  $< 5 \text{ MPa}$ , súrlódási arányszám ( $R_f = \text{palástsúrlódás/csúcscellenállás}$ )  $> 2\%$  és a behatolás közbeni pórusvíznyomás értéke ( $u_2$ )  $>$  nyugalmi pórusvíznyomás ( $u_0$ ).
- szemcsés képződmények (homok, kavics) csúcscellenállása ( $q_c$ )  $> 5 \text{ MPa}$ , súrlódási arányszám ( $R_f = \text{palástsúrlódás/csúcscellenállás}$ )  $< 2\%$  és a behatolás közbeni pórusvíznyomás értéke ( $u_2$ )  $\cong$  nyugalmi pórusvíznyomás ( $u_0$ ).

A két leggyakrabban használt laza üledéktípus azonosítási módszer Robertson nevéhez fűződik Robertson et al. (1986) és Robertson (1990).



18 ábra: Laza üledékek osztályozása Robertson et al. (1986)

Robertson (1986) a 18. ábra grafikonján ábrázolt tartományokhoz az alábbi képződménytípusokat rendelte:

- |                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| 1 - érzékeny, finomszemcsés talaj | 8 - iszapos homok-homok                                 |
| 2 - szerves talaj                 | 9 - homok   |
| 3 - agyag                         | 10 - homok-kavicsos homok                               |
| 4 - agyag-iszapos agyag           | 11 - nagyon merev finomszemcsés talaj                   |
| 5 - iszapos agyag-agyagos iszap   | 12 - túlkonzolidált vagy cementált homok, agyagos homok |
| 6 - agyagos iszap-homokos iszap   |   |
| 7 - homokos iszap-iszapos homok   |   |

Robertson volt az első, aki a pórusvíznyomás mérés eredményeit is hasznosította a talajtípusok meghatározására. Elsőként vezette be a korrigált csúcsellenállás ( $q_t$ ) fogalmát:

$$q_t = q_c + u_2 \cdot (1 - a)$$

- ahol,  $q_c$  = mért csúcsellenállás  
 $u_2$  = behatolás közben a csúcs mögött mért pórusvíznyomás  
 $a$  = a szondafejre jellemző alakú tényező, melyet a szondafej gyártójának meg kell adnia

Szintén ő volt az első, aki bevezette a pórusvíznyomás hányadost ( $B_q$ ):

$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_v}$$

- ahol,  $u_2$  = behatolás közben a csúcs mögött mért pórusvíznyomás  
 $u_0$  = in-situ pórusvíznyomás  
 $q_t$  = korrigált csúcsellenállás  
 $\sigma_v$  = teljes geosztatikus feszültség

Robertson 1990-ben a csúcsellenállás és a súrlódási hányados normalizálásával továbbfejlesztette a korábbi talajosztályozási grafikonját.

A normalizált csúcsellenállás ( $q_{cnorm}$ ) kiszámítására az alábbi összefüggést alkotta:

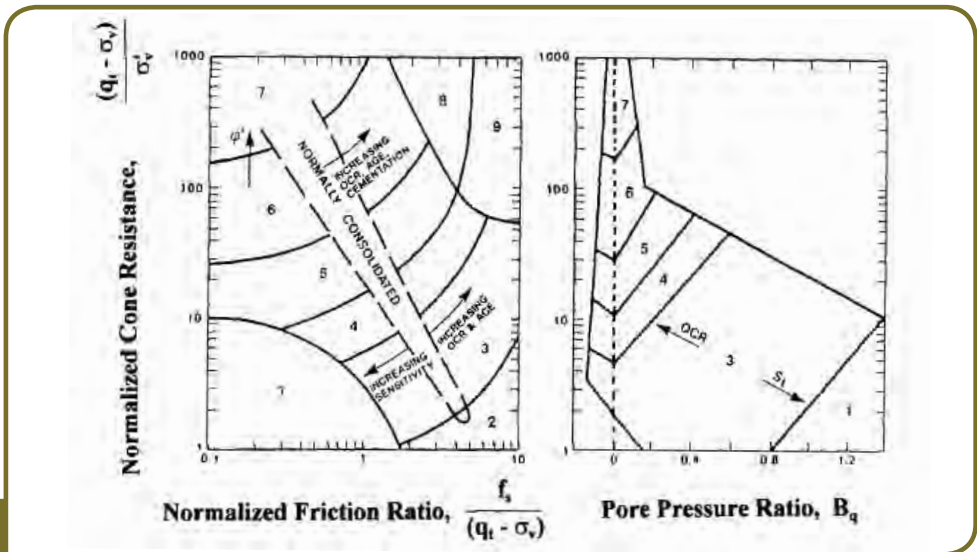
$$q_{cnorm} = \frac{q_t - \sigma_v'}{\sigma_v}$$

- ahol  $q_t$  = korrigált csúcsellenállás  
 $\sigma_v'$  = hatékony geosztatikus feszültség  
 $\sigma_v$  = teljes geosztatikus feszültség

A normalizált sűrűlési hányadost a palástsűrűlés és a nettó csúcsellenállás ( $q_t - \sigma_v$ ) hányadosaként definiálta:

$$R_{f_{norm}} = \frac{f_s}{q_t - \sigma_v}$$

ahol  $f_s$  = mért palástsűrűlés  
 $q_t$  = korrigált csúcsellenállás  
 $\sigma_v$  = teljes geosztatikus feszültség



19 ábra: Laza üledékek osztályozása Robertson et al. (1990)

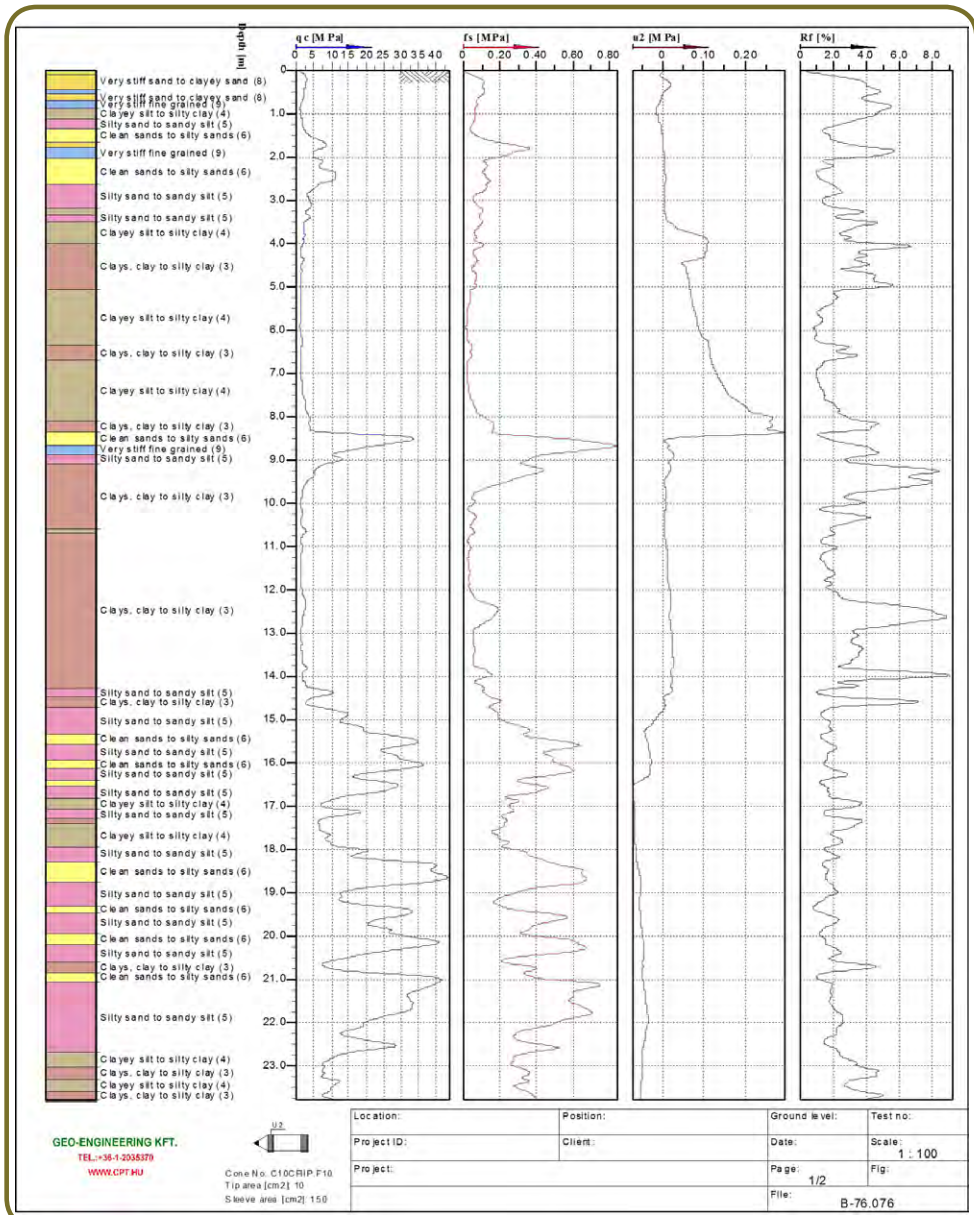
Robertson (1990) a 19. ábra grafikonján ábrázolt tartományokhoz az alábbi talajtípusokat rendelte:

- |   |  |
|---|--|
| 1 - érzékeny, finomszemcsés talaj                 | 6 - homok (iszapos homok-homok)                                      |
| 2 - szerves talaj és tőzeg                        | 7 - homok-kavicsos homok   |
| 3 - agyagok (agyag-iszapos agyag)                 | 8 - homok-nagyon merev homok   |
| 4 - iszap keverékek (iszapos agyag-agyagos iszap) | 9 - nagyon merev, finomszemcsés, túlkonzolidált vagy cementált talaj |
| 5 - homok keverékek (homokos iszap-iszapos homok) |  |

A szakirodalomban Robertson előbbiekben ismertetett módszerein kívül, mint azt korábban említettük számos más osztályozási eljárás is megtalálható.

A 20. ábrán egy kúpbehatolási vizsgálat szokványos eredményközlő lapja található, amelynek bal oldalán a valószínűsíthető földtani rétegsor is szerepel.





20 ábra: Kúpbehatolási vizsgálat eredményközlő lapja Robertson (1986) féle azonosításon alapuló rétegsorral

## 5.2. Korszerű in situ műszeres vizsgálatok

Az alábbiakban ismertetett feltárási-vizsgálati módszer a klórozott szénhidrogének in situ, szemi-kvantitatív, valós idejű feltárására is alkalmas.

A módszer előnyös tulajdonsága, hogy a földtani felépítés, a klórozott szénhidrogén típusú szennyező anyagok vizsgálata, és az eredmények megjelenítése egy lépésben történik, míg a hagyományos tényfeltárás során a fúrás, a mintavétel, a minták kémiai analitikai vizsgálata és az eredmények megjelenítése elkülönülő munkafázisok.

Az alábbiakban röviden bemutatjuk a MIP diagnosztika főbb elemeit, jellemzőit és a várható eredmények jellegét.

A korszerű diagnosztikát általában önjáró járműre szerelt statikus kúpbehatolási vizsgálatra (CPT) alkalmas berendezéssel végzik (21. ábra).

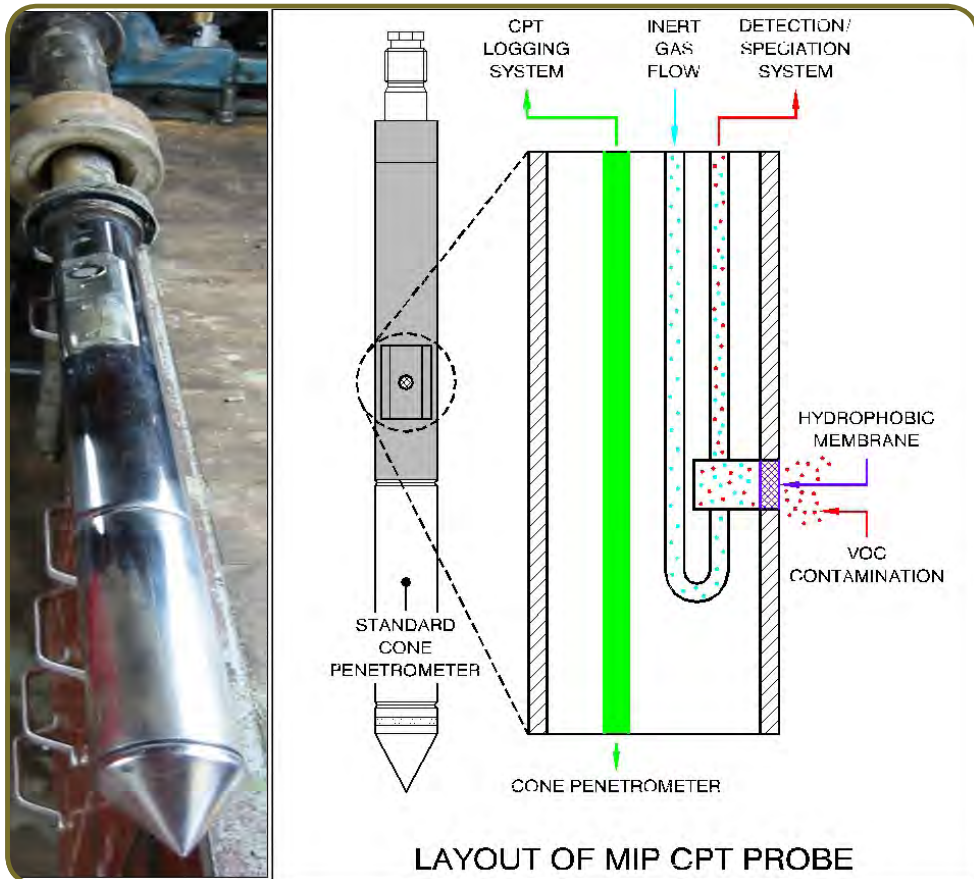


21 ábra: CPT-MIP vizsgálatokat végző tehergépjármű

A mérőfejek és a mintavételi eszközök felszín alá juttatása statikus lesajtolással történik. A szondázó berendezés főbb elemei az alábbiak:

- CPT szonda a palástsúrlódás és csúcsnyomás méréséhez,
- inklinométer, amely a függőlegestől történő elhajlási szöget méri
- pórusnyomás érzékelő,
- MIP (Membrane Interface Probe) szonda DELCD, PID és FID detektorokkal, amely egyes szerves vegyi anyagok szemikvantitatív észlelésére alkalmas felszín alatti környezetben
- elektromos vezetőképesség mérésére alkalmas szonda (EC), amely a MIP szondával összeépíthető.

A regisztrátumok nyomon követése a szondázás folyamán a berendezésekkel összekötésben lévő számítógép képernyőjén lehetséges.



22 ábra: CPT-MIP szonda felépítése és működési elve

A MIP mérőrendszer felszín alatti része (22. ábra) a CPT szondafej felett elhelyezkedő 100-120 °C-ra felfűthető fém betétet és egy féligáteresztő membránt tartalmazó részből, a szondához kapcsolódó rudazatból, a rudazatban húzódó elektromos kábelekből, és egy kapilláris csőből áll. A felfűtött szondarész környezetében gáz halmazállapotba kerülő illékony szénhidrogének a membránon keresztül a rudazatban lévő vékony kapilláris nitrogén gázáramába kerülve a hordozó tehergépjármű zárt rakterébe telepített érzékelőkbe jutnak. A PID (10.6 eV), FID, DELCD detektorok jelei alapján az illékony szerves szennyezők koncentrációja megfelelő kalibrálást követően szemikvantitatív módon megadható. A CPT-MIP vizsgálatok során a mérőfej és a hozzá csatlakoztatott rudazat statikusan kerül lesajtolásra a felszín alatti környezetbe, és közben az érzékelők mérik a felszín alatti környezet elektromos vezetőképességét, a MIP rendszer felszíni detektorai mérik a felszín alatti illékony szerves szennyezők koncentrációjával arányos jeleket, továbbá a hagyományos CPT rendszer által szolgáltatott csúcscellenállás, palást-sűrűlőds és pórusvíznyomás értékeket.

A 3. táblázat a MIP rendszer detektorainak viszonylagos érzékenységét mutatja különböző vegyületek esetén (a - és + jelek az érzékenység mértékét szemléltetik a nem érzékenytől (-) a nagyon érzékeny kategóriáig (+++)).

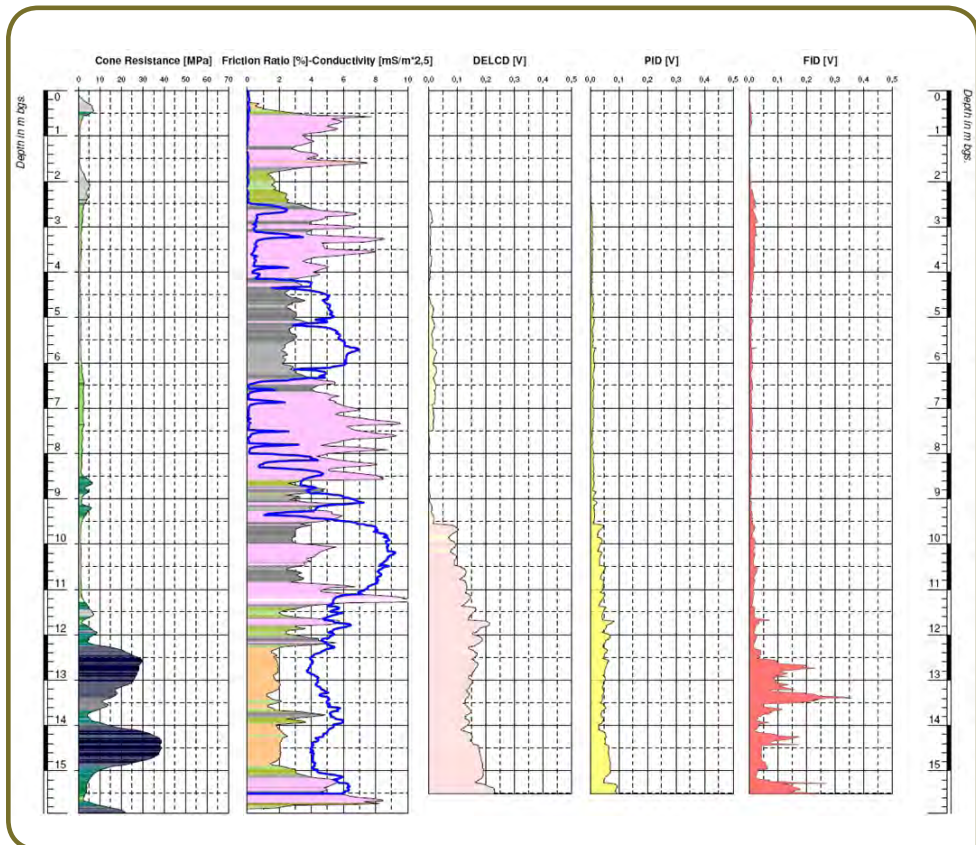
| Komponens               | PID | FID | DELCD |
|-------------------------|-----|-----|-------|
| Tetraklór-etilén        | +++ | -/+ | +++   |
| Triklór-etilén          | +++ | -/+ | ++    |
| cisz-1, 2-diklór-etilén | ++  | -/+ | +     |
| transz-1,2-diklóretilén | ++  | -/+ | +     |
| Vinilklorid             | +   | -/+ | +     |
| Triklóretán             | -   | -/+ | ++    |
| Benzol                  | +++ | ++  | -     |
| Toluol                  | +++ | ++  | -     |
| Xilolok                 | +++ | ++  | -     |

3. táblázat: MIP detektorok viszonylagos érzékenysége egyes szerves vegyületekre

A fenti módszerrel csaknem folyamatos ismeret nyerhető számos szerves vegyület szemikvantitatív eloszlásáról a felszín alatti környezetben. A DELCD detektor kimonddottan a klórozott szénhidrogénekre érzékeny, de a PID detektor is ad jelet klórozott etilének esetén, (klórozott etánok és metánok esetén nem).

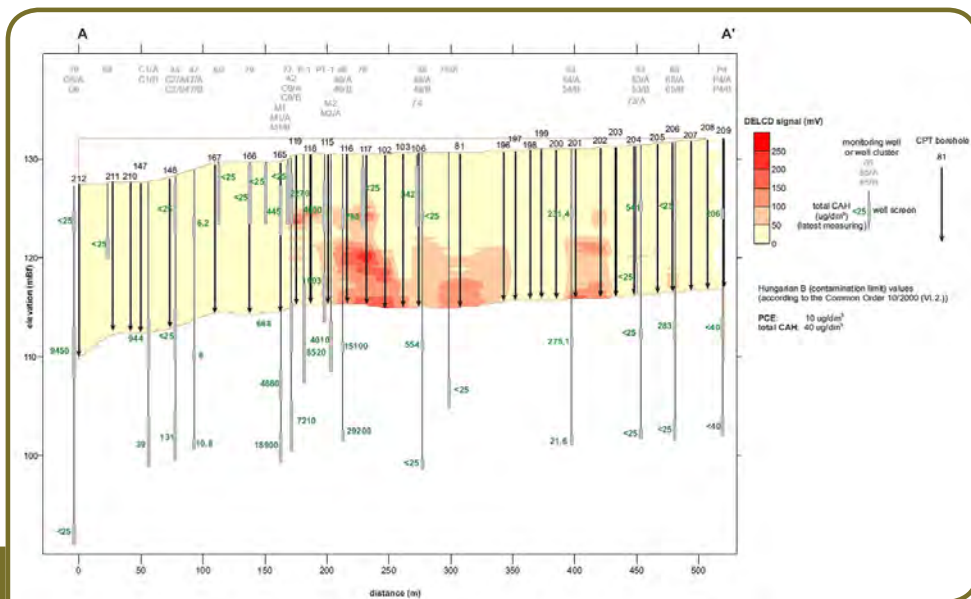
Szem előtt kell tartani, hogy a MIP mérőrendszer által szolgáltatott jelek a felszín alatti környezetben tározódó, a detektorok által mérhető illékony szennyező anyagok összesített koncentrációjával arányos jeleket fog adni, azaz az elkülönülő szerves fázis, oldott fázis, a szilárd szemcséken megkötött szennyezőanyagok és a talajgázban lévő

szennyezőanyagok együttes koncentrációját fogja tükrözni a detektorok jele. A voltban mért detektorjelek közelítő megfeleltetése oldott szennyezőanyag koncentrációknak körültekintést igényel, ehhez a felszín alatti vízből és földtani közegből vett pontszerű minták kémiai analitikai vizsgálati eredményei szükségesek.

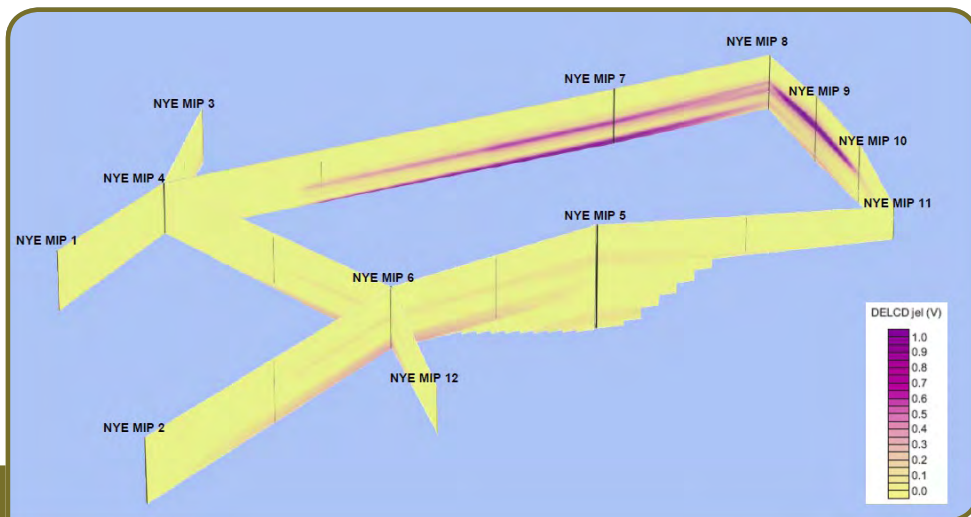


23 ábra: CPT-MIP vizsgálatok eredményközlő lapja

A CPT-MIP diagnosztika során nyert mérési eredmények (23. ábra) 2D (24. ábra) vagy kvázi 3D (25. ábra) ábrázolása jelentősen megkönnyíti az eredmények értelmezését.



24 ábra: CPT-MIP vizsgálatok és monitoring kutakból vett vízminták eredményeinek együttes szelvénymenti ábrázolása



25 ábra: CPT-MIP vizsgálatok eredményeinek ábrázolása kerítésszelvényen

A CPT-MIP diagnosztika objektív, közetfizikai paramétereiből számított nagy felbontású képet ad a földtani felépítésről, és egyes illékony szennyezőanyagok eloszlásáról is.

A fent részletezett feltérési-vizsgálati módszer előnyei az alábbiak:

- a szennyezettség ténye és közelítő mértéke már a szondázás során ismertté válik, a mérőberendezéshez csatlakoztatott számítógép képernyőjén megjeleníthető, ennek ismeretében a tényfeltérési program szükség szerint módosítható
- a terepi és laboratóriumi tényfeltérési munkák időtartama nagyságrendileg lerövidül
- az előírt kritériumrendszernek meg nem felelő környezetminőségi paraméterek esetén (pl. elkülönülő szerves fázis jelenlétére utaló extrém jel) a szondázás leállítható, ezzel elkerülhető a víznél nehezebb szennyezőanyag fázisok átfertődése mélyebb víztartókba
- rövidebb ideig szükséges a terepi személyzet jelenléte, lerövidül a területhasználat időtartama, ami költségmegtakarítást eredményezhet
- nem keletkezik hulladék, veszélyes hulladék (szennyezett furadék, felszín alatti víz, mintavételhez szükséges egyszer használatos eszközök, öblítővíz, stb.) a diagnosztika során, ezek kezeléséről nem kell gondoskodni.

### 5.3. Mintavételi eljárások

#### 5.3.1. Hagyományos fúrásos feltérások és mintavételi eljárások

A környezetvédelemi célú fúrásos feltérások célja reprezentatív minták begyűjtése vizsgálati célokra, továbbá a furatok kiképzése a többszöri mintavétel biztosítására alkalmas monitoring kutakká.

A környezetvédelmi célú fúrásos feltérások típusait részletesen a Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium által 2004-ben kiadott OKKP Kármentesítési Útmutató 6. kötet (Tényfeltérési és monitoring) tartalmazza, ezért itt csak röviden mutatjuk be a főbb fúrási és mintavételi eljárásokat.

A környezetvédelmi célú fúrásos feltérások laza törmelékes üledékekben általában száraz fúrási eljárással létesülnek, konszolidált képződményekben (mélységi magmás kőzetek, vulkanitok, metamorf képződmények, diagenizált üledékek) iszap-, víz-, hab- vagy légöblítéses eljárással, illetve újabban nagyenergiájú szónikus fúrással.

A főbb száraz fúrási eljárások az alábbiak:

- Vert talajszondázás
- Fúrás forgatott és lesajtol rudazattal különféle fúrószerszámokkal (dob, kanál, spirál, speciális magmintavevők) védőcső alkalmazása mellett vagy anélkül.
- Belül üreges spirál (Hollow Stem Auger-HSA) alkalmazása, fúrás előrehaladása teljes szelvényvel, vagy az üregből indított mintavétel speciális magmintavevőkkel, spirállal

- Fúrás lábszelepes hengerrel védőcső alkalmazása mellett vagy anélkül. Ez általában durvaszemcsés kohézió nélküli képződmények (kavics, homokos kavics, görgeteg) esetén lehet szükséges és célravezető.
- Szónikus fúrás.

A fúrasi eljárást és a fúrószerszámokat a földtani közeg szilárdságától, állékonyságától, a fúrás mélységétől, és a mintavétellel szemben támasztott igényektől függően választják meg.

A minta vétele a mintavevő eszközökből (spirál, kanál, dob, mintavevő henger) közvetlenül történik. A minták két alapvető típusa a pontszerű és az átlagminta.

Erősen szennyezett réteg harántolásánál a mélyebb rétegek elszennyeződésének elkerülése végett védőcső használata, bizonyos esetekben sarucementezés, palástcementezés szükséges.

Általános elvárás a fúrásos feltárásokkal szemben, hogy reprezentatív mintát szolgáltatson mind a földtani jellemzők leírásához, mind a mintavételezéshez.

Számos mintavételi eljárás során kevéssé biztosítható a minták reprezentativitása, különösen, ha a mintavételre szánt földtani képződmény keveredhet a felette lévő földtani képződményekkel és a felette lévő felszín alatti vízzel.

Növeli a minta reprezentativitásának mértékét a védőcső (cső, vagy belül üreges spirál) alkalmazása. Laza, kevéssé állékony üledékes képződményekben védőcsővel kell megtámasztani a furat falát, mert egyébként a fúróluk fala a szerszám kivétele után összezárul.

A talajvíz alatti rétegvízartó összletek feltárása és vizsgálata azzal a veszéllyel járhat, hogy a víztartók összenyitásával a szennyező anyag átjuthat addig szennyezetlen víztartókba is, ezért ennek megfelelő műszaki védelem mellett szabad mélyebb víztartókba fúrni. Amennyiben a mélyebb víztartók szennyezettségének megalapozott a gyanúja, akkor indokolt lehet azok feltárása is. A talajvíz alatti mélyebb víztartók feltárását a környezetvédelmi hatósággal egyeztetett módon, a szennyezett talajvíz kizárását biztosító fúrasi technológia alkalmazásával kell elvégezni. A mélyebb víztartókat feltáró fúrás(oka)t lehetőleg a talajvíztartó összletben jelenlévő szennyezettség horizontális elterjedésének kontúrján kívül, vagy a szennyezettség feltételezett gócn kívül kell kitűzni, csökkentve ezzel a víznél nagyobb sűrűségű szerves fázisok mélyebb víztartókba jutásának esélyét.

### 5.3.2. Egyszeri pontmintavételi eljárások

Az ebben a fejezetben szereplő eszközök és eljárások lehetővé teszik az egyszeri tetszőleges mélységből történő mintavételezést ideiglenes vagy állandó monitoring kutak kialakítása nélkül.

Az egyszeri mintavevők előnye az állandó monitoring kutakkal szemben, hogy gyors és olcsó mélységszelektív mintavételezést tesznek lehetővé. Az eljárás hátránya, hogy csak



egyszeri mintavételezést tesz lehetővé, és nincs lehetőség folyadékszintek meghatározására, mely utóbbi elengedhetetlen a hatékony műszaki beavatkozás és monitoring tevékenység megtervezéséhez. Ezért ha az adott helyen újabb mintavételek, mérések elvégzése válik szükségessé (pl.: a műszaki beavatkozás hatékonyságának ellenőrzésére), újra mobilizálni kell a mintavevő berendezést és a kezelő személyzetet, ami költségnövelő.

### 5.3.2.1. GeoNordic gáz- és vízmintavételi módszer

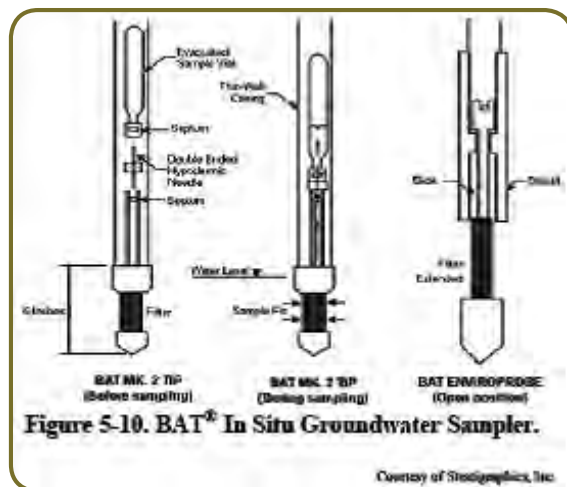
A GeoNordic (korábbi neve BAT) vízmintavételi eljárás (26. ábra) kvázi pontszerű reprezentatív vízmintavételt tesz lehetővé a felszín alatti környezetből folyadék- és gázfázisból.

A mintavevő eszköz statikusan vagy dinamikusan kerül lesajtolásra a kívánt mélységbe, majd a rudazat 0,3 m hosszon történő visszahúzását követően a szonda 20 µm résszel ellátott 10 cm hosszú szakasza érintkezésbe kerül a felszín alatti folyadékkal vagy gázzal.

Ezt követően a rudazatban leeresztésre kerül a vákuumozott szeptumzárású mintavételi üveg. Az üveg és a szonda réselt szakaszát lezáró szeptum között az üveg megfelelő pozícióba juttatását követően egy tűn keresztül préselődik be a formációból a folyadék vagy gáz a mintavételi üvegbe, kizárva a felszín alatti rendszer és a mintatartó rendszere közti egyéb rendszerekkel történő érintkezést.

A mintavételi üveg visszahúzását követően a minta vizsgálatra kész.

Előnye, hogy nincs szükség a felszín alatti víz szivattyúzására, és nem keletkeznek a hagyományos vízmintavételnél szokásos hulladékok. Hátránya, hogy viszonylag kis mintamennyiség nyerhető (legfeljebb néhány 100 ml), és a mintavételi mélység pontos meghatározásához egyéb előzetes feltárások is szükségesek (CPT, hagyományos fúrás).



26 ábra: GeoNordic (BAT) mintavételi eljárás

### 5.3.2.2. ConeSipper vízmintavételi módszer

A ConeSipper nevű mintavételi eszköz gázkiszorításos elven működő vízmintavételt tesz lehetővé meghatározott mélységből. Két fő egységből áll (27. ábra), az egyik a mintavevő szondafej, melyet rendszerint CPT nyomógéppel sajtolnak a felszín alá. A mintavevő szondafej akár egy CPT szondával (ill. egyéb más szondákkal) is összeépíthető, így akár CPT szondázás közben is lehetőség van mintavételre diszkrét mélységekből vízből vagy talajgázból. A másik fő egység az úgynevezett controller, melyet két 1/8" belső átmérőjű Teflon® cső köt össze a mintavevő szondafejvel. A controllerrel a felszínről irányítható a mintavétel folyamata úgy, hogy a mintavevő szondában lévő vízmintát gáznyomás segítségével juttatják a felszínre.



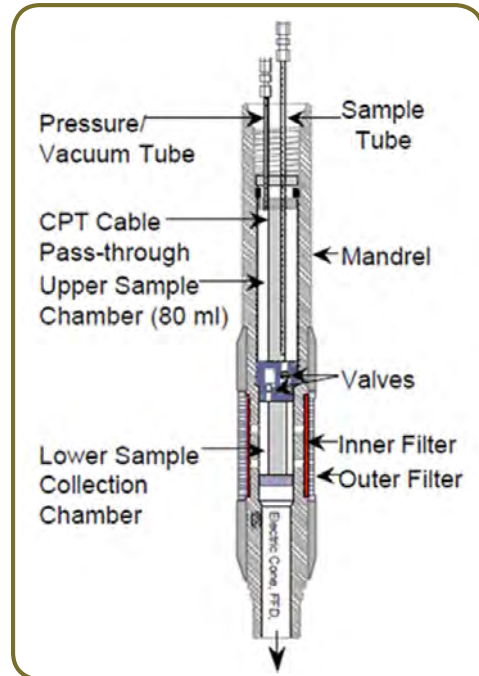
27 ábra: ConeSipper® szondafej és vezérlőegység

A vízmintavevő (28. ábra) szakaszosan működik. A kívánt mintázási mélység elérése után meg kell várni, míg a kettős szűrőn beszivárgó víz telíti a mintavevő szonda alsó kamráját, melyből a víz egy golyós szelepen keresztül a felette lévő felső kamrába jut. Ez a réteg vízáradó képességétől függően néhány perctől akár több óráig is eltarthat. Rendszerint a rétegben uralkodó víznyomás elegendő a vízmintának a mintavevőbe való bejutásához, de szükség esetén vákuummal fokozható a beáramlás. Illékony anyagok mintázásakor azonban a vákuum alkalmazását lehetőség szerint el kell kerülni!

A felső kamra telítődése után a controller segítségével a nyomó/vákuumcsövön keresztül gáznyomást (inert gáz) adnak a kamrában lévő vízmintára, mely a mintacsövön keresztül a felszínre jut. A felső kamrában összegyűlt vízminta (80 ml) felszínre juttatása után megszüntetik a rendszerben lévő túlnyomást és az alsó kamrából újból a felső kamrába áramolhat a víz a golyósszelepen keresztül. A folyamatot a kívánt mennyiségű vízminta megvételéig kell ismételtetni.

Lehetőség van a mintavétel után az eszköz tisztítására is, oly módon, hogy a mintacsövön keresztül desztillált vizet nyomnak a rendszerbe, ezáltal a mintavevő szonda kihúzása nélkül is reprezentatív minta vehető akár több mélységből is egyaránt.

Az eszköz hátránya, hogy gyenge vízadó képességű képződményekből nagyon lassan lehet vízmintát venni, és kötött üledékekben (iszap, agyag) való áthaladásakor fennáll a külső szűrők eltömődésének veszélye. További hátránya, hogy a mintavétel után nincs mód a mintavételi lyuk szakszerű eltömödékelésére.



28 ábra: ConeSipper® szondafej metszete



29 ábra: Waterloo Profiler mintavevő

### 5.3.2.3. Waterloo profiler vízmintavételi módszer

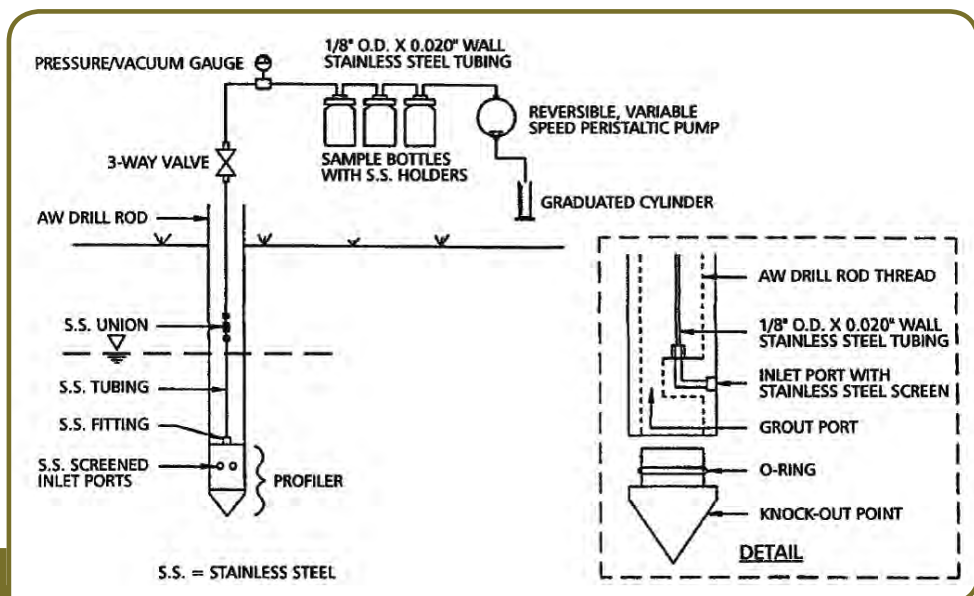
A kanadai Waterloo Egyetemen kifejlesztett mintavevő berendezés (29. ábra) az egyik első olyan lesajtolásos („direct-push”) technikával lehajtható eszköz volt, mely lehetővé tette a folyamatos, több mélységből való vízmintavételt.

A mintavevő nem kombinálható CPT szondával ill. egyéb más szondával, tehát a használata előtt a terület földtani viszonyait fel kell tární. Iszap és agyag képződményekből történő mintavételre nem ajánlatos használni a mintavevőt, mert a mintavétel nagyon időigényes.

A vízminta felszínre juttatására a leggyakrabban perisztaltikus szivattyút alkalmaz-

nak, mely max.  $\approx 8,0$  m mély nyugalmi vízszint mellett használható. Mélyebb nyugalmi vízszintek esetén gázkiszorítású szivattyúkat szokás használni.

A mintavevő fej egy rozsdamentes acélból készült ún. elvesző csúcsból és a felette lévő hüvelyben, körben elhelyezett 6 db mintavevő nyílásból áll. A mintavételi nyílásokat rozsdamentes acél szűrő védi az eltömődéstől. A szűrők méretét a mintázandó képződmény szemcseméretéhez lehet igazítani. A mintavevő nyílásokon bejutó vizet egy a csúcsban elhelyezett közös gyűjtőbe vezetik, melyet rozsdamentes acél vagy Teflon® cső köt össze a mintavételhez használt felszíni eszközökkel. Egy javasolt mintavételi elrendezést mutat be a 30. ábra.



30 ábra: Mintavétel Waterloo profiler eszközzel (Pitkin et al,1999)

A változó irányban is működtethető perisztaltikus szivattyúnak köszönhetően lehetőség van a mintavevő két mintavétel közötti tisztítására az eszköz kihúzása nélkül. Továbbá a mintavevő lenyomása/levibrálása közben is javasolt, hogy folyamatosan desztillált vizet áramoltassanak ki a mintavevő nyílásokon, mivel ezzel elkerülhető a szűrők eltömődése.

Miután elérték a kívánt mintázási mélységet a perisztaltikus szivattyú működési irányát megváltoztatják és elkezdődhet a mintavételezés. A bejuttatott desztillált víz kis mértékben felhígítja a formációban jelen lévő szennyezőanyag koncentrációját, ezért a mintavételezést addig kell végezni, amíg meg nem bizonyosodunk róla, hogy reprezentatív mintát kapunk. A mintavétel közbeni folyamatos, vezetőképesség és pH mérés erre megfelelő eljárás.

A mintavétel végeztével az elvesző csúcs leválasztható a mintavevő fejről, és a mintavételi lyukba a mintavevő kihúzása közben bentonit zagy injektálható, megszüntetve ezzel a rétegek keresztzennyezésének kockázatát.

A Waterloo Egyetemen kifejlesztett mintavevőt időközben már több cég is átalakította/továbbfejlesztette, így a piacon ma több hasonló elven működő, de különböző márkanev alatt futó mintavételi eszköz is megtalálható.

### 5.3.2.4. Mintavétel a földtani közegből vibrációs (szónikus), sajtolásos és verésses eljárásokkal

A mintavétel során olyan technológiát kell alkalmazni, amely biztosítja a minta reprezentativitását úgy, hogy a mélyebb rétegek elszennyeződésének kockázata lecsökken. Fontos szempont a fúrásos feltárások során képződött hulladék (furadék) mennyiségének csökkentése, mert a felszínre került földtani közeg vizsgálata, kezelése, szállítása, elhelyezése jelentős költségekkel járhat, és veszélyeztetheti a fúrásos feltárások környezetében tartózkodók egészségét is.

A szónikus fúrás a közelmúltban kifejlesztett egyedi fúrási technológia, mely gyors és mély fúrások elkészítésére ad lehetőséget. A szónikus fúrási technológiát egyesek a lesajtolásos (direct-push) technológiák közé sorolják, mások azonban külön technológiaként határozzák meg. Mindkét technológia hasonló mintavételi sajátosságokkal jellemezhető, és a mintavételi eszközök is gyakorlatilag csereszabatosak.



31 ábra: Traktorra szerelt kis teljesítményű és lánctalpas járműre szerelt közepes teljesítményű szónikus fúrógép

A szónikus fúróberendezés „lelkét” a fúrófejbe épített, nagy sebességgel forgó és mechanikusan szinkronizált excenterek jelentik, melyeket egy nagyteljesítményű hidromotor hajt. Az excenterek által keltett nagy frekvenciájú vibráció közvetlenül a fúrórudazatra (mintavevőre) adódik át, melynek köszönhetően a talaj közvetlenül a fúrórudazat körül megfolyósodik. A szónikus fúrógépeket többféle kialakítással és teljesítménnyel gyártják (31. és 32. ábra).



**32 ábra: Teherautóra szerelt nagyteljesítményű szónikus fúrógép**

A szónikus fúrógépek rendszerint forgatófejjel is rendelkeznek, s a nagyobb teljesítményű gépek a vibrálással együtt forgatnak is, s így kemény kőzetekben is használhatók. Kőzetben való fúráskor azonban rendszerint lég- vagy vízöblítést kell alkalmazni a furadék kihozatalára és a fúrófej hűtésére. Száraz magfúráásra is lehetőség van kemény kőzetben, azonban ebben az esetben lassabb előrehaladásra, a fúrófej fokozott elhasználódására és a mag felmelegedésére kell számítani.

A lesajtolásos (direct-push) mintavételi eljárások tágabb értelmezésben magukba foglalják a mintavevő eszközök lejjutatását vibrációval, statikus nyomással, dinamikus nyomással (veréssel) a kívánt mélységbe.

A dinamikus verőkalapács lehet hidraulikus és mechanikus működésű és legalább 30 Hz verési frekvenciával, valamint 50-500 kN becsapódási erővel rendelkezik. A verőkalapáccsal működő gépek viszonylag könnyűek, mert a rudazat és szonda veréssel történő lehajtása nem igényel olyan nagy önsúlyt, mint amennyi a csupán statikus nyomással működő berendezéseknél szükséges (nehéz tehergépjármű). A kisebb gépeket rendszerint kisteherautóra szerelve használják, mely nagyban megkönnyíti a berendezés

mozgatását (33. ábra). A nagyobb teljesítményű gépeket ebben az esetben is rendszerint lánctalpas járműre szerelik (34. ábra).

A kisebb teljesítményű verőkalapáccsal szerelt gépek általában 15-30 m közötti mélységig használhatók, de ez nagyban függ a használt rudazat/szonda átmérőjétől és a földtani viszonyoktól. A mintavételi eljárás konszolidálatlan, laza (homok, iszap, agyag, apró kavics) üledékekben használható. A verőkalapácsot egyes gépeknél opcionálisan forgatófejjel is ki lehet egészíteni, melynek segítségével üreges spirálfúrást is lehet végezni, továbbá a csak veréssel nem harántolható kemény, tömör rétegeket is át lehet fúrni.



33 ábra: Kisteherautóra és kisméretű járműre szerelt verőkalapácsos gép



34 ábra: Lánctalpas járműre szerelt verőkalapácsos gép

### Mintavevő eszközök

A lesajtolásos, veréses és vibrációs eljárással lejuttatható mintavevő eszközök két csoportra oszthatók: védőcső nélküli és védőcsöves mintavevőkre. Kezdetben csak védőcső nélküli mintavevőket használtak, azonban ez esetben megkérdőjelezhető a nyitott fúrólukból vett minta reprezentativitása, ezért került sor a védőcsöves mintavevők ki-

fejlesztésére. Ahol elkülönülő szerves fázisban is jelen lehet, és mélyebb rétegek elszennyeződésének a veszélye is fennáll, ott a védőcsöves mintavevők alkalmazása ajánlott.

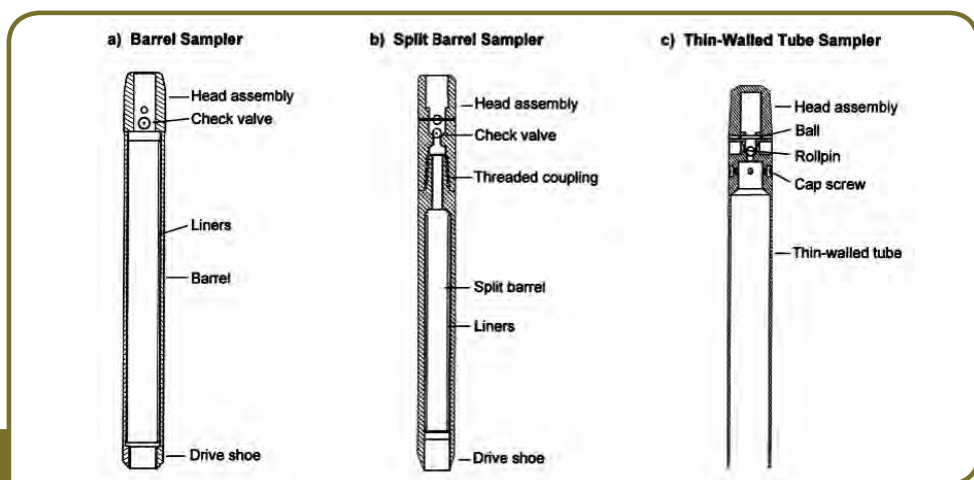
A védőcső nélküli mintavételkor a mintavevő közvetlenül kerül besajtolásra/bevibrálásra/beverésre a felszín alá, melynek során a mintavevő belsejébe jut a földtani közeg. A mintavevő telítődése után a mintavevő és a teljes rudazat visszahúzásra kerül, szabadon hagyva a fúrólukat. Kötött képződményekben (agyag, iszap), és általában a vízszint felett a lyuk állékony maradhat, azonban szemcsés képződményeknél (homok, kavics) a fúróluk gyakran összeomlik, különösen a vízszint alatt. Ez esetben, ha nyitott mintavevőt használnak a behullott, befolyt kohézió nélküli földtani képződmények miatt a mintavevő eszközből vett minta nem tekinthető reprezentatívnak.

Dugattyús mintavevő (pl. Aqualock) használata esetén ez a fajta hiba kiküszöbölhető. A dugattyús mintavevő a kívánt mintázási mélységig zártan kerül lejuttatásra, majd a célmélység elérésekor fentről kinyitják és tovább préselik lefelé, miközben a minta bejut a mintavevő belsejébe. A mintavevőt ez esetben is minden mintavétel után ki kell szerelni, de azután ismét zártan kerül lehajtásra, megakadályozva a nem célmélységből származó anyag mintavevőbe jutását.

A mélyebb rétegek elszennyeződésének veszélye fennáll a védőcső nélküli alkalmazásoknál, ezért alkalmazásuk csak azokon a helyeken ajánlott, ahol nagy valószínűséggel nem jöhet létre nemkívánatos hidraulikai kapcsolat az egyes rétegek közt. További hátránya a védőcső nélküli mintavevőknek, hogy a mintavétel végeztével a legtöbb esetben nem lehet megbízhatóan eltömedékelni a fúrólukat.

Hátrányai ellenére a védőcső nélküli mintavevők napjainkban is nagyon népszerűek, elsősorban költséghatékonyságuk miatt. Körültekintő és előre megtervezett használatukkal jó minőségű magmintákhoz lehet jutni, azonban e mintavevők sajátosságából eredő korlátokat mindenkor szem előtt kell tartani!

Néhány, a gyakorlatban használt védőcső nélküli mintavevőt mutat be a 35. és 36. ábra.



35 ábra: A leggyakrabban használt védőcső nélküli mintavevők (US EPA, 1993)



A védőcső nélküli mintavevők előnye a védőcsöves mintavevőkkel szemben, hogy kisebb átmérőjüknek köszönhetően mélyebbre lehet őket lejuttatni, azonos külső átmérő esetén pedig nagyobb átmérőjű magmintát lehet velük venni. A magminták átmérője tág határok közt változik, de környezetvédelmi célokra az 50 mm átmérőjű minták általában megfelelőek.

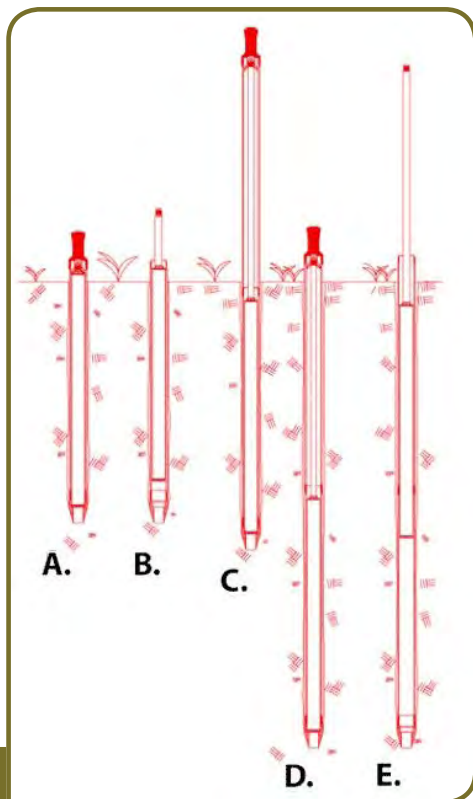
A védőcső nélküli mintavevőket rendszerint célzott mélységből történő magmintavételre használják, folyamatos magmintavételre a mintavevő állandó ki-és beépítése miatt nem célszerű ezeket használni.



36 ábra: Aqualock típusú mintavevővel vett agyag és homok magminták

A védőcsöves mintavevők esetében a külső, nagyobb átmérőjű védőcső és a belső mintavevő cső egyidőben kerül lenyomásra. Ezeket rendszerint folyamatos magmintavételre használják, valamint minden olyan esetben, amikor a védőcső nélküli mintavételezés nem használható (keresztzennyezések kockázata, furat eltömedékelésének igénye). A védőcsöves rendszer a talajmintavételezés közben alkalmas mintavételezésre a felszín alatti vízből illetve kis átmérőjű monitoring kút beépítésére is.

A védőcsöves mintavevő eszközök hátránya, hogy kohézió nélküli földtani képződményekben (pl. kis egyenlőtlenségi együtthatójú folyós homok) a mintavevő belső cső kiépítésekor az üledék betörhet a védőcsőbe és ellehetetleníti a további mintavételt. Ennek elkerülése érdekében folyós homokban végzett mintavételnél a belső cső kiépítése előtt a védőcsövet fel kell tölteni desztillált/ioncserélt vízzel, hogy ellennyomást adjunk a rendszerre, bár ez valamelyest módosíthatja a minta pórusfolyadék összetételét.



37 ábra: Védőcsöves folyamatos magmintavétel folyamatábrája

Védőcsöves mintavevővel történő folyamatos magmintavétel lépéseit mutatja be a 37. ábra.

**A:** Védőcső és a mintavevő együttes lesajtolása a felszín alá.

**B:** A minta kinyerése a mintavevő kihúzásával.

**C:** A mintavevőhöz csatlakozó belső rudazat toldása és a mintavevő behelyezése a szintén megtöltött védőcsőbe.

**D:** A védőcső és a mintavevő tovább-sajtolása.

**E:** A második magminta kinyerése a mintavevő (38. ábra) és a belső rudazat visszahúzásával.

A lépések a kívánt mintavételi mélység eléréséig ismételhetők, majd az utolsó mintavétel után a fúróluk a védőcső folyamatos visszahúzása mellett alulról fölfelé telítve bentonit besajtolással megszüntethető.



38 ábra: Védőcsöves mintavevővel vett folyamatos magminák PVC magcsőben

## 5.4. Megfigyelő (monitoring) kutak

### 5.4.1. Hagyományos fúrt kutak

A fúrásos feltárásokat követő rendszeres vízmintavételezés, továbbá folyadékszint észlelés céljából megfigyelő (monitoring) kutak kialakítása szükséges.

A kút tervezése során fel kell használni az előzetes feltárások során kapott eredményeket, megfigyeléseket. Ezek alapján lehet meghatározni a védőcső, a bélésű rakatok, a szűrőzés mélységét, és a kútkialakításhoz szükséges egyéb anyagok (cement, bentonit, szitaszövet, stb.) fajtáit és mennyiségeit.

A csövek és a szűrők kiválasztásánál a fúrástechnikai előírások mellett a használandó anyag és a megfigyelt kockázatos anyagot tartalmazó felszín alatti víz kémiai reakcióképességét is figyelembe kell venni.

A védőcső az a szerkezeti elem, amely a kútat a beomlás ellen biztosítja, másrészt a feltárt rétegben lévő víz szennyeződését, továbbá más vízzel való keveredését megakadályozza. A bélésű csövek anyagát ezért úgy kell megválasztani, hogy szilárdsági és kémiai szempontokból egyaránt megfeleljen a követelményeknek.

A figyelő kút fúrásánál különösen nagy gondot kell fordítani a felszíni víz és a megfigyelésbe nem vont rétegek vizének a kizárására.

Minden fúrási technológiánál, még a legnagyobb körütekintéssel végzett munkánál is számolni kell azzal, hogy üregek, csatornák maradhatnak a bélésű és a furat fala között, a fúróluk mindig nagyobb átmérőjű mint a bélésű. A felszínről beszivárgó, vagy a kút által megnyitott, a szűrőzött rétegtől eltérő rétegekből származó, esetleg szennyezett víz e nyílásokon át a megfigyelt rétegből szivattyúzott vizet elszennyezheti, minőségét megváltoztathatja. Ennek megelőzése érdekében a védőcső megfelelő tömítéséről, zárásáról, illetve a furatfal és a védőcső közti gyűrűs tér megfelelő kitöltéséről gondoskodni kell.

A palástcementezés mellett elterjedt a sarucementezés, a csököz tömítésére pedig a tömszelencék használata.

A szűrőcső körüli gyűrűs térben megfelelő szűrőváz kialakítása szükséges, ezért általában a fúrási átmérő legalább 80 milliméterrel nagyobb a szűrőcső átmérőjénél. A gyűrűsteret a bélésű szűrőzött szakasza mentén a szűrőszabálynak megfelelő szűrőrakattal (kavics, homok) kell kitölteni, fölötte homokszórást és agyaglezárást kell alkalmazni. A kutak mélységét a szennyezett tartomány várható vertikális kiterjedése és a talajvízszint ingadozásának mértéke határozza meg.

A szűrőcsőszakaszt védőcső alkalmazása mellett szükséges elhelyezni.

A kút talplezárását úgy kell megoldani, hogy a szilárd részek (homok, iszap) bejutását megakadályozza. A végleges, állandósított kialakítás zárható, betongallérral ellátott kútfejet kíván meg.

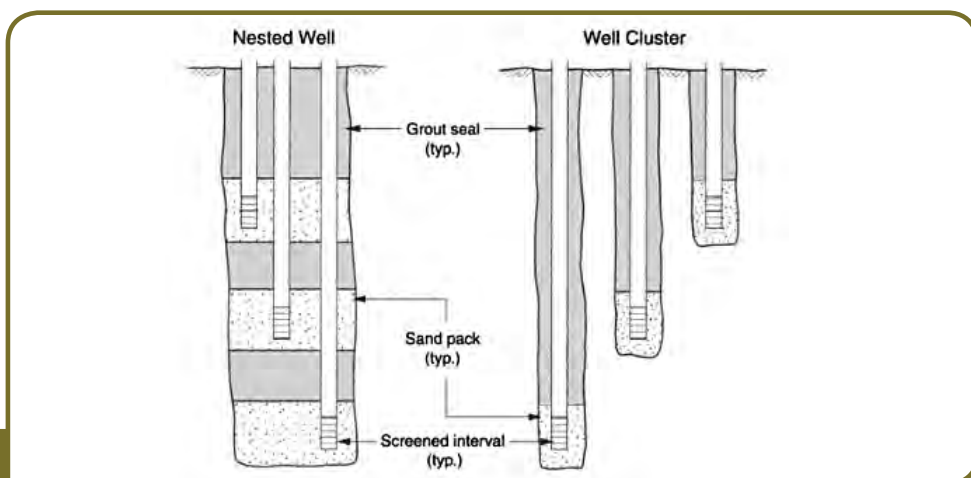
Rétegvízre kialakított figyelőkút esetében a felsőbb víztartókat (pl. a talajvíztartót) agyagba préseléssel vagy (bentonitos) cementezéssel saruzárt és utóellenőrzött védőcsővel kell kizárni.

A szűrő, a bélésű illetve a védőű anyagának kiválasztásánál figyelembe kell venni a feltárni szándékozott vagy megfigyelt kockázatos anyag tulajdonságait. Csak olyan anyagok alkalmazhatók, melyek ellenállnak a megfigyelt anyagnak, vele nem lépnek reakcióba.

A különböző műanyag és fém anyagú csövek és szűrők használata általános a környezetvédelmi célú figyelőkutak esetében.

#### 5.4.2. Kis átmérőjű kutak

Kútcsoportoknak nevezzük azokat a kutakat, amelyek egymáshoz közel, külön-külön fúrólukakba kerülnek telepítésre eltérő mélységű szűrőzessel (39. ábra). A legfőbb előnyük a fészekakkal szemben, hogy a gyűrűs tér megfelelő tömítése egyszerűbben és megbízhatóbban alakítható ki, mert csak egyetlen cső és csak egy szűrőzött szakasz található egy fúrólukban. Ezért az eljárást széles körben ajánlják több víztartó szintből történő mintavételezéshez.



39 ábra: Fészekutak és kútcsoportok (Johnson, 1983)

A technológia hátránya, hogy minden mintavételi zóna kialakításához külön fúrólukakat kell készíteni, ami jelentősen drágítja a telepítési költségeket.

A monitoring kutakat a közelmúltig szinte kivétel nélkül fúrásos technológiával létesítették, azonban az elmúlt 10-20 évben a jelentős költség és időmegtakarításnak köszönhetően nyomva, ütve vagy vibrálva (szónikus fúrógépek) juttatják le a rudazatot és az esetlegesen hozzá kapcsolt mintavételi eszközt, geotechnikai szondát, vagy egyes kémiai összetevőket érzékelni képes eszközöket a felszín alatti környezetbe. Ekkor a telepítés során a földtani közeget nem kell kitermelni, mert az kitér a rudazat elől.

A technológia elsősorban konszolidálatlan képződményekben alkalmazható. Léteznek

olyan nagy teljesítményű szónikus fúrógépek is, melyek kemény kőzetekben is képesek fúrni. Egyes konszolidálatlan képződményekben a behatolás mélysége jelentősen lekorlátozódhat, ha a formáció nagyobb kavicsokat, görgeteget, vagy erősen cementált réteget tartalmaz. A technológiával elérhető maximális mélység függ a harántolt formációk ellenállásától, a telepítéshez használt berendezés típusától és méretétől, valamint a rudazat átmérőjétől.

A legtöbb berendezéssel több, mint 30 méteres mélység elérhető, de léteznek olyan berendezések, mint például egyes szónikus gépek, amelyekkel több száz méteres mélység is elérhető. A telepítési mélység a rudazat átmérőjének csökkentésével növelhető, ám minél kisebb a rudazat átmérője annál kevesebb mintavételi, eszköz használható a szűk keresztmetszet miatt. A rudazat átmérője 0,5-4,5” között változhat a telepítési technológiától és az alkalmazott berendezéstől függően, de a leggyakrabban alkalmazott rudazatok mérete 2-3”. Nagyobb átmérőjű rudazatok általában csak szónikus berendezésekkel alkalmazhatók.

A vert, sajtolt, vibrált kutak előnyeit és hátrányait a hagyományos fúrt kutakkal szemben az alábbiakban ismertetjük.

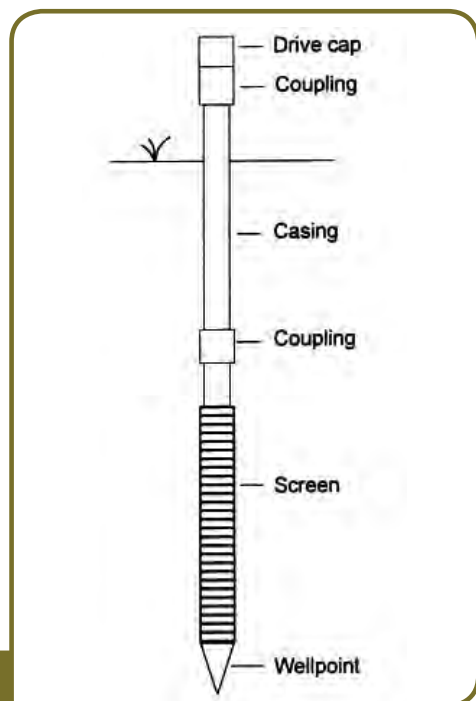
### **Előnyök**

- A vert, sajtolt, vibrált kutak telepítése közben nem keletkezik fúrési hulladék, mivel a földtani közeget nem kerül a felszínre, hanem a felszín alatt kitér a rudazat elől. Hagyományos kutaknál gondoskodni kell a kitermelt szennyezett földtani közeg kezeléséről és elszállításáról, ami megnövelheti a telepítés költségeit.
- Az eljárás alkalmazása során a szennyezett furadék csak mintavétel esetén kerül ki a furatból, ezért csökken a kezelő és mintavevő személyzet kitétsége a szennyező anyagokkal szemben.
- Tapasztalatok szerint a vert, sajtolt, vibrált kutak 2-5-ször gyorsabban telepíthetők, mint a hagyományos fúrt kutak, létesítésükhöz kevesebb munkaerő szükséges.
- A vert, sajtolt, vibrált kutak átmérője kisebb, mint a hagyományos kutaké. A kis átmérő miatt tisztítószivattyúzáskor kisebb térfogatú vizet kell kitermelni, ami szennyezett felszín alatti víz esetén kisebb térfogatú folyadék kezelését eredményezi, és csökken a mintavételezésre fordított idő is.
- A vert, sajtolt, vibrált eljárással készített kutaknál nem kerül felhasználásra semmilyen folyadék fúrás során, így kevésbé módosulnak a földtani közeg pórusait kitöltő fluidumok, mint az öblítéses fúrás esetén. A nagy mennyiségű öblítőfolyadék megváltoztathatja a felszín alatti környezet geokémiai, hidraulikai viszonyait, és a furatban visszamaradt iszap eltömmedélkelheti a szűrővázat is, ami ellehetetlenítheti a kút további használatát.
- A verő, sajtoló, vibráló berendezések általában kisebb helyigényűek, mint a nagy fúróberendezések, ezáltal nehezen megközelíthető, szűkösebb munkatérben is elvégezhető a telepítés.

- Mivel a verő, sajtoló, vibráló eljárások alkalmazása során egy egyszerű hengeres cső kerül lenyomásra, szemben a bonyolultabb geometriájú és nagyobb felületű fúrókkal (spirál, belül üreges spirál), ezért az egyes telepítési pontok között sokkal egyszerűbben, gyorsabban és hatékonyabban oldható meg a rudazat tisztítása.
- A verő, sajtoló, vibráló eljárással készített monitoring kutak létesítési költsége általában alacsonyabb a hagyományos fúrási technológiával létesülő kutakénál.

### Hátrányok:

- A verő, sajtoló, vibráló eljárással készített kutak legfőbb hátránya, hogy a legtöbb gép csak konszolidálatlan képződményekben alkalmazható.
- A keskeny gyűrűs teret nehezebb folytonosan kitölteni homokkal, illetve bentonit zaggal, a nem megfelelő tömítettség pedig nemkívánatos vertikális vízszivárgást és keresztzennyezést okozhat.
- A verő, sajtoló, vibráló eljárással készített kutak kisebb átmérővel készülnek, mint a hagyományos kutak, ezért az általánosan használt szivattyúkkal nem lehetséges a vízmintavétel. Bár az utóbbi időben számos kisátmérőjű kutakban használható mintavevő (hólyag szivattyú, perisztaltikus szivattyú, inercia szivattyú) kapható a kereskedelmi forgalomban, ezek beszerzése többletkiadást jelent.



40 ábra: Védőcső nélkül telepített monitoring kút (ASTM 6724-04)

A kisátmérőjű kutak telepítése előtt meg kell ismerni a terület földtani viszonyait, hogy a legmegfelelőbb telepítési technológia kerüljön alkalmazásra és a szűrő megfelelő helyre kerüljön. CPT szondázás révén a rétegződés centiméteres pontossággal meghatározható, és az eredményekből a felszín alatti víz elhelyezkedésére is lehet következtetni. Néhány telepítési technológia alkalmazása során (pl.: duplacsöves mintavevő) lehetőség van a rudazat lenyomása közben talajminta vételezésére is, így a kapott minták tükrében a helyszínen felülbíráható/pontosítható a tervezett szűrő elhelyezése.

A kisátmérőjű kutak kétféle módon, védőcső nélkül és védőcsővel telepíthetők.

A védőcső nélküli (exposed-screen) kuttaknál (40. ábra) a bélőcső és a szűrőzött csőszakat közvetlenül kerül lenyomásra.

A technológia hátránya, hogy az előrehaladás közben a szűrő folyamatosan érintkezik a harántolt formációkkal, ami a szűrő eltömődéséhez vezethet. Ha a szűrő szennyezett képződményeket harántol a lenyomás közben, a szennyezőanyagok a szűrőbe tapadva kioldódhatnak a mintázás közben, ami megváltoztathatja a rétegre jellemző kémiai analitikai eredményeket.

A védőcső nélküli kutak gyorsabban és olcsóbban telepíthetők, mint a védőcsöves eljárással készített kutak, mivel a gyűrűs tér hiánya miatt nem kell homok és bentonitrétegeket telepíteni, ezáltal idő és pénz takarítható meg.

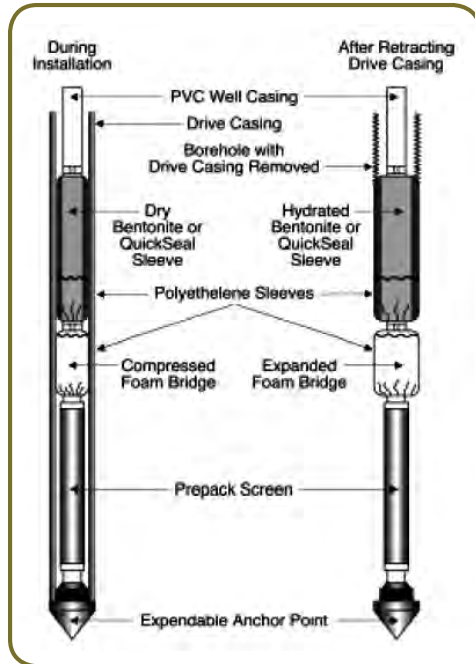
A védőcsöves telepítés (41. ábra) során a kútsőrakat egy elhagyó csúccsal felszerelt védőcső biztosítása mellett kerül lenyomásra. Ezt követően a védőcső fokozatos visszahúzása mellett a szűrő körüli gyűrűs tér homokszórással kerül feltöltésre, a szűrőzött szakasz fölötti gyűrűs térbe pedig bentonitot vagy bentonitos cementet injektálnak. A folyamat jelentősen gyorsítható előregyártott homokszűrő és bentonit gyűrűk alkalmazásával. Ezeket a telepítés előtt kell a kútsőrakat megfelelő szintjeire rögzíteni, majd az így elkészített csőrakat a terepszintről a védőcsőben leereszthető.

Védőcsöves eljárásnál a mintavétel csak 48-72 órával a telepítés után ad megbízható eredményeket, mivel a gyűrűstér tömítésére használt bentonit kb. ennyi idő elteltével biztosít megfelelő zárást a furatban történő vertikális vízszivárgás ellen.

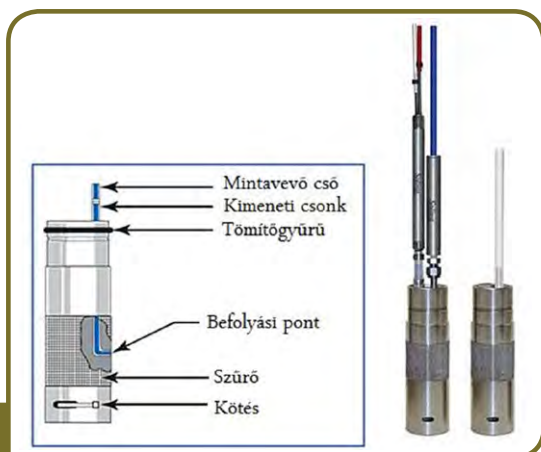
### 5.4.3. Waterloo típusú kutak

A Waterloo típusú kutak (42. ábra) használatával több mélységből nyílik lehetőség mintavételre a felszín alatti vízből és vízszintmérésre egy furaton belül.

Az ilyen típusú kutakkal kevesebb furat kialakításával és kevesebb időráfordítással háromdimenziós kép kapható a felszín alatti szennyezettségről és a felszín alatti víz szivárgási viszonyairól. A Waterloo típusú kút különálló, egymáshoz vízzáró kötésekkel kapcsolható elemekből áll, így minden alkalmazáshoz igény szerint alakítható. A rendszer több rozsdamentes acél mintavevő egységet tartalmazhat, ami tetszőleges mélységben 2"-os PVC csövekhez csatlakozható.



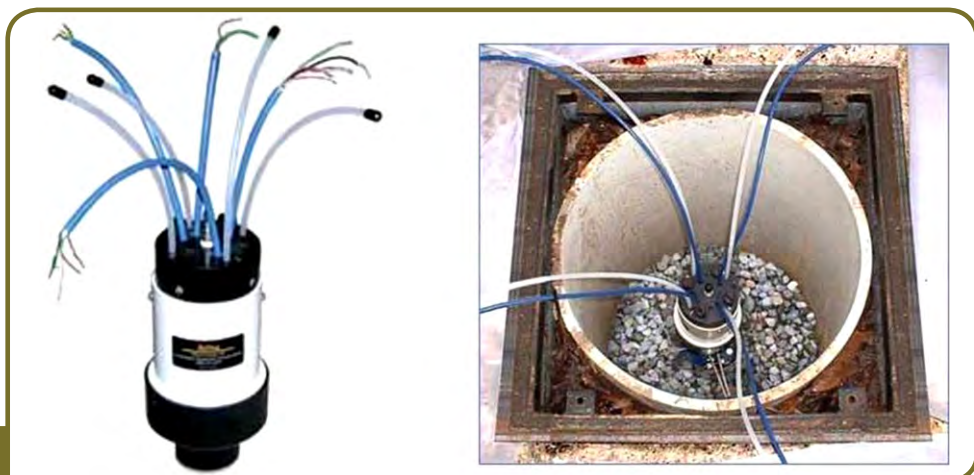
41 ábra: Védőcsővel telepített monitoring kút (ASTM D6724-04)



42 ábra: Waterloo rendszerű kút felépítése

nyomás jelátalakítók csatlakoztathatók. A nyomás jelátalakítókat adatgyűjtő egységekkel (data logger) lehet összekötni a rendszeres automatikus mérések érdekében. Ha a kimeneti csonkhoz vízmintavevő cső van csatlakoztatva, kis átmérőjű vízmintavevők (perisztaltikus szivattyúk, inerciaszivattyúk vagy mini dupla szelepes szivattyúk) használhatók a mintavételhez és kis átmérőjű vízszintmérővel lehetőség van a nyugalmi vízszint meghatározására is.

A mintavevő csövek és kábelek rendszerezésére, elkülönítésére és azonosítására a felszínen található speciális kútfej szolgál (43. ábra).



43 ábra: Waterloo rendszerű kútfej



Az adatgyűjtés módjától függően a megfigyelt zónák száma 2 és 24 között változhat, amit az alábbi táblázat ismerteti részletesen.

| Szabványos 2"-os Waterloo rendszer       |                       |
|--|-----------------------|
| Adatgyűjtés módja                        | Maximális zónák száma |
| Szivattyúkkal és nyomás jelátalakítókkal | 8                     |
| Mintavevő csövekkel                      | 15                    |
| Szivattyúkkal és mintavevő csövekkel     | 6                     |
| Szivattyúkkal                            | 12                    |
| Nyomás jelátalakítókkal                  | 24                    |

4. táblázat: A maximálisan telepíthető zónák száma Waterloo rendszerű kutakban az adatgyűjtés módjától függően

**Telepítés szemcsés képződményekben**  
(44. ábra)

A rendszert a leggyakrabban üreges spirálfúróval vagy vert, lesajtott vagy vibrációs technológiával (direct push) telepítik. Az üreges spirálfúró vagy a vert, sajtolt, vibrált technológiával lehajtott védőcső visszahúzása után a szemcsés képződmény kitölti a maradék gyűrűs teret, ezért a telepítésnél a különböző szintek elválasztására szolgáló homokszórás és a bentonit tömítések injektálása feleslegessé válik. Ez esetben gumi pakkerek használata nem javasolt, mivel ezek nem nyerhetők vissza a mintavétel után, megdrágítva így a mintavételt. A finom szemcsék (agyag, iszap, homokliszt) eltávolíthatók a mintavevő egység körüli szűrőt, ezért ilyen képződményekben speciális szűrőzű mintavevő egység alkalmazása szükséges.



44 ábra: Telepítés szemcsés üledékben



45 ábra: Telepítés kőzetben, kötött üledékben

#### Telepítés kötött üledékben, kőzetben (45. ábra)

Ebben az esetben a Waterloo rendszer és a lyukfal közötti gyűrűs tér nyitva marad, ezért a mintavételi nyílások körüli gyűrűs tér homokkal, az eltérő mélységben lévő mintavételi nyílások közötti gyűrűs tér pedig bentonittal kerül kitöltésre.

#### 5.4.4. CMT típusú kutak

A CMT típusú kutakból egy fúrólyukon belül többcsatornás csőből történhet mintavételezés akár hét különböző, egymástól elszigetelt mélységből. A kutat egy speciális kútféjjel kiegészítve talajlevegő mintavételre is lehetőség nyílik.

A CMT kutak telepítése gyors és költségghatékony, mivel három vagy hét fúrólyuk helyett elegendő egy kialakítása. Egy hét csatornás rendszer telepítését két ember 3 óra alatt elvégezheti, a három csatornás rendszer pedig még gyorsabban telepíthető.

Kétféle CMT rendszer létezik, a háromcsatornás és a hétcsatornás (46. ábra, 5. táblázat). A nagyobb, 43 mm külső átmérőjű rendszernél a polietilén cső (HDPE) 7 részre osztott, lehetővé téve 7 különböző mélységű zóna megfigyelését. A háromcsatornás kivétel is polietilénből készült, hasonló szerkezetű, de a külső átmérője csak 28 mm. Ez a keskenyebb változat különösen alkalmas a vert, sajtolt, vibrált technológiával készült kutak telepítéséhez.



46 ábra: 3 és 7 csatornás CMT csövek

| Tulajdonságok          | 7 csatornás  | 3 csatornás  |
|------------------------|--|--|
| Csőátmérő              | 43 mm  | 28 mm  |
| Megfigyelhető zóna     | Maximum 7  | Maximum 3  |
| Csatorna átmérő        | Külső csatornák(6 db):10 mm<br>Belső csatorna (1db):9,5 mm | 3 db 9,5 mm  |
| Csatorna űrtartalma    | Külsők: 131 mL/m<br>Belső: 98 mL/m                         | 98 mL/m  |
| Telepitési lehetőségek | Homok és bentonit rétegelésével                            | Homok és bentonit rétegelésével<br>Előre gyártott homok és bentonit packerek használatával |

5. táblázat: CMT kutak tulajdonságai

A 90 m hosszú CMT csövek 1,2 m átmérőjű körbe tekerve kaphatók. A telepítés helyszínén a kút mélységének megfelelő hosszúságú csődarab levágása után (47. ábra) egy speciális szerszám segítségével a cső palástján kialakíthatók a mintavételi pontok. A legkisebb sorszámú csatorna a legsekélyebb zóna, a legnagyobb sorszámú a legmélyebb zóna megfigyelésére szolgál. Néhány centiméterrel a mintavételi pont alatt és a kút talpszintjén a csatorna egy speciális dugó segítségével lezárható, így elkerülhetőek a kúttalp és a megfigyelt zóna közötti keresztzennyezések és vertikális vízáramlások a csatornákon belül.



47. ábra: CMT kút szerelése

A mintavételi pontok rozsdamentes acél szűrővel védettek, a központosításról pedig a meghatározott szakaszonként alkalmazott központosítók gondoskodnak. A CMT rendszert a felszínen kell összeszerelni, majd a készre szerelt csőszakaszt a védőcsőbe kell behelyezni. A védőcső folyamatos visszahúzása közben a gyűrűstér homokkal, illetve injektált bentonittal kerül feltöltésre, ezen kitöltések száma attól függ, hogy hány csatornát akarnak mintázni. A telepítés utolsó fázisa lényegesen meggyorsítható előregyártott homok, illetve bentonit betétek alkalmazásával. Ezek a betétek szintén a felszínen, bilincsekkel csatlakoztathatóak a CMT csőre. A védőcső visszahúzása után az előszerelt bentonit betétek víz hatására megduzzadnak (24-48 óra) és lezárják a csatornák közötti gyűrűs teret.

A CMT kutakban a csatornák kis átmérője miatt csak kis átmérőjű mintavételi eszközök (inerciaszivattyú, perisztaltikus szivattyú, dupla szelepes szivattyú) használhatók, melyek azonban ma már könnyen beszerezhetők (48. ábra). Ezek méretüknél fogva csak alacsony vízhozammal képesek dolgozni, azonban a kishozamú (low-flow) mintavétel manapság egyre szélesebb körben elfogadott.



48 ábra: Hólyagszivattyú és duplaszelepes szivattyú

#### 5.4.5. FLUTE kutak

A FLUTE (Flexible Liner Underground Technology) kutak flexibilis vízálló poliuretán bevonatú nylon anyagú bélésű segítségével több mint 20 különböző mélységű zóna megcsapolására alkalmasak (49. ábra). A rendszer 2-20" (leggyakrabban 4-10") átmérőjű furatokban alkalmazható. A kutak csővezése minden esetben egyedi megrendelésre a megbízó előírásai alapján készül. Készítéskor a gyárban a kívánt mélységekben mintavételi pontokat helyeznek el a bélésű falán és ezekhez a mintavételi pontokhoz kis átmérőjű (0,17-0,5"-os) csöveket csatlakoztatnak. Szükség esetén nyomás jelátalakítókat és kábeleket is telepítenek a bélésű belsejébe. Az előregyártott kész rendszert dobra tekerve szállítják a felhasználás helyszínére. A telepítés első fázisaként a bélésű

vége rögzítésre kerül a kút pereméhez, majd a flexibilis bélésű csövet a dobról engedik le a kút aljáig a mintavételi csövekkel és a nyomás jelátalakító kábelekkel együtt.

A rendszer kifordítva van a dobra tekerve, így a telepítés gyors és egyszerű. A bélésű telepítéséhez szükséges erőt a hidrosztatikus nyomás szolgáltatja, ami a bélésűbe táplált víz hatására keletkezik.

A rendszer telepítése előtt a furatban lévő víz szivattyúval eltávolítható vagy a bélésű leeresztése közben kipréselődik. Az egyes zónák közti tömítés biztosítása a kútfal teljes hosszán keresztül a nyomás alatt lévő bélésűvel történik.

A mintavételhez gáznyomást használnak, ami kinyomja a vizet a mintavevő csőből. Minden mintavevő csőben két zárószelep található. Az egyik a nyomás alkalmazáskor a vízminta visszaáramlását akadályozza meg a mintavételi pont irányába, a másik pedig a nyomások közötti telítődési fázisban a vízminta visszaáramlását akadályozza meg. A FLUTE rendszer alkalmazásával lehetőség van mindegyik mintavételi pont egyidejű mintázására, amivel jelentős idő takarítható meg.

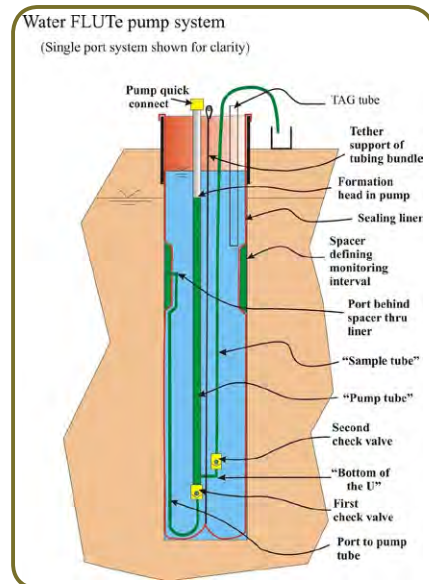
A nyugalmi vízszintmérések a mintavevő csövekben kis átmérőjű kézi vízszintmérő berendezésekkel is elvégezhetőek, de nyomás jelátalakítók telepítésével folyamatos vízszintmérés is végezhető.

A kis átmérőjű (maximum öt mintavételi ponttal) FLUTE rendszerek sajtolt, vert, vibrált technológiával is sikeresen telepíthetőek.

### 5.4.6. A monitoring kutak szűrőhosszainak jelentősége

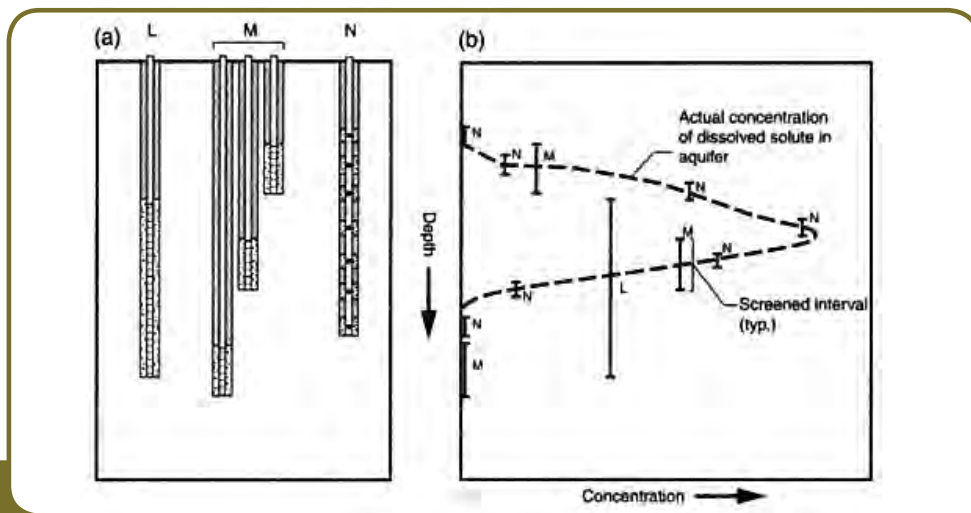
Az elmúlt évtizedek felismerése, hogy a szerves szennyezőanyagok koncentrációja jelentős térbeli változékonyságot mutat, az oldott szerves szennyezőanyagok koncentrációjában már néhány centiméteres függőleges távolságon belül is akár több nagyságrendnyi eltérést lehet kimutatni. Ez a földtani felépítés heterogenitásával és a szennyezőanyagok keveredési folyamataival magyarázható. Klórozott szénhidrogénnel szennyezett területek esetében különösen fontos a szennyezett felszín alatti víz mélységi lehatárolása, mely több mélységből származó vízmintavételt tesz szükségessé.

A hagyományos, általában hosszú szűrőszakasszal ellátott kutakból vett vízminták eredményei nem tájékoztatnak az oldott szennyező anyagok vertikális eloszlásáról megcsapolt földtani képződményben.



49 ábra: FLUTE kút

Az 50. ábra bal oldalán három különböző típusú monitoring műtárgy látható: L - „hagyományos” hosszú szűrőzésű kút, M - rövidebb szűrővel ellátott kutakból álló kútcsoport, N – több mintavételi nyílással rendelkező monitoring kút. Az 50. ábra jobb oldala mutatja az egyes monitoring műtárgyakból vett vízminták szennyező anyag koncentrációit.



50 ábra: Szennyező anyagok koncentrációi különböző típusú kutakban (Einarson and Cherry, 2002)

A hosszú szűrőzésű (L jelű) kútban a minta a felső erősen szennyezett és az alsó szennyezetlen rész keverékeként áll elő. Ez a mérési eredmény alábecsüli a szennyező anyag koncentrációjának maximumát és eltúlozza a szennyezett zóna mélységét is.

A három kútból álló rövidebb szűrőzésű kútcsoport eredményei alapján már jobban kibontakozik a szennyező anyag vertikális eloszlása, de a valósághoz legközelebb álló eredményt a több mintavételi ponttal rendelkező monitoring kút szolgáltatja.

A szennyező anyagok maximális koncentrációjának meghatározása fontos eleme a hatékony kármentesítés tervezésének, és a hatásviselőknél várható egészségkárosodás kockázat becslésének. Ha a hagyományos kutakból vett kevert vízminták alapján alábecsülik a szennyező anyagok maximális koncentrációját, abban az esetben alábecsülik a receptoroknál várható kockázat mértékét, és esetleg hibás döntést hoznak a műszaki beavatkozás szükségességét és technológiáját illetően. Hatékony műszaki beavatkozás tervezéséhez a szennyező anyagok térbeli eloszlásának pontos ismerete szükséges.

Napjainkban egyre több helyszínen létesítenek rövidebb szűrőzésű kutakat. A nem megfelelően pozícionált rövid szűrőjű szakaszok azonban pontatlan és hiányos ismereteket szolgáltatnak a szennyező anyagok eloszlásáról. A szennyező anyagok eloszlásának pontos feltérképezésére általában nem elegendő egyetlen rövid szűrőzésű kút telepítése egy helyszínen, hanem több mélységből szükséges mintavétel.



## 6. A TÉNYFELTÁRÁS ELVEI ÉS SAJÁTOSSÁGAI VÍZNÉL NEHEZEBB SZENNYEZŐANYAGOK ESETÉN

A klórozott szénhidrogénnel (is) szennyezett területeken a tényfeltárás hasonló lépésekben történik, mint az egyéb vegyi anyagokkal szennyezett területeken, ezeket a Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium által 2004-ben kiadott OKKP Kármentesítési Útmutató 6. kötet (Tényfeltárás és monitoring) tartalmazza.

A szennyezett terület feltárása több lépésben történik. Az első lépésben egy kezdeti elvi területi modell kerül megalkotásra, amely tartalmazza a felszín alatti környezetbe került vegyi anyagok jelenlétéről, eloszlásáról, mozgásáról, sorsáról és a befogadó földtani környezetről alkotott elképzeléseket a rendelkezésre álló korlátozott ismeretek alapján.

A kezdeti elvi területi modell alapján kerül megtervezésre az adatgyűjtési program, amelynek hozadéka ismeretében finomítható az elvi területi modell és megkezdhető a kockázatelemzés, valamint a műszaki beavatkozási lehetőségek mérlegelése, értékelése. Végül soron a jogi megfelelés biztosítása mellett a tényfeltárás célja a műszaki beavatkozáshoz szükséges ismeretek megszerzése. Az új adatok, ismeretek kiértékelését követően ismét azonosíthatók adathiányok, amelyek újabb adatgyűjtést igényelnek, és ezek az elvi területi modell továbbfinomítását vonják maguk után. A tényfeltárás tehát többlépcsős iteratív folyamat a tényfeltárás időtartama alatt, de sokszor a műszaki beavatkozás végrehajtása során is folytatódik. A tényfeltárási folyamat felfogható az elvi területi modell bizonytalanságai megszüntetésére irányuló tevékenységnek is.

A terepi feltárási és vizsgálati eljárások javasolt sorrendje az alábbi.

1. Kezdetben a kis kockázatú behatolás- és roncsolásmentes (felszíni geofizikai), valamint a felszín alatti környezetbe csak kis mélységig behatoló (talajgáz mintavétel és vizsgálat) eljárásokat érdemes alkalmazni.
2. A fenti vizsgálatok eredményei kiértékelését követően a ma már rutinszerűen alkalmazott gyors, nagy felbontású, költséghatékony földtani, és szemikvantitatív kémiai információkat szolgáltató in situ műszeres vizsgálatot (CPT-MIP) érdemes elvégezni. A vizsgálat során kockázatos esetben a feltárás leállítható, mert a mért földtani és kémiai információk a feltárás során megjeleníthetők. Az in situ vizsgálatokkal

a hagyományos és költséges fúrásos feltárások, környezeti minták és vizsgálatok száma jelentősen csökkenthető, ami gyorsabb és olcsóbb felmérést eredményez. Ebben a feltárási fázisban az adatgyűjtés gyors, és rövid idő alatt jelentős mértékű ismeretgyarapodás következik be. Fel kell készülni, hogy az előzetes munkatervben foglaltak ellenére sok esetben a terepi munkák során kell döntéseket hozni a vizsgálati eredmények fényében a munkaterv és a vizsgálati program módosításáról. Ezt elsősorban nem a munkaterv tökéletlenségének érdemes betudni, hanem sokkal inkább az egyre tökéletesebb és gyorsabb diagnosztikai eljárások miatt szükségessé váló dinamikus tervezésnek érdemes tekinteni.

3. Az in situ műszeres vizsgálatok eredményeinek kiértékelését követően érdemes sort keríteni a hagyományos fúrásos feltárások, mintavételek, és a vízmintavételre szolgáló állandósított műtárgyak tervezésére és kialakítására.

A víznél nehezebb elkülönülő szerves fázis elképzelhető jelenléte miatt nagyobb körültekintés, elővigyázatosság szükséges a feltárások tervezése és végrehajtása előtt.

Két fontos elvet érdemes a tényfeltárás tervezése és végrehajtása során szem előtt tartani:

- a kívülről befelé haladás elvét, valamint
- a valószínűsíthető gócterületeken az elkülönülő szerves fázis átfúrásának elkerülésére törekvést, vagy konzervatív esetben a fúrások létesítésének elkerülését.

A klórozott szénhidrogénekkal is szennyezett területeken az elkülönülő szerves fázis jelenlétét az alábbi tényezők, ismeretek alapján lehet valószínűsíteni.

### **Területhasználat megismerése szerves oldószerek vonatkozásában**

A klórozott szénhidrogének tárolására, használatára, elhelyezésére vonatkozó ismeretek összegyűjtése. Ennek legcélszerűbb módja a területen jelenleg vagy korábban dolgozók, esetleg a környezetben lakók megkérdezése, és az ő segítségükkel a tárolási, elhelyezési, felhasználási helyszínek terepi azonosítása. Szintén hasznos segítség lehet a területről korábban készült légifelvételek, térképek áttekintése, és azokon a korábbi területhasználati jellemzők, esetleg a tárolás, elhelyezés (pl. hordók, tartályok, oldószer átfejtő helyek, szigeteletlen szikkasztó medencék, stb.) azonosítása. A klórozott szénhidrogének korábbi vagy jelenlegi használatára vonatkozó ismeretgyűjtés során érdemes rögzíteni, hogy milyen ipari folyamatok során, hol, és milyen mennyiségű klórozott oldószert használtak, tároltak, helyeztek el, mi volt a használt oldószer sorsa, és milyen oldószer anyagmérleg volt jellemző a felhasználás idején.

### **A földtani közegből vett minták helyszíni vizsgálata**

A fúrásos feltárások során vett földtani közeg minták megfigyelése alapján általában nem állapítható meg egyértelműen, hogy a minta tartalmaz-e elkülönülő szerves fázist, különösen ha a porustelítettség alacsony, és az oldószer szintelen. Ezért szükség lehet hidrofób festékekkel történő azonosító vizsgálatra. A hidrofób festék (Sudan IV, Oil Red



## 6. A TÉNYFELTÁRÁS ELVEI ÉS SAJÁTOSÁGAI VÍZNÉL NEHEZEBB SZENNYEZŐANYAGOK ESETÉN

O) vörös színű, és a szerves fázisban oldódik, megfestve azt. Ilyen esetben a vörös színű szerves fázis láthatóvá válik, és megfelelő kalibráló mintasorozat segítségével a terepen, szemrevételezés útján megbecsülhető a pórusok telítettsége szerves fázissal. Egyéb terepi módszerek a földtani közeg minták feletti gőztér helyszíni vizsgálata PID vagy FID detektorokkal, vagy sötét helyiségben a minták megvilágítása megfelelő hullámhosszú UV fényel és a látható tartományban kibocsátott fluoreszcens fény érzékelése (telített klórozott szénhidrogéneknél pl. széntetraklorid esetén nem alkalmas).

### A földtani közegből vett minták klórozott szénhidrogén koncentrációi

Az alábbi összefüggéssel kiszámítható az a küszöbkoncentráció, amely a szemcsékhez tapadt, gázfázisban lévő és oldott koncentrációk összege, és amely koncentráció felett nem zárható ki a klórozott szénhidrogén elkülönülő szerves fázisban való megjelenése.

$$C_{ik} = (C_i / \varrho) * (K_d * \varrho + n_w + H * n_a)$$

ahol:  $C_{ik}$  az a küszöbkoncentráció, amely felett az adott klórozott szénhidrogén elkülönülő fázisban is megjelenhet (mg/kg);

$C_i$  az adott vegyület effektív oldhatósága vízben (mg/dm<sup>3</sup>);

$\varrho$  a földtani közeg sűrűsége száraz állapotban (kg/dm<sup>3</sup>);

$K_d$  az adott vegyület megoszlási hányadosa (dm<sup>3</sup>/kg);

$n_w$  víztelített porozitás (mértékegység nélkül);

$H$  az adott vegyület Henry-állandója (mértékegység nélkül);

$n_a$  levegővel telített porozitás (mértékegység nélkül).

A fenti számításhoz a vegyi anyagok földtani közeg és felszín alatti víz közötti megoszlási hányadosát az alábbi összefüggéssel lehet becsülni:

$$K_d = K_{oc} * f_{oc}$$

$K_d$ : megoszlási hányados (dm<sup>3</sup>/kg)

$K_{oc}$ : szerves szén-víz megoszlási hányados (dm<sup>3</sup>/kg)

$f_{oc}$ : szerves szén frakció (mértékegység nélkül)

### Elkülönülő szerves fázis azonosítása kútban, furatban

Elektromos mérőműszerrel (elektromos ellenállás és fénytörési szög mérése), alsó beáramlást biztosító merítő mintavevővel (bailer) vett folyadékmintában, továbbá speciális bevonatú, oldószer hatására elszíneződő szalaggal kutakban, furatokban is azonosítható a víznél nagyobb sűrűségű szerves fázis jelenléte.

### Oldott koncentrációk

Általánosan elfogadott ökölszabály, hogy ha a felszín alatti vízben mért koncentráció meghaladja az adott klórozott szénhidrogén effektív oldhatóságának 1 %-át, akkor fel-

vízi irányban elkülönülő szerves fázis lehet jelen (US EPA, 1992).

Ha több vegyület alkotja az elkülönülő szerves fázist, akkor ismerni kellene a mólárányokat az effektív oldhatóságok számításához.

Raoult-törvénye írja le az egyes vegyületek oldhatóságát több komponensű fázis esetén, amely szerint egy alkotó vegyület effektív oldhatósága megegyezik a keverékben meglévő mólaránya és egyedi vegyületként való oldhatósága szorzatával:

$$C_i = m_i * S_i$$

ahol  $C_i$  az  $i$  jelű vegyület effektív oldhatósága,  
 $m_i$  az  $i$  jelű vegyület mólaránya a szerves fázisban,  
 $S_i$  az  $i$  jelű vegyület oldhatósága vízben.

A fenti összefüggés alapján kiszámítható az egyes alkotó vegyületek effektív oldhatósága, és azok 1 %-a. Ha egy vegyület alkotja a szerves fázist, akkor a mólarány 1, és az effektív oldhatóság megegyezik a vegyület oldhatóságával.

Sok esetben nem ismerjük az elkülönülő szerves fázis összetételét, ekkor más megközelítés szükséges.

A felszín alatti vízből vett minták általában kutakból, furatokból származnak és ezek közvetlen a góc mellett mérhető oldott koncentrációkhoz képest hígulnak a szennyezőanyag terjedés során bekövetkező diszperzió, a mintavételi helynek a csóva magjától való eltérése, a hosszú szűrőzött szakaszok miatti kevésbé szennyezett víz bekeveredése, továbbá a kúton belüli keveredés, és a bomlás miatt. A hígulás mértékét az alábbi összefüggés írja le:

$$h = C_{i \text{ mért}} / C_i$$

ahol  $C_{i \text{ mért}}$  a monitoring kútból vett vízmintában mért klórozott szénhidrogén koncentráció  
 $C_i$  az adott vegyület effektív oldhatósága.

Természetesen a mólárányok összege 1, és ez esetben

$$\sum C_{i \text{ mért}} / S_i = h$$

Hígulás nélkül  $h$  értéke 1 lenne, azonban a korábban említett ökol szabály alapján, ha  $h$  értéke nagyobb 0,01-nél, akkor elkülönülő szerves fázis lehet jelen a mintavételi pont környezetében. Ez az összefüggés általában a gócokhoz közel érvényes, ahol a bomlás szelektív hígító hatása kevésbé érvényesül.

### **Oldott szennyezettség jelenléte hidraulikai szempontból anomális helyen**

Ha a felszín alatti víz szivárgási iránya vízszintes, és ennek ellenére nagy mélységekben (több tíz méterrel a nyugalmi vízszint alatt), akkor valószínű, hogy nem csak a telítetlen zónában van jelen az elkülönülő szerves fázis, hanem a vízszint alatt nagyobb mélységekben is.

Ha a szennyezettség góctól felvízi irányban is megjelenik az oldott szennyezőanyag, akkor szintén valószínűsíthető az elkülönülő szerves fázis jelenléte a nyugalmi vízszint alatt is (lásd a 3. fejezet 8. ábra).

### **Oldott koncentrációk tartóssága**

Ha egy monitoring kútban több évtizeden keresztül állandó a szennyezettség mértéke, akkor nem zárható ki az elkülönülő szerves fázis jelenléte felvízi irányban. Ha egy kevésbé adszorbeálódó és jól oldódó szennyező anyag (pl. MTBE, szulfát) kerül a felszín alatti környezetbe, akkor maga a góc is vándorol a szivárgó vízzel együtt, és évtizedek alatt több száz vagy több ezer méterre is eltávolodhat a kibocsátás helyétől. Ezzel ellentétben a klórozott szénhidrogének szennyezett területek gócaiban, és azok környezetében sokszor állandósult szennyező anyag koncentrációk tapasztalhatók, ami arra utalhat, hogy az oldott szennyezettségnek van egy tartós forrása, amely maga az elkülönülő szerves fázis cseppek, erek, vagy összefüggő folyadéktest formájában.

Az eredeti szennyezőanyagok tartós jelenléte gyors lebomlásra hajlamos környezetben. Számos klórozott szénhidrogén vegyület hajlamos vizes oldatban abiotikus vagy biológiailag támogatott bomlásra.

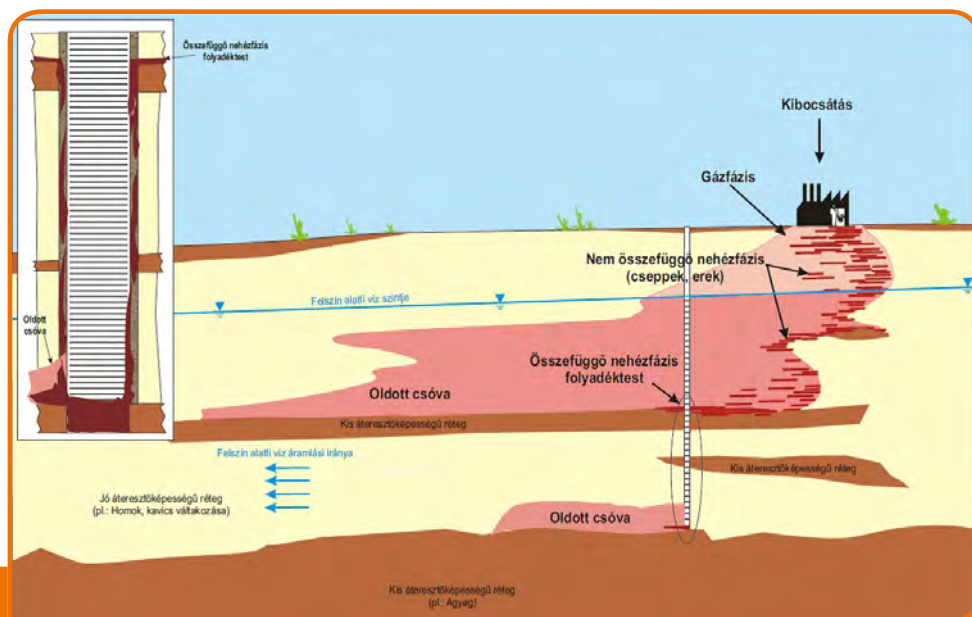
Az abiotikus bomlásra példaként említhető az 1,1,2,2-tetraklór-etán, amely abiotikus úton rövid felezési idővel bomlik triklór-etilénre, és biológiai úton is bomlik. Ennek ellenére évtizedekkel a felszín alatti környezetbe történt kibocsátást követően is jelen lehet a felszín alatti vízben a 1,1,2,2-tetraklór-etán, ami elkülönülő szerves fázis jelenlétét jelzi a mintavételi hely közvetlen környezetében.

Biológiai úton bomlásra hajlamos lehet a tetraklór-etilén és triklór-etilén, ha a mikrobiológiai, geokémiai környezet kedvező, és elegendő elektron donor áll rendelkezésre. Ez esetben diklór-etilén, vinil-klorid a köztes bomlástermékek, amelyek a kiindulási vegyületekhez képest hosszabb felezési idejük miatt akkumulálódnak. Ennek ellenére ilyen területeken is kimutathatók részterületek, ahol tartósan, évtizedeken keresztül jelen lehetnek a kiindulási szennyező anyagok. Ezekben a térségekben tetraklór-etilén vagy triklór-etilén anyagú elkülönülő szerves fázis lehet jelen.

### **Alkoholok tartós jelenléte**

Egyes helyszíneken az elkülönülő szerves fázisban alkoholok is jelen vannak, amelyek oldatukban biológiai úton hajlamosak bomlásra. Ezért az alkoholok tartós jelenléte monitoring kutakban arra utaló jel, hogy elkülönülő szerves fázis lehet jelen a mintavételi hely közvetlen környezetében.

Gócterületeken, ahol nem zárható ki elkülönülő szerves fázis jelenléte, kockázatos a fúrásos feltárás, mert összefüggő folyadéktestként jelenlévő szerves fázis alá jutó fúrásokon keresztül lehetőség nyílik a víznél nagyobb sűrűségű folyadék mélyebb rétegekbe jutására. Az 51. ábra szemlélteti a leírt esetet.



**51. ábra: Mélyebb rétegek elszennyezése szivárgáslassító rétegen tározódó elkülönülő szerves fázis átfúrása esetén**

A mélyebb víztartók elszennyeződésének elkerülése érdekében érdemes a fúrásos feltárások tervezése során a csóva becsült alvízi része felől a göcök felé közelítve végezni a fúrásos feltárásokat.

Ha a gócterületek kiterjedésének meghatározása a feladat, akkor fel kell készülni arra, hogy az elkülönülő szerves fázis megjelenhet. A fúrási utasításban részletezni kell a fúrás előrehaladásának feltételrendszerét. Gócterületeken történő fúrásos feltárások esetén olyan fúrási technológiát kell választani, amely lehetővé teszi a furadék vagy fúrómag folyamatos szemrevételezését, és a mintavételezést. A furadék vagy fúrómag feletti góztérben FID, PID érzékelővel kell vizsgálni a szennyező vegyületek koncentrációit. Amennyiben magas koncentrációk adódnak, szerves festék teszttel kell meggyőződni az elkülönülő szerves fázis jelenlétéről, és a hozzávetőleges porus telítettség értékéről. Ha elkülönülő szerves fázis, különösen, ha annak is az önálló folyadéktest típusú formája kerül kimutatásra, javasolt a fúrási tevékenység abbahagyása, a furat kúttá alakítása a szerves fázis összegyűjtése és eltávolítása céljából, vagy a furat eltömődékelése. Ha ilyen helyen kút kerül kialakításra, akkor érdemes az alján 0,1-0,5 m vastag iszapzsákot kiképezni a víznél nehezebb szerves fázis gyűjtése céljából.

# FELHASZNÁLT IRODALOM

## Könyvek, cikkek

Cohen, R. and J. Mercer (1993) DNAPL site evaluation,  
U.S. EPA EPA/600/R-93/022

ECSA (European Chlorinated Solvent Association) (2006)  
White paper Perchloroethylene

Fetter, C.W. (1992) Contaminant hydrogeology,  
Macmillan Publishing Co. ISBN 0-02-337135-8

Kueper, B.H. and McWhorter, D.B. (1991)  
The behaviour of dense, non-aqueous phase liquids in fractured clay and rock.  
Journal of Ground Water, Vol. 29, No. 5, pp. 716-728.

Kueper, B.H. and Davies K.L. (2009)  
Assessment and delineation of DNAPL source zones at hazardous waste sites;  
U.S. EPA Groundwater Issue

United Kingdom Environment Agency (2003)  
An illustrated handbook of DNAPL transport and fate in the subsurface;  
R&D Publication 133, ISBN:1844320669;

Site Characterization Technologies for DNAPL Investigations, 2004,  
EPA 542-R-04-017

Tom Sale, Charles Newell, Hans Stroo, Robert Hinchee, and Paul Johnson (July 2008)  
Frequently asked questions regarding management of chlorinated solvents in soils and  
groundwater, US Department of Defence ESTPC

## A KÉZIKÖNYVBEN HASZNÁLT IDEGEN KIFEJEZÉSEK, RÖVIDÍTÉSEK

- CAH (Chlorinated Aliphatic Hydrocarbon) - Klórozott alifás szénhidrogén
- CFC - Klorofluorokarbon (freon)
- CPT (Cone penetration test) - Kúpbehatolási vizsgálat
- DNAPL (Dense Non-aqueous Phase Liquid) - Víznél nagyobb sűrűségű nem vízfázisú folyadék, „nehézfázis”
- DCA - diklóretánok összefoglaló jellegű rövidítése
- DCE - diklóretének összefoglaló jellegű rövidítése
- DELCD-Dry Electrolytic Conductivity Detector - Száraz elektrolitikus vezetőképesség detektor
- FC - Fluorokarbon
- FFD (Fuel fluorescence detector) - Ásványolaj eredetű szénhidrogének in situ érzékelésére alkalmas mérőrendszer
- FID - Lángionizációs detektor
- HCFC - Klórozott fluorozott szénhidrogén
- HFC - Hidrofluorokarbon
- MIP (Membrane interface probe) - FID, PID, DELCD detektorokkal ellátott in situ mérőrendszer
- MNA (Monitored Natural Attenuation) - Ellenőrzött természetes koncentrációcsökkenés
- PBB - Polibrómozott bifenil
- PBDE - Pentabrómdifeniléter
- PCB - Poliklórozott bifenil
- PCE: Perklóretilén, tetraklóretilén, tetraklóretén
- PFC - Perfluor-karbon
- PCT - Poliklórozott-terfenil
- PCP - Pentaklórfenol
- PID - Fotoionizációs detektor
- ppb (parts per billion) - mikrogram/liter víz esetén
- ppm (parts per million) - milligram/liter víz esetén
- Residual DNAPL - Egymástól elkülönülő cseppek, erek alkotta víznél nagyobb sűrűségű szerves fázis
- ROST (Rapid optical screening tool) - Lézerrel gerjesztett fluoreszcens fény érzékelésén alapuló in situ mérőrendszer
- TCA - Triklóretánok összefoglaló jellegű rövidítése
- TCE - Triklóretilén, triklóretén
- VC - Vinil-klorid



