

## **KÁRMENTESÍTÉSI ÚTMUTATÓ 8.**

### **ÚTMUTATÓ A TELÍTETLEN TALAJZÓNÁBAN LEJÁTSZÓDÓ TERMÉSZETES SZENNYEZŐANYAG LEBOMLÁS ÉS MEGKÖTÉS ÉRTÉKELÉSÉHEZ**

A kiadvány Németország Környezetvédelmi, Természetvédelmi és Reaktorbiztonsági Minisztériumának Szövetségi Környezetvédelmi Hivatala (Umweltbundesamt) által 2006-ban kiadott **Handlungsempfehlung zur Beurteilung des natürlichen Schadstoffabbaus und -rückhaltes in der ungesättigten Bodenzone** című kiadvány magyar változata. A német nyelvű eredeti kiadvány a [www.Umweltbundesamt.de](http://www.Umweltbundesamt.de) honlapon megtalálható.

A „Hosszú időtartamú vizsgálatok a telítetlen talajzónában végbemenő természetes szennyezőanyag lebomlás és a megkötés értékeléséhez” című kutatási jelentés alapján írták:

Prof. Dr. Jürgen Warrelmann, Dipl.-Geol. Klaudia Hettwer,  
Prof. Dr. Wolfgang Heyser  
Brémai Egyetem Környezetkutatási és Környezettechnológiai Központ

Prof. Dr. Wilhelm Püttmann, Dipl. Geol. Simone Gaab,  
Johann Wolfgang Goethe Universität, Frankfurt am Main

Uwe Drewes, Alphacon GmbH, GanderKesee

Dipl.-Geol. Dieter Vehlhaber, Büro für Umweltgeologie, Hude

A magyar változatot szaklektorálta:  
**Anton Attila**

Fordította:  
**Pálos Endre**

A magyar változatot a Környezetvédelmi és Vízügyi minisztérium 1011 Budapest, Fő u. 44-50. Vízügyi Szakállamtitkársága megrendelésére az Elektrotérség Fejlesztési Kkt. 1061 Budapest VI. Andrásy út 8. készítette.

## Tartalomjegyzék

	Bevezetés a magyar változathoz	5
1.	Célkitűzés, alkalmazási terület	6
2.	Fogalom meghatározások	7
3.	A természetes szennyezőanyag lebomlási és megkötési folyamatok hasznosítása valószínűsíthetően szennyezett területek és tényleges kör- nyezeti károk mentesítésekor	10
3.1	Célkitűzés, az alkalmazás alapesetei	10
3.2	A természetes lebomlási és megkötési folyamatok számításba vétele a valószínűsíthetően szennyezett területek és tényleges környezeti károk mentesítésekor	11
3.2.1	Előzetes vizsgálat, a szennyezés történeti vizsgálata	11
3.2.2	Felderítő vizsgálat	11
3.2.3	Részletes tényfeltárás	11
3.2.4	A kármentesítési műszaki beavatkozás tervezése, kivitelezése és a be- avatkozás utáni tevékenységek (monitoring)	12
3.3	A természetes szennyezőanyag csökkenés felhasználásának alapfeltét- elei	13
3.3.1.	A szennyező forrásra vonatkozó intézkedések	13
3.3.2.	A tényfeltárás minimális szintje	14
3.3.3.	A természetes szennyezőanyag lebomlás és megkötés térbeli és időbeli előre-jelvezhetősége, ellenőrizhetősége	18
3.3.4.	A kármentesítési célok elérésének időtartam vonatkozásai	19
3.3.5.	A kármentesítés eredményességének ellenőrzése, beavatkozási kritériu- mok és lehetőségek, alternatív beavatkozási koncepciók	19
3.3.6.	Az egyedi esetre jellemző adottságok értékelése	20
3.3.7.	A kármentesítési célkitűzés elérésének bizonytalansága	21
4.	A szennyezett talajok telítetlen zónájára jellemző szennyezőanyag le- bontási és megkötési potenciál értékelésének szakmai alapjai	23
4.1.	A természetes szennyezőanyag lebomlás és megkötés fontosabb para- méterei	23
4.1.1.	A szennyeződés állapota, szennyezőanyag-leltár	23
4.1.2.	A kármentesítési helyszín hidrogeológiai jellemzői	27
4.1.3.	A talaj jellemzői és hatásuk a lebomlási és megkötési folyamatokra	28
4.1.4.	A fizikai kémiai paraméterek	31
4.1.5.	Biológiai paraméterek	37
4.1.6.	A talaj, a talajlevegő, a szivárgóvíz és a talajvíz paramétereinek vizsgá- lata egy ásványolaj eredetű szénhidrogén + BTEX szennyezés példáján	39
4.2.	A telítetlen és a telített talajzóna közötti kölcsönhatások	48

5.	A telítetlen talajzónában végbemenő természetes szennyező lebomlási és megkötési folyamatok igazolásának, és a koncentrációcsökkenés analitikai ellenőrzésének vizsgálati programja egy TPH + BTEX szennyezés példáján keresztül	50
5.1.	Minőségbiztosítás a vizsgálati program keretében	50
5.1.1.	A vizsgálati programmal szemben támasztott minimális követelmények	52
5.1.2.	A mintavétel és a mintakezelés módszerei	55
5.1.3.	A helyszíni vizsgálatok eljárásai, a kémiai-analitikai vizsgálati eljárások	57
5.2.	A hosszú időtartamú vizsgálatok lefolytatása	60
5.2.1.	Kiinduló vizsgálatok	61
5.2.2.	A beavatkozási monitoring	61
5.2.3.	A befejező vizsgálatok	62
5.3.	Mintavételi terv	62
5.3.1.	A talaj-, talajlevegő-, szivárgóvíz- és talajvíz-vizsgálatok során mért paraméterek	62
5.3.2.	Talaj, talajlevegő, szivárgóvíz és talajvíz mintavételi helyek	62
5.3.3.	Talaj, talajlevegő, szivárgóvíz és talajvíz mintavétel és minta előkészítés	64
5.4.	A vizsgálati terv és a mérési adatok minősége (megbízhatósága)	65
5.4.1.	A helyszíni és laborvizsgálatok vizsgálati tervei, vizsgálati eljárásai	65
5.4.2.	A mérési eredmények minőségének értékelése	68
5.5.	A vizsgálati eredmények értékelése	70
6.	A terület természetes szennyezőanyag lebontási és megkötési potenciáljának jellemzése	71
7.	Irodalomjegyzék	76

## Bevezetés a magyar változathoz

A kármentesítési intézkedésre vonatkozó döntéshozatalkor a természetes regenerálódás lehetőségét a felszín alatti vizek védelméről szóló 219/2004. (VII. 21.) Kormányrendelet 19/A. (1) bekezdés szerint mérlegelni szükséges. A természetes lebomlás fontosságának növekedése és gyakorlati alkalmazásának térhódítása várható a jövőben. Ennek egyik oka a költséghatékonyság. Emellett környezetbarát kármentesítési lehetőséget is jelent a természetes lebomlás felhasználása, mivel a természet öngyógyító képességén alapul. A környezet radikális megváltoztatása nélkül teszi lehetővé egyes esetekben a kármentesítési célok elérését.

Az Útmutató magyar változatának egyik célja a környezetvédelmi hatóságok munkájának segítése a monitorozott természetes szennyezőanyag lebomlás hasznosítási lehetőségének megítélésében, a kármentesítésekre vonatkozó határozathozatalkor. A megalapozott hatósági döntéshozatalhoz nélkülözhetetlen a terület természetes szennyezőanyag lebontási potenciáljának jellemzése és a természetes lebomlási folyamatok kvalitatív és kvantitatív értékelése. Az Útmutató részletes leírást közöl ennek eljárási elemeiről, bemutatja a döntéshozatalhoz szükséges eljárásrendet: a kritérium- és folyamatparaméter rendszert és a lebomlási folyamatokat jelző indikátorokat is. Az Útmutató a telítetlen talajzónában lejátszódó folyamatokat tárgyalja, a telített talajzóna folyamataira csak annyiban tér ki, amennyiben a telítetlen és telített zónák közötti kölcsönhatás ezt elengedhetetlenné teszi. A telített talajzóna lebomlási folyamatainak értékeléséhez szükséges szakanyagok Németországban már korábban megjelentek.

Az Útmutató a német jogi és szakmai szabályozás alapján készült és annak előírásaira hivatkozik. A kármentesítéshez kapcsolódó német jogi szabályozás a hazaitól szerkezetében eltérő, tartalmában azonban hasonló. A kármentesítésre vonatkozó magasabb szintű jogi szabályozások a német Szövetségi Talajvédelmi Törvényben kaptak helyet. Ezek jelentős része a hazai jogszabályi rendszerben a felszín alatti vizek védelméről szóló 219/2004. (VII. 21.) Kormányrendeletben található. Az Útmutatóban leírtak alkalmazásához szükséges hazai jogszabályi előírások a kármentesítésre vonatkozó jogszabályokban rendelkezésre állnak. A hivatkozott német szakmai szabályozások – segédletek, stb. – a szakirodalom-jegyzékben azonosítható forrásokban találhatóak. A vizsgálati eljárások esetében hivatkozott DIN, ISO szabványok általában ismeretesek és jelentős részben használatosak a hazai gyakorlatban. A megfelelő magyar szabványok általánosan alkalmazottak és elérhetőek.

Az Útmutató magyar változata a német jogszabályi anyagokra vonatkozó utalásoknál – amennyiben a tartalmi hasonlóság ezt megengedi – a vonatkozó magyar jogszabályhelyet, elsősorban a 219/2004. (VII. 21.) Kormányrendelet és a 6/2009. (IV. 14.) KvVM-EüM-FVM együttes rendelet vonatkozó paragrafusait lábjegyzetben közli. A német szakanyagokra való hivatkozások esetén amennyiben rendelkezésre áll megfelelő tartalmú magyar szakanyag, erre szintén lábjegyzetben utalunk. Egyes esetekben a Kármentesítési kézikönyv és Kármentesítési útmutató kiadványsorozat köteteire is ilyen módon, lábjegyzetben hívjuk fel a figyelmet, mint az adott témakörhöz információt biztosító magyar nyelvű forrásra.

## 1. Célkitűzés, alkalmazási terület

Az előttünk fekvő Útmutató elsősorban a talajvédelemért felelős német tartományi hatóságok számára készült, emellett a kármentesítésre kötelezetteknek, a környezeti tényfeltárásokon és káreseteken dolgozó tanácsadóknak és tervezőirodáknak is szól.

Az Útmutató műszaki-tudományos segítséget nyújt a telítetlen talajzónában végbemenő természetes szennyezőanyag lebomlás és szennyezőanyag megkötés értékeléséhez. Ennek keretében egy gyakorlatban kipróbált eljárásmodot ismertet és a természetes lebomlási és megkötési folyamatokra befolyást gyakorló releváns tényezők, paraméterek meghatározására szolgáló általánosan elfogadott módszereket mutat be.

Az Útmutató kizárólag olyan lebomlási és megkötési folyamatok értékelésével foglalkozik, melyek külső befolyás nélküli természetes feltételek mellett mennek végbe.

Elsősorban az ásványolaj eredetű szénhidrogének és a monoaromás szénhidrogének (BTEX) szennyezőanyag csoportokra vonatkozik az Útmutató, miután a hátrahagyott környezeti károk és a káros talaj elváltozások esetében ezek az anyagcsoportok különösen gyakran fordulnak elő. Ugyanakkor ezeknek az anyagoknak a természetes lebomlása a környezeti elemekben megfelelően bizonyított.

A jelen Útmutató súlyponti része a telítetlen talajzóna szennyeződéseivel foglalkozik. A telített talajzónával fennálló kölcsönhatásokra is kitér azonban, különösen abban a tekintetben, hogy a telített talajzóna a szennyezőanyagok egyik lehetséges távozási útvo-nala (lásd 4.2. fejezet).

Az Útmutató szakmai alapját elsősorban Németország Környezetvédelmi Hivatala (Umweltbundesamt) kutatási projektjének „Hosszú időtartamú vizsgálatok a telítetlen talajzónában végbemenő természetes szennyezőanyag lebomlás és a szennyező megkötés értékeléséhez” című kutatási zárójelentésében [1] leírt eredmények, és az ehhez kapcsolódó szakirodalmi kutatások [2] képezik. Összehasonlítás céljára szolgáltak emellett segédletekből, szabványokból származó adatok és a talajvízben végbemenő természetes lebomlási és megkötési folyamatokra vonatkozó segédletek is [3, 4, 5, 6].

## 2. Fogalom meghatározások<sup>1</sup>

Az Útmutatóban használt – a talajvédelemre és hátrahagyott környezeti károkra vonatkozó német jogszabályban nem szereplő – egyes fogalmak magyarázatát az alábbiakban adjuk meg.

Az Útmutatóban az egyes szakkifejezéseket a magyar szaknyelvben használatos és elfogadott értelmezés szerint használtuk. A tárgykör egyes speciális kifejezéseit az alábbiakban definiáljuk. A mikrobiológia tudományágában használatos egyes további fogalmak, mint a kometabolizmus, szulfátredukció, nitrifikáció, stb. értelmezései a „Kármentesítési kézikönyv 5. Bioremediáció: mikrobiológiai kármentesítési eljárások” című kiadványban, annak 2. fejezetében található meg.

Terjedési útvonal: a szennyezőanyag telítetlen talajzónából a határoló közegek, környezeti elemek (talajvíz, légkör) felé irányuló útja.

Biológiai paraméter: a talajorganizmusok anyagcseréjének mutatója.

Biológiai elérhetőség, biológiai rendelkezésre állás: Biológiai elérhetőségen azt értjük, hogy a lebontandó anyag a folyamatban résztvevő organizmus számára közvetlenül hozzáférhető. A talajban az egyes anyagok (például a szennyezőanyagok) biológiai elérhetősége a talajmátrixhoz való adszorpció, vagy a mikropórusokba való bezáródás, vagy lerakódás által lecsökkenhet.

Talajparaméter: egy adott hely releváns talaj jellemzői.

Elektron donor, vagy elektronleadó anyagok olyan szerves, vagy szervetlen anyagok, melyek a biológiai anyagcseréhez energetikailag szükséges elektronokat (redukciós ekvivalenseket, egyenértékeket) szolgáltatják. Ennélfogva a lebomlási folyamatokhoz nélkülözhetetlenek. Szennyezőanyagok (például szénhidrogének) is szolgálhatnak elektron donorként.

Elektron akceptor: Az elektron akceptorok (elektronfelvevők) olyan vegyületek, melyek az elektronokat az organizmusok légzési folyamatláncából felveszik és ezért nélkülözhetetlenek a biológiai energiatermelés számára nélkülözhetetlenek. A legfontosabb elektron akceptor a molekuláris oxigén. Anaerob feltételek mellett azonban nitrát, szulfát, széndioxid és szerves közbenső anyagcsere-termékek is szerepelhetnek. Szennyezőanyagok is működhetnek elektron akceptorként (elektron felvevőként), például a tetraklór-etilén.

\*Szennyező anyag: a talajvédelemre és hátrahagyott környezeti károkra vonatkozó német szövetségi jogszabályban (BBodSchV) szereplő károsanyag kifejezés szinonimája.

\*Szennyezés: a talaj, a víz, vagy a levegő szennyeződése, a fenti vonatkozó jogszabályoknak megfelelően.

---

<sup>1</sup> A felsorolás az Útmutató német fogalom meghatározásait tartalmazza.

A \*-gal jelölt fogalmakra a 219/2004. (VII. 21.) Kr. 3. § más megfogalmazású értelmezést ad meg.

Metabolitok: A kifejezést a kiadványban nem a szokásos tágabb anyagcsere-termék értelemben használják. Metabolitnak az anyagcsere olyan közbenső termékeit nevezik, amelyek vagy további átalakuláson mehetnek át (energia-anyagcsere, sejtépítő anyagcsere), vagy pedig további reakciókban nem vesznek részt (nem teljes lebomlás). A nem teljes lebomlás esetén olyan közbenső anyagcsere-termékek keletkezhetnek, melyek toxikusabbak, mint a kiinduló vegyületek.

\*Monitoring: az az eljárás, melynek során a szennyezett terület természetes lebomlási és megkötési folyamatait előre meghatározott vizsgálati időszak alatt figyelemmel kísérik (hosszú időtartamú vizsgálatok). A monitoring három részből áll, a kiinduló vizsgálatból, a folyamat monitoringból, melynek során a szennyezőanyag-tartalom prognosztizált változását ellenőrzik, és a záró vizsgálatból.

Természetes szennyezőanyag lebomlás és megkötés: Ez a fogalom olyan fizikai, kémiai és biológiai folyamatokat foglal magába, amelyek a talajban, vagy talajvízben lévő anyag tömegének, toxicitásának, mobilitásának, vagy koncentrációjának a csökkenését eredményezik emberi beavatkozás nélkül. A fogalom meghatározás szakmai megalapozása két forrásanyagból származik. Egyrészt az Egyesült Államok Környezetvédelmi Hivatalának (US EPA) OSWER segédletén alapul, amely ezeket a folyamatokat „Natural Attenuation” (természetes csökkenés) kifejezéssel írja le [8]. Másrészt a Német Szövetségi és Tartományi Talajvédelmi Munkaközösség (LABO) segédletére támaszkodik, amely ezeket a folyamatokat a „Natürliche Schadstoffminderung” (természetes szennyezőanyag csökkenés) fogalommal jelöli [3].

Utógondozás: Az utófelügyelet a hátrahagyott környezeti kár kezelésének azt a lépése, amelyet egy kármentesítési intézkedés, vagy kármentesítési részművelet után abban az esetben hajtanak végre, ha a fennmaradt szennyeződési potenciál miatt hosszú időtávon szükséges a hatásútvonal felügyelete [8]. Az utómonitoring előfeltétele az, hogy hosszú távon már nem prognosztizálható kockázat. Az utófelügyelet magába foglal minden felügyeleti tevékenységet, amely ahhoz szükséges, hogy a kármentesítési helyszín jellemzőinek jövőbeni változásait és a mérvadó hatásútvonalakon keresztül az érintett védendő közeg felé irányuló szennyeződés-terjedést a rejtett kockázatok újrakeletkezése, vagy áthelyeződése tekintetében ellenőrizni tudjuk.

Fizikai-kémiai paraméter: az éghajlati és környezeti tényezők, valamint az elektron donorok, az elektron akceptorok és a tápanyagok csoportja.

Kármentesítési cél, célok: a kármentesítés helyszínének a kármentesítés lezárása utáni célállapota. A kármentesítés célját/céljait az illetékes hatóság határozza meg és a kármentesítési terv rögzíti. A kármentesítési célkitűzés lehet helyszínorientált (például amennyiben a helyszín szennyezés terhelésének meghatározott célértéke alatt marad) és/vagy védendő közegre orientált.

Helyszínparaméterek: azok a paraméterek, amelyek a szennyezett helyszín és környezete geológiai és hidrogeológiai viszonyait jellemzik.

---

A \*-gal jelölt fogalmakra a 219/2004. (VII. 21.) Kr. 3. § más megfogalmazású értelmezést ad meg.

Telítetlen talajzóna: A vízzel nem telített talajzónán a talajvízvezető (vízadó) talajréteg feletti, talajvizet nem tartalmazó talajrétegeket kell érteni. Ezek a különböző talajszintekből és a telített talajzónával határos kapilláris zónából állnak.<sup>2</sup>

Telített talajzóna: A vízzel telített talajzóna alatt a talajvizet vezető (vízadó) talajrétegek értendők. Ezeket felül a talajvízszint, alul a talajvízzáró réteg határolja. A talajvízszint (talajvíztükör) helyzetének ingadozásai (változó talajvízállás) miatt a telített talajzóna térbeli és időbeli változásoknak van kitéve.<sup>3</sup>

---

<sup>2</sup> Az elfogadott hazai definíció szerint a telítetlen talajzóna mindhárom (szilárd, folyékony és légnemű) fázist tartalmazó zóna, amely a felszíntől a kapilláris szintig tart.

<sup>3</sup> A telített zóna a kapilláris víz szintjétől a vízzáró fekéig tartó kétfázisú talajszelvény.

### **3. A természetes szennyezőanyag lebomlási és megkötési folyamatok hasznosítása valószínűsíthetően szennyezett területek és tényleges környezeti károk mentesítésekor**

A valószínűsíthetően szennyezett területek és a tényleges környezeti káresetek mentesítésének megoldásakor az adott feltételek mellett lejátszódó természetes szennyező lebomlási és szennyező megkötési folyamatok hasznosítása ökológiai és közgazdasági okokból is elkerülhetetlen (lásd 3.3. fejezet). Az alábbiakban bemutatjuk, hogy az Útmutató a kármentesítés mely szakaszaiban, milyen módon nyújt műszaki-tudományos segítséget.

#### **3.1. Célkitűzés, az alkalmazás alapesetei**

A természetes szennyezőanyag lebomlási és megkötési folyamatok hozzájárulhatnak a védendő közegek kockázatainak csökkentéséhez, a természetes talajfunkciók helyreállításához és a kármentesítési célok eléréséhez. Különös jelentősége van ezen belül a szennyező anyagokat lebontó mikrobiológiai folyamatoknak, mivel ezek irreverzibilisek, azaz vissza nem fordíthatók. A természetes szennyezőanyag megkötés bizonyos szennyezőanyagok, vagy szennyezőanyag frakciók (például hosszú szénláncú szénhidrogének) esetében és a helyszín megfelelő környezeti feltételei mellett alkalmas a szennyezőanyag terjedésének csökkentésére és így a védendő közegek kockázatának mérséklésére. A szennyezőanyag megkötés során vagy a szennyező anyagokat véglegesen megkötő irreverzibilis (vissza nem fordítható) folyamatok mennek végbe, vagy olyan reverzibilis (megfordítható) folyamatok játszódnak le, melyek a szennyezőanyagok továbbszállítását késleltetik, ezzel például a telítetlen talajzónában végbemenő lebomlást elősegítik.

A természetes szennyezőanyag lebomlási és megkötési folyamatok

- hasznosíthatók egy összetett kármentesítési intézkedés részeként kármentesítési műszaki intézkedésekkel kombinálva (szennyezés-mentesítés, vagy lokalizálás). Ez történhet például a szennyezés-mentesítés befejező szakaszában, amikor az előrejelzés szerint a fennmaradt szennyező koncentráció esetén a természetes lebomlási folyamatok hatása elegendő a szennyezőanyag csökkentéséhez. Hozzájárulhatnak a természetes szennyezőanyag lebomlási és megkötési folyamatok a kármentesítési cél eléréséhez olyan módon is, hogy a szennyezett terület egy részén alkalmazzuk azokat. Így például, amikor egy horizontális rétegben elkülönülő térfogatrésznél a nagymértékben szennyezett felszín közeli réteget talajcserével kármentesítjük, a kisebb mértékben szennyezett, mélyebben fekvő talajréteget eredeti helyén hagyjuk.
- bizonyos feltételek mellett megfelelőek lehetnek önmagukban is a kármentesítési célkitűzések elérésére és a talajfunkciók helyreállítására.

### **3.2. A természetes lebomlási és megkötési folyamatok számításba vétele a valószínűsíthetően szennyezett területek és tényleges környezeti károk mentesítésekor**

Az alábbiakban röviden bemutatjuk, hogy a természetes szennyezőanyag lebomlási és megkötési folyamatok miképpen vehetők számításba a valószínűsíthetően szennyezett területek és tényleges környezeti károk több szakaszban történő kármentesítésekor.

#### **3.2.1 Előzetes vizsgálat, a szennyezés történeti vizsgálata**

Gyakorlati tapasztalat alapján javasolható, hogy már a lehető legkorábbi vizsgálat, vagyis a valószínűsíthetően szennyezett terület, illetve hátrahagyott környezeti kár előzetes vizsgálata terjedjen ki a helyszín egyszerűen hozzáférhető adataira, hidrogeológiai jellemzőire (talajtípus, a telítetlen talajzóna vastagsága, talajvízszint, talajvízhozam), melyek a talaj természetes lebomlási és megkötési folyamatainak teljesítőképességére vonatkozó következtetések levonását lehetővé teszik. Ezeket a helyszín jellemzőket már a mintavétel nélküli első értékelés során is figyelembe kell venni.

#### **3.2.2 Felderítő vizsgálat**

A helyszínre jellemző természetes lebomlási és megkötési folyamatok lehetősége adott esetben a felderítő tényfeltárás keretében egyszerű és költségtakarékos kiegészítő vizsgálatokkal ellenőrizhető, például a talajlevegő oxigén- és széndioxid koncentrációjának helyszíni mérésével.

#### **3.2.3 Részletes tényfeltárás**

A telítetlen talajzóna lebontó és megkötő hatását a valószínűsíthetően szennyezett területről a talajvízbe irányuló anyagtranszport közelítő meghatározásakor abban az esetben kell számításba venni, amennyiben

- olyan konkrét adatok állnak rendelkezésre, amelyek kielégítően megalapozzák a káros talajelváltozás, vagy a hátrahagyott környezeti kár gyanúját és emellett
- információk állnak rendelkezésre a természetes lebomlási és megkötési folyamatok lejátszódására a telítetlen talajzónában a helyszínen.

A szennyezőanyag mennyiségét csökkentő folyamatok meghatározásához szükséges vizsgálatoknál különösen jól felhasználható a jelen Útmutató műszaki tudományos segédletként. Ebben az esetben az 5. fejezetben javasolthoz hasonló vizsgálati programot célszerű alkalmazni.

Amennyiben jelentős intenzitású természetes lebomlási és megkötési folyamatok játszódnak le a kármentesítés helyszínén, és a végleges kockázatbecslés szerint a valószínűsíthetően szennyezett terület jelenleg és a jövőben sem jelent kockázatot a védendő közegek szempontjából, akkor ésszerű a szennyezőanyag bekövetkező változásait az Útmutatóban javasolt módon monitorozni. Különösen azokban az esetekben ésszerű így eljárni, amikor egyébként is terveztek monitoringot (a hatásútvonalak, területhasznál-

tok és más keretfeltételek felügyeletére) annak érdekében, hogy a jelenlegi kockázati helyzet jövőbeli fennmaradását vizsgálattal támasszák alá.

### **3.2.4 A kármentesítési beavatkozás tervezése, kivitelezése és a beavatkozás utáni tevékenységek (monitoring)**

Amennyiben a kármentesítés szükségessége megállapítható és a megelőző vizsgálatok számottevő természetes lebomlási folyamatok lejátszódását igazoló adatokat szolgáltatnak, akkor ezeket a folyamatokat a kármentesítés egyes szakaszaiban az alábbiak szerint lehet figyelembe venni.

- A kármentesítési beavatkozás tervezése

A kármentesítési tervet megalapozó vizsgálat az alkalmas, szükséges és célszerű intézkedések meghatározására is szolgál. A vizsgálat arra az eredményre is vezethet, hogy a kármentesítési beavatkozási intézkedések (szennyezés-mentesítés, lokalizálás) a kármentesítési célkitűzések eléréséhez csak egyes részterületeken nélkülözhetetlenek, vagy az adott feltételek mellett egyáltalán nem szükségesek. Ésszerű lehet ilyenkor a helyszínrre jellemző természetes lebomlási és megkötési folyamatokat az összetett kármentesítési intézkedés részelemeként (más műszaki intézkedésekkel együttesen), vagy önálló alternatívaként hasznosítani. Ennek előfeltétele az adott terület valamennyi kockázati tényezőjének vizsgálata és értékelése. Önálló alternatívaként akkor lehetséges hasznosítani a természetes szennyező lebomlást és megkötést, ha előre látható, hogy a szennyeződés fajtája, mértéke és terjedése, valamint a kármentesítési helyszín adottságai és a rendelkezésre álló időkeret lehetővé teszik, hogy ezek a természetes a folyamatok a kitűzött kármentesítési célok eléréséhez szükséges mértékben végbemenjenek.

A bemutatott vizsgálati program (lásd 5. fejezet) segítséget nyújt eldönteni, hogy a kármentesítési intézkedések kombinálhatók-e a területre jellemző természetes lebomlási és megkötési folyamatokkal, illetve adott esetben ez utóbbiak elegendők-e önmagukban a kármentesítési célok eléréséhez. Ezen vizsgálat többletköltsége áll szemben a kármentesítés kivitelezésének esetleges költségmegtakarításával.

Amennyiben döntés született, hogy a területre jellemző természetes lebomlási és megkötési folyamatokat a kármentesítési intézkedés részeként, vagy a műszaki beavatkozás helyett felhasználják, akkor ennek megfelelően kell kidolgozni a beavatkozási tervet (a német Talajvédelmi törvény /BBodSchV, [7]/ 3. melléklete 2. pontjának, illetve a 219/2004. (VII. 21.) Kr. 8. Melléklet előírásainak figyelembe vételével)<sup>4</sup>. A kármentesítési műszaki beavatkozási terv külön fejezetében be kell mutatni a természetes folyamatok hozzájárulását a kármentesítési célkitűzések eléréséhez, és a természetes folyamatok hatásának ellenőrzéséhez szükséges méréseket és vizsgálatokat is (Ugyanez érvényes a kármentesítési célkitűzések el nem érése, vagy nem időben történő elérése esetén esetleg szükséges műszaki beavatkozási intézkedésekre, vagy alternatív intézkedésekre is (lásd 3.3.5 fejezet).

---

<sup>4</sup> A természetes regenerálódás lehetőségének vizsgálatát a 219/2004.(VII. 21.) Kr. 19/A. (1) bekezdése alapján mérlegelni szükséges.

- A kármentesítési beavatkozás kivitelezése

A kármentesítési beavatkozás kivitelezése a természetes lebomlási és megkötési folyamatokon alapul. A műszaki beavatkozási tervnek megfelelően a folyamatok várt hatásának ellenőrzéséhez szükséges méréseket és vizsgálatokat is magába foglalja a beavatkozás.

Amennyiben kiderül, hogy a természetes lebomlási és megkötési folyamatok hatása az előre jelzettől jelentősen eltér, és az a kármentesítés céljainak elérését veszélyezteti, végre kell hajtani a műszaki beavatkozási tervben bemutatott kármentesítési beavatkozást, vagy alternatív intézkedéseket.

- A beavatkozás utáni tevékenységek

Az esetlegesen szükséges beavatkozás utáni intézkedések optimalizálásához kiemelten ajánlott a természetes lebomlási és megkötési folyamatok figyelembevétele.

### **3.3. A természetes szennyezőanyag csökkenés felhasználásának alapfeltételei**

Meg kell vizsgálni, hogy a telítetlen talajzóna természetes szennyező lebomlási és megkötési folyamatai önmagukban, vagy más kármentesítési beavatkozási intézkedésekkel együtt hozzájárulhatnak-e a kármentesítés céljainak eléréséhez. Ennek eldöntését az alábbi alapfeltételek teljesülése esetén tudjuk megtenni:

#### **3.3.1 A szennyezőforrásra vonatkozó intézkedések**

A mobilis és immobilis szennyezőanyag fázisokat, valamint a telítetlen és telített talajmátrixban elhelyezkedő szennyező anyagokat nevezik szennyezőforrásnak a német szakanyagok [3].<sup>5</sup> Eszerint – a szennyezés körülményeitől függően – a telítetlen talajzóna teljes szennyezett térfogatrésze, vagy a szennyezés egyes részterületei, résztérfogatai is szennyezőforrásnak tekinthetők.

A környezeti kockázat elhárítására szolgáló intézkedést megalapozó döntés elsősorban a kockázati helyzettől, de emellett a szennyezettség mértékétől és kiterjedésétől is függ. Ebből a szennyezőforrás kármentesítésére vonatkozó intézkedések következő lehetséges beavatkozási stratégiái adódnak:

1. A teljes szennyezett tartományt szennyezés-mentesítési, vagy lokalizációs műszaki beavatkozással kármentesítik.
2. Csak azokat a nagyobb mértékben szennyezett zónákat kármentesítik aktív beavatkozási intézkedéssel, amelyekben a természetes lebomlási és megkötési folyamatok egyedül nem elegendőek a kármentesítés célkitűzéseinek eléréséhez és a talajfunkciók helyreállításához. A kisebb mértékben szennyezett térfogatrészekben a természetes lebomlási és megkötési folyamatok prognosztizált hatása elegendő a kármentesítési célok

---

<sup>5</sup> A szennyező forrás hazai jogszabályi definíciója a 219/2004. (VII. 21.) Kr. 3. § 40.-ban található.

eléréséhez és a talajfunkciók helyreállításához. A folyamatok hatását az adott esethez tervezett monitoring programmal igazolják.

3. Kármentesítési beavatkozásra nem kerül sor. A területre jellemző szennyezőanyag lebomlási és megkötési folyamatok hatásának értékelése arra az eredményre vezetett, hogy ezek a teljes szennyezett területen elegendőek a kármentesítési célok eléréséhez és a talajfunkciók helyreállításához. A folyamatok prognosztizált hatását az illető esethez tervezett monitoring programmal igazolják.

A kármentesítési stratégiához igazodnak a szennyezőanyag forrás jellemzésére vonatkozó követelmények. Mindegyik esetben ismerni kell a szennyezőforrás pontos elhelyezkedését. Emellett, ha műszaki beavatkozási intézkedésre nem kerül sor, a jelenlévő szennyezőanyag mennyiségével és a szennyezésterjedési viszonyokkal is tisztában kell lenni. Mindezekre az ismeretekre akkor is szükség van, ha csupán egyes részterületek kármentesítése a cél, mivel csak ezek alapján hozható meg a műszaki intézkedéssel mentesítendő, vagy lokalizálandó terület részre vonatkozó döntés.

A kármentesítési beavatkozás stratégiájának meghatározásakor nem csak a kármentesítési cél elérését kell figyelembe venni, hanem időszükségletét is. Ez a teljes, vagy részleges műszaki beavatkozás esetében rövidebb, mint a természetes szennyezőanyag lebomlási és megkötési folyamatok eredményeképp várható időtartam.

### **3.3.2 A tényfeltárás minimális szintje**

#### **A talaj jellemzői a kármentesítés helyszínén**

A helyszín szennyezett talajának tulajdonságai befolyásolják a végbemenő természetes lebomlási és megkötési folyamatokat. Ezért ismerni kell a talaj következő paramétereit: talajtípus/talajféleség (beleértve a szemcseméret eloszlást és a humusz-tartalmat), a talaj pH-értéke, tápanyagellátás (nitrogén-, foszfor- és makroelem-tartalom), talajnedvesség (víztartalom), agyagásvány-tartalom és a pórusrészfogat. A felsorolt paraméterekkel szoros kapcsolatban van a talaj fénoxidtartalma, kationcserélő kapacitása és sótartalma (szalinitása). Ezek a jellemzők szintén felhasználhatók a lebomlási és megkötési folyamatok kiértékelésekor. A talaj jellemző paraméterei és a telítetlen talajzónában végbemenő természetes lebomlási és megkötési folyamatok összefüggéseit részletesen a 4. fejezetben mutatjuk be.

#### **A kármentesítési helyszín térbeli jellemzői**

A természetes lebomlási és megkötési folyamatok végbemenetelét egy adott területen a helyszín térbeli jellemzői is befolyásolják. A természetes lebomlási és megkötési folyamatok értékelésekor ezért számításba kell venni a helyszín következő térbeli jellemzőit:

- A szennyezett terület nagysága:

Egy szórt jellegű, diffúz, nagy területen elhelyezkedő szennyeződés esetén a kármentesítési beavatkozás kivitelezése általában igen nehéz és költséges. Ezért ezek a keretfelté-

telek elősegíthetik a természetes lebomlási és megkötési folyamatok melletti döntést, vagyis a természetes lebomlási és megkötési folyamatok hasznosítását a kármentesítési intézkedés részeként, vagy a műszaki beavatkozás teljes elhagyását.

- A földtani közeg rétegfelépítése és rétegvastagsága:

A természetes lebomlási és megkötési folyamatok értékelésekor a telítetlen talajzóna teljes vastagságát (a talajvíztükör talajfelszíntől való távolságát), valamint az egyes rétegek felépítését és vastagságát is figyelembe kell venni. Az egyes rétegek kisebb térfogatrészekben belül is váltakozhatnak, így a folyamatok kiértékeléséhez fontos a rétegződés lehetőség szerint pontos ismerete.

A kármentesítési helyszín térbeli jellemzőivel összefüggésben állnak a terület hidrogeológiai paraméterei, például a szivárgási sebesség, a talajvíz utánpótlódás intenzitása, és a kapilláris emelkedés (a talaj mátrixpotenciálja, párolgás, transpiráció). Ezek szintén számításba vehetők a természetes lebomlási és megkötési folyamatok kiértékelésekor.

### **A szennyeződés jellemzői:**

- Szennyezők:

Jelentőségük és kármentesítési helyszíneken való gyakori előfordulásuk miatt az Útmutató elsősorban az ásványolaj eredetű szénhidrogének és a monoaromás szénhidrogének (BTEX) szennyezőanyag csoportjára vonatkozik. Más szennyezőanyag csoportok természetes lebomlása és megkötése is végbe mehet, így a policiklusos aromás szénhidrogének (PAH), a klórozott szénhidrogének, a poliklórozott bifenilek (PCB), az étervegyületek (metil-tercier-butiléter /MTBE/), fenolok, cianidok, és a robbanóanyag gyártással kapcsolatos vegyületcsoporté is. A nehézfémek, mint nem lebontható szennyezőanyagok, a megkötési folyamatoknak vannak kitéve. Ahhoz, hogy a felsorolt szennyezőanyag csoportokat a vizsgálat során figyelembe lehessen venni, pontosan ismerni kell a szennyezés összetételét, és rendelkezni kell az egyes anyagok lebomlási és megkötési jellemzőire vonatkozó megfelelő adatokkal. Ezekhez csak az adott eset egyedi vizsgálatával juthatunk hozzá.

- A fő szennyezők jellemzői és viselkedése

A mennyiségileg domináló szennyezőanyag csoport az adott helyszín fő szennyezője. A szennyezők egyes jellemzői összefüggésben vannak a természetes szennyezőanyag lebomlással és megkötéssel. Ismerni kell ezért az egyes szennyezőanyagok következő paramétereit: vízdoldhatóság, illékonyosság, szorpciós jellemzők, biológiai elérhetőség, biológiai lebonthatóság és a talajorganizmusokkal szembeni toxicitás.

- A szennyeződés kora és eloszlása a területen

Nem csupán a szennyeződés típusa és összetétele, hanem a szennyeződés kora és térbeli eloszlása is befolyással van a természetes lebomlás és megkötés minősítésének eredményére. A [2] szakirodalmi tanulmányban leírtak szerint az egyes szennyezőanyagok elemzési eredményeiből a szennyezés öregedésének mértékére és az ezáltal a továbbiakban még várható természetes lebomlásra következtetések vonhatók le. Emellett meg-

felelő szinten ismerni kell a szennyezőanyagok térbeli eloszlását, az ezt leíró horizontális és vertikális koncentráció-profilokat.

A koncentráció eloszlás alapján következtetni lehet egy esetleges szennyező gócra, ahol a koncentráció fiziológiai szempontból annyira kedvezőtlen, hogy megakadályozza a talajorganizmusok általi biológiai lebontást. Megkönnyítheti a döntést a viszonylag költséges műszaki beavatkozás elhagyása mellett, ha a szennyezőanyag nagy területen oszlik el, szórt jellegű (diffúz szennyezés), nincs kifejezett szennyező góc és a kármentesítési célok elérését belátható időn belül lehetővé teszik a természetes lebomlási és megkötési folyamatok.

### **A természetes szennyezőanyag lebomlási és megkötési folyamatok igazolása**

Ahhoz a döntéshez, hogy a természetes lebomlási és megkötési folyamatok adott esetben beépíthetők a kármentesítési stratégiába, előbb igazolni kell, hogy a lebomlási és/vagy megkötési folyamatok kielégítően végbemennek a kármentesítés céljának belátható időn belüli eléréséhez. A telítetlen talajzónában végbemenő természetes szennyezőanyag lebomlás és megkötés igazolásának egyik módszerét az Útmutató 5. fejezetében egy ásványolaj eredetű szénhidrogén + BTEX szennyezés példáján mutatjuk be.

Az igazoláshoz a telítetlen talajzónában a végbemenő szennyezőanyag csökkenés alapjául szolgáló folyamatokat kell azonosítani. Amennyiben a telítetlen talajzóna természetes folyamatai lényeges mértékben, igazolhatóan közrejátszanak a szennyezőanyagok megkötésében, azaz a szennyezőanyag talajvízbe jutásának csökkentésében, akkor vizsgálni kell ezeknek a folyamatoknak a beépítését a kármentesítési stratégiába. Ehhez kapcsolódóan kiemelt jelentősége van a talajvízbe jutó szennyezőanyag terjedésének. Amennyiben már a vizsgálat időpontjában is irányul szennyezőanyag transzport a talajvízbe, de a talajvízben végbemenő szennyezőanyag lebomlás a szennyezőanyag terjedését kimutathatóan korlátozza, akkor a megkötésen alapuló szennyezőanyag csökkentési stratégia követhető. Ezzel szemben, amennyiben csak a vizsgálatot követően lép fel várhatóan a talajvízbe irányuló szennyezőanyag transzport, akkor talajvízvédelmi megfontolásokból el kell tekinteni az előbbi kármentesítési stratégiától.

### **A helyszín és környezetének területhasználata**

A szennyezett terület korábbi, jelenlegi és jövőbeli jogi szempontból megengedett területhasználata befolyásolja a kiválasztandó kármentesítési stratégiát, beleértve a természetes lebomlási folyamatok hasznosítását is. A kármentesítési helyszín fenntartandó infrastrukturális jellege, mint például a beépítettség, burkolattal ellátott területek, utak, csatornarendszerek és más infrastrukturális létesítmények behatárolják, milyen kármentesítési műszaki beavatkozás alkalmazható. Ez elősegíti a döntést amellett, hogy a területre jellemző természetes lebomlási és megkötési folyamatokat használják a kármentesítési célok elérése céljából. Másrészt figyelembe kell venni a vizsgálat értékelésekor, hogy a terület infrastruktúrája a talaj természetes folyamatait jelentősen befolyásolhatja. Például a burkolattal ellátott területek alatt a talajba kevesebb víz és tápanyag jut be. Ez egyrészt korlátozhatja a biológiai szennyezőanyag lebomlást, más-

részt a szivárgóvíz transzportútvonalon a talajvízbe irányuló szennyezőanyag transzport csökkenhet, vagy megszűnhet.

A természetes lebomlás és megkötés beépítése a kármentesítési stratégiába (vagy akár a kármentesítési beavatkozási intézkedés teljes elhagyása) és az ehhez kapcsolódó keretfeltételek (például az időtartam szempontok) összeegyeztethetők kell legyenek a kitűzött kármentesítési célok elérése után tervezett területhasználattal. Így például a kármentesítési helyszínre vonatkozó, rövid időn belül megvalósuló fejlesztési terv a közeli határidő miatt elengedhetlenné teheti a kármentesítési beavatkozást.

### **Veszélyeztetett receptorok, kockázati helyzet**

A szennyezőanyagok okozta talajszennyezés potenciális veszélyhelyzetet idéz elő az ember, az állat- és növényvilág, valamint a talaj, a vizek és a levegő számára. A német talajvédelmi törvény (BBodSCHV) [7]<sup>6</sup> a szennyezőanyagok terjedésének és veszélyeztetett receptorokra gyakorolt hatásának expozíciós útként a talaj-ember közvetlen érintkezést, valamint a talaj-haszonnövény és talaj-talajvíz utat nevezi meg. Emellett a veszélyeztetett receptorokat differenciáltan kell kezelnünk. Így például a haszonnövény, mint veszélyeztetett receptor egyrészt a tápláléklánc részeként további receptorokra (ember, állat) gyakorolhat hatást, másrészt ki is kerülhet a táplálékláncból (például az energianövények).

A kármentesítési helyszín természetes lebomlási és megkötési folyamatainak hatását is figyelembe véve kell meghatározni a potenciálisan veszélyeztetett receptorokat, és szennyezőanyag általi veszélyeztetettségüket a kockázatbecslés folyamán (lásd 3.2.3. fejezet).

A természetes lebomlási és megkötési folyamatok egyaránt befolyást gyakorolnak a szennyezőanyagok receptorokban (talaj, víz) végbemenő terjedésére és a más receptorokba történő anyagátadásra is (például a növények anyagfelvétele, kipárolgás a légkörbe). A szennyezőanyagok természetes lebomlása és a megkötése általában csökkenti a receptorok veszélyeztetettségét. Ennek oka egyrészt, hogy a szennyezésterjedés a megkötési folyamatok miatt kisebb lesz, másrészt a szennyezőanyag megfogyatkozik a lebomlási folyamatok révén. A lebomlási folyamatokban azonban kedvezőtlen feltételek mellett olyan közbenső anyagcsere-termékek is képződhetnek, amelyek a kiinduló vegyületeknél magasabb toxicitásúak, és ezáltal a környezeti kockázati helyzetet ronthatják.

A természetes lebomlási és megkötési folyamatok hatását a kockázati helyzetre figyelembe kell venni (például a toxikus anyagcsere-termékek keletkezéséből adódóan). A vizsgálati program során ezért igazolni kell, hogy a kármentesítési terület és környezetének kockázati helyzete nem lesz rosszabb a korábinál a szennyezőanyagok toxicitásának, mobilitásának, vagy térbeli eloszlásának kedvezőtlen irányú változása miatt. Ennek igazolása az említett szempontok figyelembe vételével tervezett monitoring segítségével lehetséges.

---

<sup>6</sup> Lásd Kármentesítési Útmutató 7. A mennyiségi kockázatfelmérés módszertana.

### **3.3.3. A természetes szennyezőanyag lebomlás és megkötés térbeli és időbeli előrejelezhetősége, ellenőrizhetősége**

A kármentesítési célkitűzés belátható időn belüli elérhetőségének bizonyítása érdekében a természetes szennyezőanyag lebomlás és megkötés elvi igazolása mellett előrejelzést kell készíteni a szennyezőanyag csökkenés lefolyására. A telítetlen talajzónában végbemenő természetes lebomlási és megkötési folyamatok előrejelzése igen nehéz feladat, mivel a szennyezett talajok olyan összetett, többfázisú rendszerek, melyek szerves és szervetlen szilárd anyagokból, pórusokba zárt vízből, talajlevegőből állnak, és kisebb, vagy nagyobb mértékben összetett szennyezőanyag mátrixot tartalmaznak.

A telítetlen talajzóna bemutatott különleges jellemzői és a szennyezőanyagokkal lejátszódó igen összetett, kis térfogatrészekben belül is nagymértékben változó kölcsönhatások folytán – ellentétben, mint a telített talajzóna esetében – nem végezhető olyan modellezés, amely a szennyezőanyag térbeli terjedését és időbeli változását a teljes kármentesítési helyszínre kiterjedően leírná. Ebből az alábbi következtetések vezethetők le:

1. Az adott helyszín telítetlen talajzónájában végbemenő szennyezőanyag csökkenés egyetlen vizsgálati időpont adatai (a jelenlegi helyzet) alapján nem előrejelezhető. Ezeket az adatokat – attól függően, hogy milyen körüek és minőségűek – a várható szennyezőanyag csökkenés elnagyolt becslésére lehet csak felhasználni.
2. A telítetlen talajzónában végbemenő szennyezőanyag csökkenés előrejelzésének feltétele a releváns jellemzők (szennyezőanyagok, illetve az ezzel összefüggésben lévő indikátorok) egy meghatározandó vizsgálati időtartam alatt bekövetkező változásainak mérése. Erről az 5. fejezet ad tájékoztatást egy kármentesítési helyszín vizsgálati programjának példáján.

Egy adott szennyezett terület természetes szennyezőanyag lebomlásának és megkötésének értékeléséhez nem csupán a szennyezőanyag-tartalom időbeli, hanem lehetőség szerinti térbeli változásainak figyelemmel kísérése is szükséges. A vizsgálati programnak ezt a célkiűzést a mérési helyek számán, elhelyezésén és kiépítésén keresztül számításba kell vennie (lásd 5. fejezet).

Amennyiben az adott szennyezett területen a természetes lebomlási és megkötési folyamatok révén jelentős kockázatcsökkenés várható, akkor beavatkozási monitoringra van szükség a felállított előrejelzés ellenőrzése és adott esetben korrekciója érdekében.

A szennyezőanyag-tartalom változásának előrejelezhetőségét és ellenőrizhetőségét különböző tényezők jelentősen korlátozhatják:

1. a helyszín nagymértékben változó geológiai és talajtani jellemzőkből adódó kifejezett heterogenitása,
2. a hidrogeológiai viszonyok határozott időbeli dinamikája, például nagymértékben ingadozó talajvízszint,

3. összetett szennyezettség, például több egymástól független szennyező forrás (értsd: szennyezett talajrész, gócpont).

Amennyiben a 3.3.2. fejezetben leírt valamennyi további feltétel fennállása ellenére a fentiekben felsorolt okokból az adott helyszínen nem lehetséges a szennyezőanyag-tartalom változás előrejelzése és ellenőrzése, akkor nem szabad megbízni abban, hogy ezek a folyamatok elegendőek a kármentesítési célkitűzések eléréséhez és a talajfunkciók helyreállításához.

### **3.3.4. A kármentesítési célok elérésének időtartam vonatkozásai**

A természetes lebomlási és megkötési folyamatok hasznosítása kármentesítéskor egy adott helyszínen csak akkor ésszerű, ha a kármentesítési célkitűzések elérése és a talajfunkciók helyreállítása belátható időn belül lehetséges. Ezen időtartam alatt, de még a kármentesítési célok elérését követően is figyelemmel kell kísérni a kockázati helyzet esetleges változásait, vagyis a receptorok veszélyeztetettségét. Ezzel kapcsolatosan a következő kritériumoknak van jelentősége:

1. A szennyezésterjedési viszonyok megváltozása, melyet a szennyezők mobilitása jelez a talajvízben, a telítetlen talajzónában szivárgó vízben, és a talajlevegőben.
2. A szennyezés toxicitási jellemzőinek megváltozása, például toxikus anyagcsere-termékek (metabolitok) képződése miatt.
3. A kármentesítési helyszín, vagy környezete hasznosításának megváltozása.
4. A helyszín hidrogeológiai jellemzőinek megváltozása, például a talajvízszint közepes és hosszú időtávon várható megváltozása.

A kármentesítési célkitűzések elérésének időtartama adott esetben jelentősen lerövidíthető, ha a kármentesítési stratégia részeként, beavatkozási intézkedésekhez kapcsolva alkalmazzák a természetes lebomlási és megkötési folyamatokat. Ez oly módon valósítható meg, hogy a beavatkozás képezi a kármentesítés első szakaszát, vagy csak a szennyezés egyes részterületein, egyes zónáiban alkalmaznak műszaki beavatkozási intézkedést (lásd 3.3.1. fejezet).

### **3.3.5. A kármentesítés eredményességének ellenőrzése, beavatkozási kritériumok és lehetőségek, alternatív beavatkozási koncepciók**

Monitoringgal ellenőrizni kell a kármentesítési helyszínen végbemenő természetes szennyezőanyag lebomlás és megkötés kármentesítési stratégia részeként történő hasznosításának eredményességét. Az 5. fejezet egy ásványolaj + BTEX szennyezés esetének példáján mutatja be, hogy mit is foglal magába egy ilyen monitoring. Amennyiben a kármentesítési helyszín szennyezőanyag változásának előrejelzésétől eltérnek a monitoringgal meghatározott adatok, akkor meg kell vizsgálni, hogy a kockázati helyzet megváltozott-e. Hogyha a meghatározott és előre jelzett szennyezőanyag változás adatok közötti eltérés nem befolyásolta a kockázati helyzetet, vagyis a receptorok veszélyeztetettségét, akkor a szennyezőanyag-tartalom változás előrejelzését kell korrigálnunk és felülvizsgálnunk a kármentesítési célkitűzés elérése szempontjából.

A környezeti kockázati helyzet kedvezőtlenebbé válása esetén a kármentesítési tervben leírt intézkedési lehetőségek közül kell választani. A kármentesítési helyszín viszonyaitól függően a következő műszaki intézkedési lehetőségek jöhetnek szóba: talajkitermelés, *ex situ* szennyezőanyag-tartalom csökkentés, *in situ* szennyezőanyag-tartalom csökkentés, elzárás a környezettől (lokalizáció).

A kármentesítési műszaki beavatkozási tervben konkrétan le kell írni a kockázati helyzet kedvezőtlenebbé válását jelző beavatkozási kritériumokat és be kell mutatni a beavatkozási lehetőségeket is. Azoknak a mérési értékeknek a megállapításakor, amelyeknél a beavatkozási kritériumok teljesülnek, figyelembe kell venni, hogy a paraméterek értékei rövid távon ingadozhatnak a kármentesítési helyszín egyes jellemzőinek természetes változásai miatt, vagy a mintavétel, mintakezelés és a vizsgálat (elemzés) műszaki jellegű különbözőségei miatt. Ajánlatos ezért bizonyos idő elteltével a méréseket megismételni, hogy eldönthető legyen műszaki beavatkozásra, vagy alternatív intézkedésre van-e szükség. A beavatkozási intézkedések esetén is biztosítani kell, hogy a védendő receptorok és az aktuális, illetve engedélyezett területhasználatok számára ne keletkezzen kockázat.

### 3.3.6. Az egyedi esetre jellemző adottságok értékelése

Az illetékes hatóság feladata, hogy elbírálja az adott konkrét kármentesítési esetet a telítetlen talajzónában végbemenő természetes szennyezőanyag lebomlás és megkötés hasznosítása szempontjából. Akkor lehet ésszerű egy ilyen értékelés, amennyiben várható, hogy a természetes lebomlási és megkötési folyamatok lényegesen hozzájárulnak a kockázatcsökkentéshez, valamint a kockázati szint tekintetében lényeges alábbi keretfeltételek teljesülnek:

- fontos receptor közvetlen veszélyeztetése nem áll fenn,
- érzékeny területhasználat nincs (lakóterület, vagy védőterület), és a kármentesítési célkitűzés eléréséig terjedő időszakban nem terveznek lényeges változtatást a területhasználatban,
- a kármentesítési helyszín nem mondható kifejezetten heterogénnek, vagyis nincsenek nagymértékben változó geológiai, vagy talajtani jellemzői,
- szórt, diffúz jellegű, de azért lokalizálható szennyezettség, elkülöníthető (külön lehatárolható) szennyezőgóc/ok nélkül, különösen amennyiben a szennyezettség nagy területre terjed ki és az aktív beavatkozás alkalmazása magas kármentesítési költséggel járna,
- biológiailag jól lebontható anyagokból, anyagcsoportból álló szennyezett területről van szó,
- a biológiai lebomlás feltételei kedvezőek (a talaj jellemző paraméterei, a fizikai-kémiai paraméterek, biológiai jellemzők),
- nem várhatók toxikus bomlástermékek (közbenső anyagcsere-termékek, vagy végtermékek),
- nincs, vagy nagyon kismértékű a talajvíz felé irányuló szennyezőanyag transzport, és a talajvízzel történő szennyezésterjedés elhanyagolható mértékű,

- a kármentesítési helyszínen nem várhatók olyan hidrogeológiai változások, melyek a szennyezőanyag transzportra lényeges hatást gyakorolnának.

A lejátszódó természetes lebomlási és megkötési folyamatok hatékonyságának meghatározására szolgáló gyakorlati értékelési módszerek jelenleg még csak a talajvízszennyezésekre állnak rendelkezésre. A mennyiségi értékelési módszerek (például a Wiedemeier és társai [10] által kifejlesztett minősítési eljárás) nem vihetők át a telítetlen talajzóna esetére. Ezzel szemben a táblázatos döntési segédletek, mint a németországi Hessen Tartományi Környezetvédelmi és Geológia Hivatal kiadott "Segédlet a talajvízben végbemenő monitorozott természetes lebomlási és megkötési folyamatokhoz" [5], megfelelő mozgásteret hagynak az egyedi döntések számára, és analóg formában a jövőben elképzelhetők a telítetlen talajzóna szennyezéseinek vizsgálatához is. A döntési segédletek kidolgozásának előfeltétele, hogy a telítetlen talajzónában végbemenő lebomlási és megkötési folyamatokról rendelkezésre álló ismereteink tovább bővüljenek<sup>7</sup>.

### 3.3.7. A kármentesítési célkitűzés elérésének bizonytalansága

A kármentesítési célkitűzések elérésére és az ahhoz szükséges időtartamra vonatkozóan készítendő előrejelzés bizonytalanságokat tartalmaz. A bizonytalanságok előidéző okai a következők lehetnek:

- a szennyezőanyag csökkenés előrejelzésének a kármentesítési helyszín jellemzőiből adódó korlátozott lehetősége (például a földtani közeg inhomogenitása miatt), a 3.3.3. fejezetben leírtaknak megfelelően,
- a mintavétel és a mintakezelés alkalmazástechnikai eltérései, amelyek miatt nem valószínű mérési adatokból indulunk ki az előrejelzés számításakor,
- a kármentesítési helyszín paramétereinek értékeit befolyásolja a mintavételi technika, például időben egymást követően meghatározott talajparaméterek esetében a mintavételi hely közvetlen közelében végrehajtott korábbi szondázások hatást gyakorolhatnak az eredményre, amely ezáltal már esetleg nem jellemző a helyszínre,
- a vizsgálati és elemzési eljárások mérés technikai eltérései, melyek miatt az előrejelzés számításának alapadatai nem valószínű mérési adatok,
- a paraméterek változása az előrejelzéshez szükséges vizsgálat, mérés időpontjának a függvényében: számos paraméter évszaktól függő ingadozásait mindenképpen figyelembe kell venni.

Az előrejelzést adott esetben a beavatkozási monitoring közben az eredményeknek megfelelően szükséges módosítani. Felül kell vizsgálni, hogy a kármentesítési célok továbbra is elérhetőek-e, és milyen változások adódnak az előrejelzett időtartamra vonatkozóan. A szennyezőanyag-tartalom változás előrejelzése szempontjából emellett fontos, hogy a monitoring során meghatározott szennyezőanyag koncentráció változások szignifikáns nagyságúak-e. A szignifikancia igazolása érdekében statisztikai módszerek alkalmazhatók, amelyek megfelelő adatmennyiséget igényelnek. A „Hosszú időtartamú vizsgálatok a telítetlen talajzónában végbemenő természetes szennyező-

---

<sup>7</sup> A telítetlen talajzóna természetes lebomlási és megkötési folyamatainak mennyiségi értékelésére vonatkozó, [5]-nek megfelelő döntéstámogató segédanyag magyar nyelven nem jelent meg.

anyag lebomlás és a megkötés értékeléséhez” című kutatási projektben a következő eljárásokat alkalmazták:

- A mindenkori vizsgálati időpontban mért szennyezőanyag-tartalom középértékek szignifikáns eltérésének igazolása a megbízhatósági (konfidencia) intervallumok kiszámításával. Mivel a talaj szennyezőanyag tartalmának értékei szokás szerint nem normális eloszlásúak, a megbízhatósági intervallumok számításához a mérési értékeket vagy matematikai eszközökkel kell normális eloszlásra transzformálni, vagy – amennyiben ez lehetséges – olyan számítási formulákat kell alkalmazni, amelyek nem előfeltételezik a mérési eredmények normális eloszlását.
- A mindenkori vizsgálati időpontban mért szennyezőanyag-tartalom középértékek szignifikáns eltérésének igazolása box-whisker diagramok kvartilis távolságainak számításával.

#### **4. A szennyezett talajok telítetlen zónájára jellemző szennyezőanyag lebontási és megkötési potenciál értékelésének szakmai alapjai**

Az alábbi szakmai megalapozás az [1] kutatási projekt első részének eredményeire épül, melyben szakirodalmi kutatást végeztek a telítetlen talajzóna természetes lebomlási és megkötési folyamatairól rendelkezésre állók aktuális ismereteinek feltárása céljából. (Az eredmények részleteiben a szakirodalmi tanulmányból ismerhetők meg [2].)

##### **4.1. A természetes szennyezőanyag lebomlás és megkötés fontosabb paramétere**

Ebben a fejezetben azokat a paramétereket mutatjuk be, melyek jelenlegi ismereteink szerint a telítetlen talajzónában végbemenő természetes lebomlási és megkötési folyamatok lefolyása és hatékonysága, és ezáltal a folyamatok értékelése szempontjából jelentőséggel bírnak. A leírás alapjául szolgáló szakirodalmi tanulmány az egyes paraméterek aktuális ismeretanyagát mindig az eredeti szakirodalmi forrásra hivatkozva mutatja be [1].

A gyakorlati alkalmazás során természetesen kiderülhet, hogy az ebben az Útmutatóban nem tárgyalt paraméterek is segítik az adott terület a természetes lebomlási és megkötési folyamatainak értékelését. A talaj őshonos mikroorganizmus populációjának összetételével és funkcióival foglalkozó mikrobiológiai tanulmányok és az ehhez kapcsolódó más vizsgálatok összefüggésben állnak a szennyezőanyagok lebomlásával, azonban nem tartoztak a [1,2] kutatási projekt tárgykörébe, így ez az Útmutató sem tér ki ezekre.

##### **4.1.1. A szennyeződés állapota, szennyezőanyag-leltár**

Az alábbi leírás kizárólag az ásványolaj eredetű szénhidrogén és BTEX elsődleges szennyezőanyagokra, mint fő szennyezőkre vonatkozik.

##### **A szennyezőanyagok eloszlása, anyagi minősége és mennyisége (szennyezőanyag-leltár)**

A természetes lebomlási és megkötési folyamatok nagymértékben függenek a helyszín szennyezőanyag-leltárától. A szennyezőanyagok anyagi minősége határozza meg a talajban, a telítetlen talajzónában végbemenő biológiai lebomlást és megkötődést. A szennyezőanyagok eloszlásától függően dől el, hogy a lebomlási és megkötési folyamatok csak egyes pontokban, részfelületeken, vagy egyes talajrétegekben (horizontális tartományokban), vagy a teljes szennyezett talajtestben mennek végbe. A szóban forgó talajtömegből és a mért szennyezőanyag-tartalom értékekből általában csak közelítőleg meghatározható teljes szennyezőanyag-mennyiségből következtethetünk a talajvízbe, vagy a légkörbe várhatóan távozó szennyezőanyag maximális mennyiségére.

Az ásványolajok és ásványolaj termékek alifás szénhidrogének összetett keverékeit (n-alkánokat, n-alkéneket, izo-alkánokat), cikloparaffinokat, és különböző részarányban monociklusos aromás vegyületeket (BTEX) tartalmaznak.

- Ásványolaj eredetű szénhidrogének

Az ásványolaj eredetű szénhidrogének a talaj nagymértékű szennyezettsége esetén összefüggő fázisban vannak jelen, kisebb szennyezőanyag-tartalom esetén a talajrészecskék között (részben a repedésekben) található.

Az adott ásványolaj eredetű szénhidrogén biológiai lebonthatósága attól függ, milyen anyagcsoportokból tevődik össze. Az alifás szénhidrogének 35 szénlánc hosszúságig biológiailag lebonthatók. Az n-alkánok jobban lebonthatók, mint az izo-alkánok, alkének és a cikloalkánok. A biológiai lebonthatóság a szénlánc hosszúságának függvénye. Aerob feltételek mellett az alifás vegyületek szénlánc lépésről lépésre rövidül le, és a vegyület végül széndioxiddá és vízzé alakul át, vagyis ásványosodik (mineralizálódik). Az alifás vegyületek anaerob feltételek melletti lebomlása is igazolt tény, de az elágazó szénláncú vegyületek (izo-alkánok) anaerob módon már csak nehezen, vagy egyáltalán nem bonthatók. Az aromás szénhidrogének lebomlását a következő fejezetben mutatjuk be.

A szakirodalmi közlések adatai alapján csak korlátozott megállapítások tehetők arra vonatkozóan, hogy az ásványolaj eredetű szénhidrogének milyen koncentráció tartományban bomlanak le biológiai úton. A természetes lebomlási folyamatok 20 000 mg ásványolaj / kg talaj koncentrációig végbemennek, ennél lényegesen magasabb koncentrációknál (50 000 mg/kg felett) általában a lebomlást gátló hatás figyelhető meg. Az ásványolaj eredetű szénhidrogének lebomlásának értékelésekor, annak érdekében, hogy a lebomlás mértékére megállapításokat tehesünk, javasolható a talajban, valamint a szennyezőtranszport-útvonalaként szereplő talajlevegőben és talajvízben található egyes szénhidrogén szennyezőanyagok gázkromatográffal, illetve ehhez kapcsolt tömegspektrométeres vizsgálattal (GC/MS) történő azonosítása.

- BTEX és más alkilbenzolok

Az ásványolaj termékek változó részarányban tartalmaznak monociklusos aromás szénhidrogéneket (vagyis benzolt, toluolt, xilolt és más alkil-benzolokat (BTEX), például pszeudocumolt, mezitilént, sztírolt, cumolt). A monoaromás vegyületek az ásványolaj eredetű szénhidrogének alifás alkotóinál nagyobb vízoldhatóságúak. Jellemző tulajdonságuk a magas illékonyosság. Emiatt a monoaromás vegyületeknek nagy a mobilitása a környezeti közegekben.

A BTEX aromás vegyületek biológiai úton rendszerint jól lebonthatók. Aerob feltételek mellett az aromás gyűrű az oxigénnel oxidálódik, és nyílt szénláncú karbonsavakká hasad fel. Ezt követően pedig szervesetlen vegyületekké bomlik (ásványosodik), vagy beépül a biomasszába. Alkil-benzolok esetében a lebomlás az oldallánc oxidációjával is kezdődhet. A BTEX aromás vegyületek anaerob biológiai lebomlása denitrifikáló, szulfátredukáló és vasredukáló feltételek mellett igazoltan végbemegy, de alacsonyabb lebomlási sebességgel, mint aerob feltételek mellett.

A BTEX aromás vegyületek és az alkil-benzolok 450 mg/kg talaj koncentrációértékig lebonthatók [1]. A lebomlást gátló hatást nagyobb koncentrációknál például a toluol

esetében figyeltek meg [2]. A BTEX vegyületek és az alkil-benzolok telítetlen talajzónában végbemenő lebomlása koncentráció meghatározással követhető, a talajban, vagy a talajlevegőben meghatározva a szennyezőanyag tartalmát. A talajlevegő esetében a lebomlás megbízható igazolásához az aromás vegyületeknek  $1 \text{ mg/m}^3$  értéknél nagyobb koncentrációban kell jelen lenniük.

### **A szennyeződés összetétele, jellemzői és kora**

A szennyezést alkotó anyagok és anyagcsoportok alábbiakban bemutatott jellemzői gyakorolnak hatást a természetes lebomlási és megkötési folyamatokra.

- **Oldhatóság**  
A szennyezőanyagok vízoldhatósága határozza meg egyrészt a telítetlen talajzónában való mobilitásukat, és a talajvízbe irányuló szennyezőanyag transzportot (a szivárgóvíz útján), másrészt a szennyezőanyagok elérhetőségét a lebontó talaj-mikroorganizmusok számára.
- **Illékonyság**  
Meghatározza a szennyezőanyagok terjedését a telítetlen talajzóna levegőt tartalmazó pórusaiban. A szennyezőanyagok a talajlevegőn, mint transzport útvonalon keresztül a felső talajrétegekbe jutnak és ott erőteljesebb biológiai lebontásnak vannak kitéve, vagy a talajfelszínen keresztül kipárolognak a légkörbe. Ehhez kapcsolódóan a szennyezőanyag gőznyomása mellett a Henry együtthatónak, a víz- és gázfázis közötti megoszlásnak van jelentősége.
- **Szorpció**  
A szennyezőanyag adszorpcióját a talaj ásványi anyag mátrixán és szerves humuszfrakcióján a talajra jellemző tényezők mellett a szennyezőanyag specifikus paraméterek is meghatározzák. Ebből a szempontból a szennyezőanyag halmazállapotának és polárosságának, vízben oldható szennyezők esetében az oldhatóságnak, vízben nem oldható szennyeződés (NAPL, Non-Aqueous Phase Liquids) esetén pedig a sűrűségnek és a viszkozitásnak van jelentősége. A szorpciós folyamatok befolyásolják egyrészt a talajban végbemenő szennyezés megkötést, másrészt a szennyezés elérhetőségét a lebontó talaj-mikroorganizmusok számára.
- **Biológiai elérhetőség**  
A talajban található szennyezőanyagok biológiai lebomlása csak akkor megy végbe, ha azok szennyező anyagokat lebontó talaj-mikroorganizmusok számára hozzáférhetőek. Ez abban az esetben van így, ha a szennyezések vízben oldott, vagy legalábbis emulgeált állapotban vannak jelen. Emellett a szennyezőnek a fiziológiailag kedvező koncentráció tartományban kell jelen lennie. A biológiai elérhetőség tehát a szennyezőanyagok fizikai-kémiai tulajdonságaitól (vízoldhatóság, polárosság és szorpciós jellemzők) függ.
- **Biológiai lebonthatóság**  
Az adott anyagcsoportba tartozó egyes anyagok biológiai lebonthatósága nagyon különböző lehet, ezért lényeges ezek ismerete. Az egyes szennyezők eltérő lebonthatósága miatt a természetes lebomlási folyamatok megváltoztatják a szennyezés összetételét.

- **Toxicitás**

A szennyezőanyagok talajorganizmusokra (beleértve a mikroorganizmusokat és a mezofaunát) gyakorolt toxikus hatásai akadályozzák, vagy lehetetlenné teszik a biológiai szennyezőanyag lebomlást a talajban.

A szennyeződés korának előrehaladásával egyrészt bomlástermékekkel alakul, másrészt egyre nagyobb részarányban tartalmaz nehezen lebontható komponenseket. A szennyeződés öregedését fizikai mállási folyamatok és biológiai lebomlási folyamatok idézik elő, a szennyeződés megváltozásakor a kétféle folyamat különböző hatást gyakorol [2]. Az egyes anyagok vizsgálatával – például az ásványolaj szennyeződések esetében a szénhidrogének tömegspektrométeres azonosításával – következtethetünk a szennyeződés öregedésének mértékére és ennek révén a még várható további természetes szennyezőanyag lebomlásra is.

### **Bomlási anyagcsere-termékek (metabolitok)**

A metabolitok, mint bomlási anyagcsere-termékek a nem tökéletesen végbemenő biológiai, vagy kémiai lebomlási folyamatok közbenső termékeként jönnek létre. Az ásványolaj eredetű szénhidrogének lebomlásakor közbenső bomlástermékek széles skálája keletkezik, amelyek a vízben oldott poláros anyagok screening elemzésével (például gázkromatográfiás + tömegspektrometriás elemzéssel) vizsgálhatók. A BTEX aromás vegyületek és az alkilbenzolok lebomlásakor részben oxidált származékok keletkeznek: benzil-alkoholok, benzaldehidok, benzoésavak, benzokatekin, dimetil-fenolok és más vegyületek. Az analitikai kimutatás céljára a benzoésavak és az abból származó vegyületek (etil-, C2-, C3-benzoésavak) alkalmasak. Az oxidáció folytán a közbenső anyagcsere-termékek rendszerint polárosabbak, mint a kiinduló vegyületek, és emiatt többnyire mobilabbak is.

A talajban és a talajvízben végbemenő természetes lebomlási folyamatok vizsgálatakor a közbenső anyagcsere-termékeket folyamatindikátorként lehet felhasználni. Ehhez tisztázni kell az adott esetben, hogy a keletkező vegyületek az analitikai kimutatáshoz megfelelően stabilak-e és a kimutatás elfogadható költséggel kivitelezhető-e.

A BTEX aromás vegyületek közbenső bomlási anyagcsere-termékei között kis koncentrációban úgynevezett „dead-end” termékek is keletkezhetnek, melyeket az azokat kiválasztó mikroorganizmusok már nem tudnak tovább bontani [17]. A toxikus közbenső anyagcsere-termékek keletkezése kedvezőtlen feltételek esetén nem zárható ki, és ahhoz vezethet, hogy a természetes lebomlási folyamatok következményeképpen megnövekszik a szennyeződés toxicitása.

### **Kísérő szennyeződések**

A fő szennyezők lebomlását és megkötését befolyásolhatják a kísérő szennyezők. Az ásványolaj eredetű szénhidrogén és BTEX szennyeződések gyakran kísérik kis mennyiségben, vagy koncentrációban más szennyezőanyagok: különösen nehézfémek, PAH vegyületek és metil-tercier-butiléter (MTBE). Ezek a kísérő szennyezőanyagok egyrészt befolyásolhatják a fő szennyezők fizikai-kémiai viselkedését (például szorpcióját), más-

részt gátló hatást fejthetnek ki a szennyezőanyagot lebontó talajorganizmusokra (például nagy toxicitású nehézfémek jelenléte).

#### **4.1.2. A kármentesítési helyszín hidrogeológiai jellemzői**

##### **A talajvízszint elhelyezkedése**

A talajvíztükör felszíntől való távolsága a telítetlen talajzóna vastagságát jelenti, ez pedig vertikális irányú, szivárgó víz okozta szennyezőtranszport esetén fontos jellemző paraméter a talajvíz kockázati helyzetének megítélésékor. Mélyebben elhelyezkedő talajvíz esetén a szennyeződés tartózkodási ideje a talajban hosszabb és így hosszabb reakcióidő áll rendelkezésre. Amennyiben a telítetlen talajzóna vastagsága kisebb, számolni kell azzal, hogy a talajvíz felé irányuló szennyezőtranszport intenzívebb. Ezáltal a biológiai lebomlás és a szivárgó vízzel végbemenő szennyezőtranszport aránya a talajvízszint elhelyezkedésétől függően módosulhat. Ennek a hatásnak a számszerű leírására vonatkozóan nem állnak rendelkezésre adatok [2].

A talajfelszínen, vagy a talajvízszint felett elhelyezkedő szennyező góc esetén a talajvíztükör-talajfelszín távolság (talajvízszint), a szivárgási sebesség, a talaj jellege, rétegződése, stb. együttesen paraméterként szolgálhatnak a telítetlen talajzónában, a talajvíztükör eléréséig rendelkezésre álló tartózkodási idő becsléséhez és a szennyezőanyagok túlnyomórészt aerob lebomlásának értékeléséhez.

A telítetlen talajzóna lebomlási és megkötési folyamataira vonatkozó tapasztalatok túlnyomórészt 10 m talajvízszintig terjedően állnak rendelkezésre [1,2]. Amennyiben 10 m feletti rétegvastagságról van szó, meg kell vizsgálni, hogy az adott esetben a kármentesítési helyszín adottságai mellett a monitoring költségének figyelembe vételével ésszerű-e a természetes lebomlási és megkötési folyamatok monitoringja.

##### **Szivárgási sebesség, talajvíz utánpótlódás intenzitása**

A szivárgási sebesség a telítetlen talajzónában fennálló szennyezés eloszlás, valamint a víztartó felé irányuló szennyező transzport fontos mutatószáma (indikátora). Minél kisebb a szivárgási sebesség, annál hosszabb ideig tartózkodik a szivárgóvíz a telítetlen talajzónában. A lebomlási és megkötési folyamatok így hatékonyabban tudnak végbemenni, és csökkentik a szennyezőanyag bevitelt a talajvízbe. Ezzel szemben az alacsony szivárgási sebesség a talaj alacsonyabb víztartalma által korlátozza a szennyezőanyagok biológiai elérhetőségét a telítetlen talajzónában. A szivárgási sebesség és a telítetlen talajzónában végbemenő természetes lebomlási és megkötési folyamatok közötti bonyolult összefüggéseket számszerűen leíró publikációk száma mai napig igen kicsi.

A talajvízbe irányuló szennyezőanyag transzport vizsgálatakor – abban az esetben, ha a telítetlen talajzónában fennálló szennyező-eloszlást figyelmen kívül hagyjuk – jelentős tényező a talajvíz utánpótlódás intenzitása. A talajvíz utánpótlódás intenzitása liziméter alkalmazásával közvetlenül, illetve a talajvízháztartás egyenletéből, vagy a talajvízforralom modellezésével közvetett úton határozható meg.

### **Kapilláris erő**

A kapilláris erő által keltett felfelé irányuló vízmozgás (kapilláris vízemelés) hatással van a pórusokba irányuló víztranszportra és befolyást gyakorol a szennyezőanyagok eloszlására a telítetlen talajzónában.

A kapilláris erő mértéke a telítetlen talajzóna esetében a talajmátrix-potenciál, amely tenziométerrel határozható meg. A szakirodalmi közlések szerint a kapilláris erő befolyást gyakorol az illékony szénhidrogének talajban végbemenő lebomlásának sebességére [2]. A kapilláris erők különösen a kapillárisokban elhelyezkedő vízfelszínen játszanak fontos szerepet és hatással vannak az ásványolaj eredetű szénhidrogén szennyezők eloszlására, biológiai hozzáférhetőségére a telítetlen és telített talajzóna közötti átmeneti zónában. Ez összefüggésben van azzal a gyakorlati tapasztalattal, hogy az ingadozó talajvízszint a dízelolajok gyorsabb lebomlását idézi elő.

#### **4.1.3. A talaj jellemzői és hatásuk a lebomlási és megkötési folyamatokra**

##### **Talajtulajdonságok, szemcseméret**

A talajtulajdonságok közül elsősorban a szemcseméret és a szervesanyag tartalom (humusztartalom) hat a szennyezőanyagok eloszlására és biológiai elérhetőségére. Ezek a talajparaméterek befolyást gyakorolnak egyrészt a szennyezőanyagok megkötésére, másrészt biológiai lebomlására is.

A nagy agyagásvány tartalmú finomszemcsés talajok rendszerint nagyobb mértékben szorbeálják a szennyező anyagokat, ezért erőteljesebb megkötő hatással rendelkeznek, mint a durvaszemcsés talajok [2]. A mikrobiológiai lebomlás számára ezzel szemben a szennyezőanyag biológiai elérhetősége, az oxigén, vagy más elektron akceptorok és tápanyagok jelenléte döntő fontosságú, ez pedig a finomszemcsés talajok esetében korlátozott a kis pórustérfogat miatt. A természetes lebomlási és megkötési folyamatok számára a közepes szemcseméretű talajok a legmegfelelőbbek.

##### **Rétegfelépítés és rétegvastagság**

A telítetlen talajzóna rétegfelépítése és rétegvastagsága hatással van a szivárgó víz és talajlevegő transzport utakra és ezáltal a szennyezőanyagok eloszlására a talajban. Változó földtani, vagy talajtani felépítés esetén minden egyes talajréteg vastagságának jelentősége van. Egynemű talajféleség esetén a telítetlen talajzóna teljes vastagságát kell figyelembe venni.

A természetes lebomlási és megkötési folyamatok monitorozása számára a rétegvastagságok fontos információt jelentenek a más talajrétegek felé irányuló szennyezőanyag transzport, illetve a szennyezőanyag-átadás számításakor. A szennyeződés szivárgóvíz, vagy talajlevegő transzportja az adott közvetítő rétegektől és terület adottságoktól függően veszélyeztetheti a talajvizet, vagy hatással lehet a toxikus anyagok talajfelszíni kipárolgására.

## **Talajszerkezet**

A talajszerkezetet a szemcseméret mellett a különböző talajrészecskék, aggregátumok települése, stabilitása és térbeli elrendeződése jellemzi. A talajszerkezet kis térrészeken belül is nagyon heterogén lehet. A talajszerkezet befolyást gyakorol a talaj fizikai-kémiai folyamataira, így a természetes lebomlásra és megkötésre is hat.

Szilárd kőzetösszlet esetén elsősorban a geológiai szerkezeti összetevők, a rétegződési felületek, repedések, hasadékok határozzák meg a talajszerkezetet. Ezek az elválasztó határfelületeket tartalmazó szerkezetek a szivárgóvíz és egyúttal a szennyezőanyagok potenciális transzportútvonalaikat képezik. A felső talajrétegek vizsgálatakor a legtöbb esetben a határfelületeket tartalmazó talajszerkezet csak alárendelt szerepet játszik.

Az általános összefüggéseken túlmenően nem állnak rendelkezésre a talajszerkezet által a természetes lebomlási és megkötési folyamatokra gyakorolt hatást leíró szakirodalmi közlések.

## **Talaj porozitás**

A talaj pórustérfogat részaránya a szemcsemérettől, a szemcseformától, a szemcseeloszlástól, a szervesanyag tartalomtól és a talajképző tényezőktől (például a talajszerkezet alakító hatásoktól) függ. A pórustérfogat részaránya hat a telítetlen talajzónában végbemenő természetes lebomlási és megkötési folyamatokra. A talaj mikrobiológiai aktivitása szempontjából kiemelt fontosságú a pórusátmérő. A mikroorganizmusok számára a közép méretű, ( $d = 10-0,2 \mu\text{m}$  közötti) pórusok bizonyos feltételek mellett elérhetőek, a ( $d < 0,2 \mu\text{m}$  átmérőjű) finompórusok azonban már egyáltalán nem hozzáférhetőek. A lebomlási feltételeket meghatározza a vízzel telített pórusok részaránya a talaj teljes pórustérfogatán belül (pórustelítettség szám).

A tömör szerkezetű, alacsony pórustérfogatú talajok esetében a szennyezőanyagok mobilitása is alacsonyabb. Ez elősegíti a mikrobiológiai lebomlást. Másrészt viszont a lebomlást stimuláló anyagok (például az oxigén, a tápanyagok) korlátozottan állnak rendelkezésre, ennek megfelelően a finom és közepes méretű pórusokban a mikrobiológiai lebomlás nagymértékben korlátozott [2].

## **Szivárgási tényező**

A szivárgási tényező fontos faktor az esetleges talajvízmozgás és a talajban létrejövő anyagtranszport becslésekor. Minél nagyobb áteresztőképességű egy talaj, annál rövidebb a beszivárgó víz tartózkodási ideje a talajrétegben és annál kisebb mértékű a szennyező anyagokat érő lebontó és megkötő hatás.

A szivárgási tényező természetes lebomlási és megkötési folyamatokkal való összefüggéséről – jelentősége ellenére – kevés adat található [2]. A szivárgási tényező meghatározása viszonylag homogén talajok esetében a szemcseméret eloszlás görbe felhasználásán alapuló számítási módszerrel történik.

### **Humusztartalom**

A humusztartalom befolyásolja a szennyezőanyagok reverzibilis szorpciójának mértékét. A természetes szerves alkotókhöz kapcsolódás révén rendszerint megnövekszik a szennyeződések tartózkodási ideje az illető talajrétegekben. Ezzel egyidejűleg csökken a talajvízbe irányuló szennyezőtranszport és nagyobb mértékű lesz a biológiai lebomlás. A talaj természetes szervesanyag hányadának hatása a természetes lebomlási folyamatokra nem ismert [2].

### **Agyagásvány-tartalom**

A talaj fizikai félesége által meghatározott agyagásvány-tartalom befolyással van a szennyezőanyagok talajban lejátszódó szorpciójára. Az agyagásványokra jellemző adszorpciós kapacitás szénhidrogén-agyagásvány vegyületek képződésére vezethető vissza. Az agyagos talajok adszorpciós kapacitása és a csekély hidraulikus vezetőképessége együttesen a talajban tartózkodás idejének megnövekedését idézi elő. Ez elősegíti a mikrobiológiai lebomlást, és főként magas talajvízszint esetén nagymértékben lecsökkenti a szivárgóvízen keresztül végbemenő szennyezőanyag transzport miatti kockázatot. Ugyanakkor az alacsony beszivárgási sebesség korlátozza a szennyezőanyagok biológiai elérhetőségét, valamint a tápanyagok és elektron akceptorok rendelkezésre állását. Összehasonlító szakirodalmi adatok nem állnak rendelkezésre a szénhidrogének szorpciójára/kapcsolódására különböző agyagásványokon és az adszorpció hatását illetően az ásványolaj eredetű szénhidrogének és a BTEX szennyeződések lebomlására.

### **Vasoxid-, alumíniumoxid- és mangánoxid-tartalom**

A vas, az alumínium és a mangán oxidjai és hidroxidjai tipikus mállástermékek, így nagy felületaktivitásuk folytán gyakran a talajrészecskék felszínén igen finom eloszlásban rakódnak le. Ezek a többnyire szemcseburkolatot képző vas- és alumínium-oxihidrát kiválások jelentősen módosítják a talaj szorpciós tulajdonságait és megváltoztatják a megkötési folyamatokat is. A vas-, alumínium- és mangánoxidok által előidézett szorpciós folyamatok egyes szennyezőanyag csoportok – ásványolaj eredetű szénhidrogének, BTEX-ek – megkötésére gyakorolt kvantitatív hatására nincs szakirodalmi közlés.

### **Kationcserélő kapacitás**

A talaj kationcserélő kapacitását a talajban található agyagásványok minősége és részaránya, a humusztartalom és a pH-érték határozza meg. Ez a jellemző elsősorban a mikrobiológia lebomlás számára fontos tápanyagok, az ammónium, kalcium, magnézium, kálium és nátrium ioncseréjére van hatással. Nem állnak rendelkezésre kifejezetten a kationcserélő kapacitás szénhidrogén vegyületek lebomlására gyakorolt hatásával foglalkozó szakirodalmi közlések [2].

### **Sótartalom**

A talaj sótartalma befolyásolja a mikrobaközösségek összetételét és anyagcsere folyamatait. Közép-Európában a sótartalom, mint összefoglaló jellemző a nem műtrágyázott

talajok esetében kisebb fontossággal bír a várható csaknem teljes sómentesség miatt. Kivételt képeznek a szikes talajok, amelyek esetében jelentős lehet a talaj és a talajvíz sótartalma, így nitrát-, szulfát-, karbonát-, stb. tartalma. Az elektromos vezetőképesség és egyes fontos tényezők (nitrát-, szulfát-, karbonát-tartalom) mérésével a sótartalom meghatározása helyettesíthető.

### **Víztartalom**

A talaj víztartalma jelentős befolyást gyakorol a telítetlen talajzóna fizikai, kémiai és biológiai folyamataira és ezáltal a természetes lebomlási és megkötési folyamatokra is. A talajvíztartalom egyebek mellett meghatározza a talaj konzisztenciáját, az oxigén és a tápanyagok, valamint a szennyezők mobilitását.

Amennyiben a talaj nedvességtartalma alacsony, és ebből adódóan a talajpórusokban a levegő térfogati részaránya magas, akkor a mikrobiológiai lebontó aktivitás aerob feltételek mellett, a kedvező oxigénellátás ellenére is erősen korlátozott, mivel ilyenkor összefüggő folyadékfilm nem jön létre és emiatt a lebontandó szennyezőanyagok biológiai elérhetősége igen korlátozott [2]. A talaj túl magas nedvességtartalma esetén viszont a rossz oxigénellátás korlátozza a mikroorganizmusok anyagcseréjét. A talaj víztartalma általában a szemcseméret csökkenésével növekszik. A biológiai lebomlás számára optimális víztartalom a talajtípustól függetlenül a maximális vízkapacitás mintegy 40-60%-ánál van.

#### **4.1.4 A fizikai kémiai paraméterek**

##### **Hőmérséklet**

A levegő-, talaj- és talajvíz-hőmérséklet, mint tényező befolyást gyakorol a természetes lebomlási és megkötési folyamatokra. A talajhőmérséklet hatással van a szennyezőanyagok megoszlására a szilárdfázisú talajmátrix, a folyadékfázis és a gázfázis között. Emiatt például a hőmérséklet növekedése esetén az illékony anyagok talajlevegőn keresztüli kipárolgása nagyobb mértékű. Ugyanakkor a talaj mikrobiológiai aktivitása és ezáltal a szennyezőanyagok lebomlási sebessége is nagyobb lesz magasabb hőmérséklet esetén. Ezeket az összefüggéseket terepi és laboratóriumi mérések is megerősítették [2].

A levegőhőmérsékletet a kármentesítési helyszín klimatikus viszonyainak általános jellemzése érdekében alapadatként kell megadni. A talajhőmérséklet hőmérsékletérzékelőkkel történő mérésével, illetve a talajvíz hőmérséklet (DIN 38404-C 4 szabvány szerinti) meghatározásával körvonalazzuk azokat a környezeti feltételeket, amelyek mellett a fizikai-kémiai és a biológiai átalakulási és lebomlási folyamatok végbemennek. Az ásványolaj eredetű szénhidrogének lebomlását az 5 °C és 40 °C közötti hőmérséklet általában biztosítja. A klimatikus és évszak szerinti hőmérséklet ingadozások hatást gyakorolhatnak a biológiai lebomlás sebességére.

##### **Légnyomás**

A légnyomás elsősorban fizikailag fejt ki hatását a talajgázcserére és ezáltal a szennyezőanyagok esetleges elillanására a gázfázison keresztül. Ezt az összefüggést egyes szak-

irodalmi közlések megerősítik, összességében azonban szűkösek a rendelkezésre álló információk [2]. A légnyomási és időjárési viszonyoktól függően – például viharok esetén – a talajban több méter mélységre is kiterjedhet a gázcsere. Alacsony szennyezőanyag koncentrációk esetén a légnyomás ingadozás kihatással lehet a talajlevegő elemzés eredményére így a mérési adatok értékeléséhez légnyomásmérést is kell végezni. Extrém légnyomásviszonyok esetén ne végezzünk talajlevegő elemzést, mert hamis eredményt adhat.

### **Csapadékmennyiség**

A légköri csapadékok (eső, hó, harmat, köd) mennyisége és időbeli megoszlása kihatással van a telítetlen és a telített talajzóna vízháztartására. A csapadékmennyiség a beszivárgó víz és talajvíz általi szennyezőanyag-transzport mennyiségi meghatározásakor döntő fontosságú paramétert jelent. A mennyiségi meghatározást nehezíti, hogy a beszivárgó víz – különösen nagy esőzések esetén – vízmosásokat alakít ki a talajban [2].

A csapadék okozta talajnedvesség növekedés nem csupán a szivárgó víz útján végbemenő szennyezőanyag kimosódást növeli, hanem csökkenti a telítetlen talajzóna levegővel telített pórusainak térfogatát is. Ezáltal a talajlevegő kiszorul a pórusokból és a szennyezőanyagok erőteljesebb kipárolgása következhet be a gázfázison keresztül. Ugyanakkor a légköri oxigén behatolása a talajmátrixba nehezebbé válik [2]. A talajban végbemenő természetes lebomlási és megkötési folyamatok értékeléséhez a helyszíni csapadékviszonyait ismerni kell (helyszíni mérések, megfelelő időjárás mérőállomás adatai).

### **Vezetőképesség**

A vizes oldat összetevőinek koncentrációja, illetve ionkoncentrációja befolyásolja a földtani közegben a kémiai, illetve fizikai folyamatokat. Az elektromos vezetőképesség a talajvízben, szivárgóvízben, illetve talajeluátumban oldott ionok összegzett koncentrációjára közvetlenül vonatkozó adatként használható fel. Az elektromos vezetőképesség a vízminták ionkoncentráció változásainak egyszerűen és gyorsan mérhető paramétere. Mindezideig azonban kevésbé vizsgálták a telítetlen talajzóna egyes vizes közegeinek (szivárgóvíz, talajeluátum) elektromos vezetőképessége és a természetes lebomlási és megkötési folyamatok között fennálló összefüggéseket [2]. Részletesebb összefüggések csak az anionok és kationok meghatározását követően tárhatók fel (lásd a nitrát, szulfát, vas című fejezetekben).

### **pH-érték és pufferkapacitás**

A talaj pH-értéke megszabja a kémhatás alkalmasságát a résztvevő organizmusok számára, és így meghatározó a biológiai szennyezőanyag lebomlási folyamatok szempontjából. Ugyanígy döntő fontosságú a pH a megkötési folyamatok tekintetében is, melyek protonátadó, illetve protonelvonó folyamatok és/vagy töltésváltozások és töltés áthelyeződések segítségével mennek végbe.

Részletekbe menően vizsgálták a pH-érték biológiai szennyezőanyag lebomlásra gyakorolt hatásait. A legtöbb baktérium számára a semleges, vagy gyengén lúgos pH-

tartomány optimális (pH 6-8), sok gombaféle viszont a savas környezetet részesíti előnyben (pH 4-6). Mivel természetes településű talajokban a szénhidrogének lebontásában többnyire baktériumok vesznek részt, a pH 6-8 tartomány az optimális [2].

A pH-érték összefüggésben áll a pufferkapacitással, a talaj, illetve a talajvíz pH ingadozásokat kiegyenlítő képességével. A talaj pufferkapacitása karbonáttal erőteljesen pufferolt talajrétegek esetében pozitív hatással van a szerves szennyezőanyagok biológiai lebomlására. A szerves anyagok ásványosodásakor a pH-érték a képződő széndioxid oldódása miatt csökken. Ez csak gyenge pufferhatású talajok esetében korlátozza a mikrobiológiai lebomlást. A pufferkapacitás indikátoraként a savkapacitás (alkalitás) mérhető, amely a hidroxidok, karbonátok és bikarbonátok talajrendszerben való jelenlétéből adódik.

### **Redoxpotenciál**

A redoxpotenciál az oxidált és redukált anyagok adott rendszerben fennálló arányát tükrözi. Függ az oxigéntartalomtól, és emiatt közvetetten a víztartalomtól, a pH-értéktől, a hőmérséklettől, és a lebontható szervesanyag tartalomtól. A redoxpotenciál és a biológiai szennyezőanyag lebomlás feltételei között fennálló összefüggéseket szennyezett talajvizek esetében megfelelő részletességgel vizsgálták. A telítetlen talajzónáról (szivárgóvízről) azonban nem állnak rendelkezésre szakirodalmi adatok [2]. A redoxpotenciál mérése szivárgóvíz mintában – a mintavétel hatásai miatt – nem lenne egyértelműen megfelelő erre a célra.

### **Oxigén**

Az oxigén a legfontosabb elektron akceptor a szerves anyagok lebontásakor, különösen érvényes ez a telítetlen talajzóna esetében. Az oxigénfogyasztásból – a széndioxid képződéssel együttesen – következtetések vonhatók le a mikrobiológiai lebomlás lejárásáról. A telítetlen talajzónában az oxigéntranszportot csaknem kizárólag diffúzió útján megy végbe. Az oxigéntranszportot egyebek mellett a szemcse- és pórusméret, a nedvességtartalom és a rétegsűrűség határozza meg.

A biológiai lebomlás respirációs (talajlégzési) vizsgálatok segítségével történő modellezése, valamint az aktív kármentesítési eljárásoknál (bioventilláció) történő oxigén alkalmazás révén átfogó ismeretanyag áll rendelkezésre az oxigéntartalomról (mint paraméterről) a talaj, a talajvíz és a talajlevegő esetében [2]. Laboratóriumi és terepi vizsgálatokkal egyaránt igazolni lehetett, hogy az oxigén-felhasználás korrelál a szénhidrogének lebomlásával, valamint azt is, hogy az oxigén és a BTEX-ek mélységtől függő eloszlása fordított arányban áll egymással. Szakirodalmi közlések alátámasztják, hogy a talaj magasabb oxigéntartalma a szénhidrogének biológiai lebomlási sebességének növekedését idézi elő.

A szennyezőanyag lebomlását jelzi, ha a talajlevegő oxigénkoncentrációja legalább 5 térfogat %-kal alacsonyabb, mint a nem szennyezett referencia helyszín esetében [1]. Amennyiben a talajlevegőben egy térfogat %-nál kisebb az oxigénkoncentráció, akkor

szennyezőanyag jelenléte esetében ez a körülmény olyan előrehaladott szennyezőanyag lebomlásra utal, amelyet már korlátoz a rendelkezésre álló oxigénmennyiség.

### **Széndioxid**

A széndioxid, mint a szerves szennyezőanyagok teljes lebomlásának (mineralizációjának) a végterméke, közvetlen kapcsolatban áll a szennyezett talajokban végbemenő természetes szennyezőanyag lebomlással. A széndioxid-tartalom és a biológiai lebomlás sebessége közötti korrelációt megghamisíthatja a karbonát ásványok miatti abiotikus széndioxid-képződés és a természetes karbonátpuffer rendszerek széndioxid elnyelő hatása. A mikrobiológiai lebomlás sebességének értékelésekor a talaj karbonát részarányát figyelembe kell venni. A széndioxid meghatározható közvetlenül a talajlevegőben, vagy közvetett módon a savkapacitás és karbonátkeménység paramétereken keresztül a vizes oldatokból (szivárgóvíz, talajvíz), mivel az oldott széndioxid keménységnövekedést idéz elő.

A szakirodalomban a széndioxid koncentrációt gyakran az oxigén meghatározással összekapcsolt respirációs mérések alapján adják meg számszerű paraméterként. Laboratóriumi és terepi vizsgálatok során a várakozásnak megfelelően megfigyelhető volt a szennyezők lebomlásakor a széndioxid keletkezése és az ezzel egyidejű oxigénfogyasztás [2].

A szennyezőanyag „terheléstől” függően a talajlevegő széndioxid-tartalma elérheti a 20 térfogat % értéket is [1].

A szennyezőanyag lebomlást jelzi, ha a talajlevegő széndioxid-tartalma legalább 5 térfogat %-kal nagyobb, mint a nem szennyezett referencia területen.

### **Nitrát**

A természetes lebomlási folyamatok szempontjából a nitrátok egyrészt nitrogénforrásként játszanak szerepet, másrészt a résztvevő mikroorganizmusok számára elektron akceptorként szolgálnak. Anaerob feltételek mellett a szénhidrogének mikrobiológiai úton a nitrát molekuláris nitrogénné történő redukciója közben bonthatók le (denitrifikáció).

A nitráttartalom és a szennyezőanyagok lebomlásának sebessége között fennálló összefüggést a talajvíz esetében nagyszámú vizsgálat tárta fel, a telítetlen talajzóna esetében a szakirodalmi ismeretanyag azonban kevesebb [2]. A talaj szennyezőanyag tartalma és hozzá tartozó szivárgóvíz minták nitráttartalma között igazolhatóan összefüggés áll fenn [1]. Amennyiben a telítetlen talajzónában a rendelkezésre álló oxigén mennyisége nem elegendő – mint például a kevésbé permeábilis talajok esetében – megnő a nitrát, mint alternatív elektron akceptor jelentősége. A nitrát (más elektron akceptorokkal összehasonlítva) nagyobb jelentősége abban rejlik, hogy a denitrifikációhoz nem szükségesek szigorúan anareob feltételek, melyek a telítetlen talajzónában rendszerint nem állnak fenn.

A fentiekből következően a telítetlen talajzónában lejátszódó természetes szennyezőanyag lebomlás értékeléséhez fontos a talaj és a szivárgóvíz nitráttartalmának meghatározása.

### **Vastartalom**

A vas a biológiai lebomlási folyamatokban anerob elektron akceptor funkciót tölt be. Ennek során a vas(III)-hidroxid redukálódik és vízben jól oldható vas(II) vegyület keletkezik. A talajvízben a szennyezőanyag lebomlás közben lejátszódó vasredukációs folyamatokat – melyek jellegzetes lebomlási zóna kialakulásához vezetnek – részletekbe menően vizsgálták. A talajban lejátszódó természetes szennyezőanyag lebomlás és a telítetlen talajzóna vastartalma közötti összefüggést bemutató szakirodalmi információ ezzel szemben nem áll rendelkezésre [1].

### **Szulfát**

A szulfátokat szigorúan csak a talaj anaerob mikroorganizmusai tudják elektron akceptorként felhasználni a természetes szennyezőanyag lebomlás folyamatában. Ennek során redukált kénvegyületek, illetve kénhidrogén keletkezik. Itt is érvényes, hogy a talajvízben lejátszódó folyamatokat részletesen tanulmányozták már, de a telítetlen talajzóna esetére kevés vizsgálati eredmény áll rendelkezésre [1].

Elvileg a telítetlen talajzóna esetében is abból indulhatunk ki, hogy fordított összefüggés áll fenn a szennyezőanyag-tartalom és a szulfáttartalom között. Ezt szivárgóvíz vizsgálatok igazolják. Ennek ellenére a szulfáttartalom változásai a telítetlen talajzónában nem jelzik egyértelműen a mikrobiológiai lebomlási folyamatokat. Ennek oka az, hogy a szulfáttartalmat nagymértékben befolyásolják a következő folyamatok: (1) a szénhidrogének kéntartalmú összetevőinek kémiai, vagy biológiai oxidációja szulfáttá, (2) szulfát keletkezése a talaj szulfáttartalmú ásványaiból, (3) oxidált kénvegyületek bevitel a csapadékkal.

### **Nitrogénforrások, ammónium**

A nitrogéntartalmú tápanyagok a mikroorganizmusok anyagcsere aktivitása számára és ezáltal a szennyezések biológiai lebomlása számára is alapvető fontosságúak. A nitrogénre a foszforral együtt viszonylag nagy koncentrációban van szükség, ezért makroelemnek tekintjük. A szükséges nitrogéntartalom a szénforrás (például a szennyezőanyagok) koncentrációjához igazodik. A 100:15 és 100:10 közötti C:N arányt tekinthető optimálisnak [17], de egyes esetekben ettől eltérő C:N arányok is nagy lebomlási sebességeket eredményezhetnek.

A szennyezőanyag lebomlást korlátozhatja, ha a tápanyagellátás nem fedezi a tápanyag-szükségletet. A minimálisan szükséges nitrogéntartalom azonban a talajtól és a szennyezőanyag-tartalomtól függően változhat. Számos vizsgálat igazolta, hogy az ásványi szénhidrogének és a BTEX-ek lebomlását elősegíti a nitrogénvegyületek bejuttatása [2]. Túl nagy nitrogéntartalom adott esetben fékező hatást gyakorolhat a folyamatokra. A szennyezőanyagot lebontó mikroorganizmusok nitrogénellátásának természetes tápanyagforrásai a szerves nitrogénforrások mellett elsősorban az ammónium és a nitrátok. Egyes szakirodalmi közlések szerint az ásványolajok lebomlása nem csak a nitrogénve-

gyületek koncentrációjától, hanem a nitrogénforrás anyagi minőségétől is függ. A talaj teljes nitrogénellátásának meghatározásához az összes nitrogén tartalom mellett a szerves nitrogénvegyület tartalom (nitrát-N és ammónium-N) meghatározása is szükséges.

### **Foszfor, foszfát**

A másik alapvető fontosságú makroelem, a foszfor csaknem kizárólag foszfátok alakjában fordul elő a talajban. A szükséges foszfáttartalom a szénforrás (például szennyezőanyagok) és a nitrogénforrások koncentrációjához igazodik. A C:N:P arány optimálisnak tekintett tartománya 100:15:2-től 100:10:1-ig terjed [17].

A hozzáférhető foszfor szennyezőanyag lebomlásra gyakorolt hatását bemutató szakirodalmi közlés alig áll rendelkezésre. Az együttesen alkalmazott nitrogén-, illetve foszfortartalmú adalékanyagok hatását a talajban rendszerint nem vizsgálják egymástól elkülönítve [2]. A túl magas foszfortartalom lebomlást fékező hatása nem zárható ki, de ezt leíró információ nem áll rendelkezésre. A talaj foszforellátásának meghatározása céljából rendszerint a hozzáférhető (felvehető) foszfát tartalmat elemzik.

### **Összes szerves szén tartalom, oldott szerves szén tartalom (TOC/DOC)**

Az összes szerves szén tartalom (TOC), illetve az oldott szerves szén tartalom (DOC) a talaj szerves szénforrásaira utal, amelyek természetes szénvegyületekből és kívülről származó anyagokból (káros anyagokból) tevődnek össze. A szénforrások elektron donorokként szolgálnak a lebontó mikroorganizmusok számára.

A szerves szén tartalom a talaj adszorpciós folyamatai számára döntő jelentőségű tényező. Minél nagyobb az összes szerves szén tartalom, annál nagyobb mértékben befolyásolják az adszorpciós folyamatok a mikrobiológiai lebomlási folyamatokat [2]. A szennyezőanyagok kapcsolódása a természetes talajvegyületekhez egyik oldalról megnöveli a talajban való tartózkodási időt és elősegíti a lebomlási folyamatokat. Másik oldalról viszont csökkenti a szennyezőanyagok elérhetőségét és mobilitását.

A természetes szénvegyületek a kometabolikus folyamatok révén befolyásolhatják a szennyezőanyag-lebomlást. Ennélfogva a talaj- és vízminták összes szerves szén tartalma és oldott szerves szén tartalma a kometabolikus lebomlás fontos jelzőszáma és a szennyezőanyagok természetes szerves anyagokon való potenciális adszorpciójának is indikátora.

### **Molekuláris hidrogén**

A molekuláris hidrogén a szerves anyagok (például szennyezőanyagok) anaerob feltételek melletti lebomlásakor keletkezik. A talajban képződő molekuláris hidrogén rendszerint gyorsan oxidálódik mikrobiálisan.

A talajvíz esetében az oldott hidrogén koncentráció alkalmas a természetes lebomlási és megkötési folyamatok számára fontos redox feltételek megállapítására. A denitrifikáció folyamata számára 0,1 nmol/dm<sup>3</sup>-nél kisebb, a vasredukcióhoz 0,1-0,8 nmol/dm<sup>3</sup> között-

ti, a szulfátredukcióhoz 1,0-4,0 nmol/dm<sup>3</sup> közötti, a metanogenezis számára pedig 5,0 nmol/dm<sup>3</sup> értéknél nagyobb oldott hidrogéntartalom értéket ad meg a szakirodalom. Ezzel szemben a telítetlen talajzónában, ahol rendszerint aerob feltételek állnak fenn a hidrogéntartalom, mint paraméter alárendelt jelentőségű [2].

### **Kénhidrogén**

A kénhidrogén a mikrobiális szulfátredukció folyamán, szigorúan anareob feltételek mellett keletkezik, és ezáltal jelzi az ennek megfelelő környezeti feltételeket. Szennyezett talajok esetében további kénhidrogén forrásként szóba jöhetnek az ásványolaj termékekben található kéntartalmú vegyületek. A talajban keletkező kénhidrogén oxigén jelenlétében mikrobiálisan kéndioxiddá, illetve szulfáttá oxidálódik. Ennélfogva a telítetlen talajok talajlevegőjében kimutatott kénhidrogén anareob forrásra utal és nem kielégítő oxigénellátásra enged következtetni. Kénhidrogén forrásként a talajvízszint ingadozás zónájában elhelyezkedő szennyezésnek lehet szerepe [2].

### **Metán**

A metán a metanogenezis folyamán szigorúan anareob feltételek mellett széndioxidból, mint elektron akceptorból keletkezik, amennyiben más kedvezőbb elektron akceptor (oxigén, nitrát, vas, szulfát) nem áll rendelkezésre. Emellett ecetsavból is képződhet metán a mikroorganizmusok által. A talajvíz természetes háttérértékénél magasabb metántartalma ásványolaj szennyezés esetén egyértelműen a szénhidrogének mikrobiális lebomlására utal. A szennyezett területek talajlevegőjének magasabb metántartalma a talajban és talajvízben található szennyezés anareob lebomlására enged következtetni (egy BTEX szennyezés vizsgálata szerint). Újabb szakirodalmi közlések alapján a telítetlen talajzónában (legalábbis) ideiglenes jelleggel lejátszódnak metanogén lebomlási folyamatok [2].

#### **4.1.5. Biológiai paraméterek**

A biológiai paraméterek a szennyezőanyagok természetes lebomlási folyamataival többféle összefüggésben állnak. A biológiai paraméterek egyrészt a szennyezőanyagot lebontó talajorganizmusok anyagcsere aktivitásának közvetlen mérőszámát jelentik, másrészt a szennyezés (kiinduló szennyező vegyületek és metabolitok) ökotoxikológiai hatásainak indikátorai.

#### **Baktériumszám, mikrobiális biomassza**

A baktériumszám a talaj mikrobiális közösségeinek nagyságát jellemző közvetlen paraméter. Az összes sejtszám és az élősejtszám is meghatározható, de mindkét mérőszám jelentős hibát tartalmazhat. Az eredmény rendszerint a talajban található összes (illetve élő) mikroorganizmusnak csak egy igen kis részét foglalja magába. Ezért ezek a paraméterek elsődlegesen mint relatív mérőszámok a különböző talajok mikrobiális közösségei nagyságának összehasonlítására szolgálnak. A mikrobiális biomassza paraméter a sejtszám adatból vezethető le, de vannak korszerűbb közvetett meghatározási módszerek is.

Bár a szennyezőanyagok mikrobiológiai lebomlásához elegendő sejtszám, illetve biomassza jelenlétére van szükség a talajban, azonban a sejtszám, illetve a biomassza növekedése nem vezet szükségszerűen nagyobb lebomlási sebességhez [2]. A szennyezőanyag lebomlás mellett a mikrobiális biomassza a természetes megkötési folyamatokra is hat: megállapítható volt, hogy a mikroflórát tartalmazó talajok olajmegkötő képessége a steril talajokhoz képest általában erőteljesebb.

A legtöbb talaj esetében abból kell kiindulnunk, hogy a terület feltételeihez alkalmazkodott, az ásványolaj szennyezés lebontásához elegendő sejtszámmal rendelkező mikroflóra van jelen. Ezen paraméter mérése, például az ásványolaj eredetű szénhidrogéneket lebontó baktériumok számának meghatározása útján nagyon költséges. A talajlégzés paraméter segítségével megfelelően meghatározható a mikroflóra anyagsere intenzitása.

### **Talajlégzés**

Kétféle talajlégzés paraméter határozható meg, az alapanyagcsere légzés és a táptalajindukált légzés. Az alapanyagcsere légzés a respirációs vizsgálat alkalmával mért, a talaj szervesanyag forgalmából adódó oxigénfogyasztás, illetve széndioxid képződés megfelelője, és ezáltal a talajban aktuálisan található mikrobiális biomassza mérőszáma. A táptalajindukált légzést ezzel szemben a talaj kívülről bejuttatott tápanyaggal, például glükózzal való keverését követően határozzák meg. A táptalajindukált légzés a talajban potenciálisan létező biomassza mérőszáma, ideális tápanyagellátás mellett. A természetes lebomlási folyamatok értékelése szempontjából elsődlegesen az alapanyagcsere légzés a fontos.

A talajlégzés paraméter annak feltételezésével használható fel az ásványolaj eredetű szénhidrogének biológiai lebomlási sebességének számszerű értékeléséhez, hogy a természetes szénvegyületek lebomlása elhanyagolható az ásványolaj eredetű szénhidrogének lebomlásához képest. Amennyiben a respirációs vizsgálat alkalmával csak a széndioxid képződést tekintjük a talajlégzés mértékének, akkor ez a karbonáttartalom, vagy pH-pufferelés miatti széndioxid-képződés folytán hamis eredményt adhat (lásd a széndioxid fejezetet). Ezért a légzési aktivitás biztos kimutatása kizárólag az oxigénfogyasztás alapján lehetséges.

A talajminták mikrobiális biomassza tartalmának talajlégzésen keresztüli meghatározásával az ásványolaj eredetű szénhidrogének és a BTEX biológiai lebomlási folyamataival fennálló közvetlen összefüggés alapján a folyamatok fontos paraméteréhez jutunk. Ennek meghatározása az oxigén- és széndioxid-tartalom fizikai-kémiai paraméterek meghatározása mellett kiegészítésként szükséges.

### **Dehidrogenáz-aktivitás**

A dehidrogenáz-aktivitás a biológiai redox rendszerek indikátora és a talajra jellemző mikrobiális szervesanyag bontó aktivitás mérőszáma. Az erre vonatkozó szakirodalmi közlések száma azonban a szükségesnél kevesebb [2]. A dehidrogenáz aktivitás meghatározására szolgáló analízis egy mesterséges elektron akceptor, a trifeniltetrazólium al-

kalmazásán alapul, azonban gyakran hibás eredményt ad és korlátozottan reprodukálható [1], mivel az analízist erősen befolyásolják bizonyos talajtulajdonságok.

### **Nitrifikációs potenciál**

A nitrifikációs potenciál a talajban egyrészt az aerob mikrobiális aktivitás mérőszáma, másrészt az ökotoxikus hatások indikátora, mivel a folyamatban szerepet játszó nitrifikáló mikroorganizmusok szennyezőanyagokkal szembeni érzékenysége magas.

A nitrogéntartalmú vegyületek ásványosodásakor felszabaduló ammóniumionokat a nitrifikáló mikroorganizmusok gyorsan oxidálják. A folyamat a talaj savasságának növekedését okozza és ezzel elősegíti a kálium-, kalcium-, magnézium- és foszfáttartalmú ásványok oldódását. A nitrifikáció igen szűk pH-tartományban, pH 7-8 között mehet végbe [2].

A nitrifikáló mikroorganizmusok oxidáló aktivitásának lecsökkenése nem jár szükség-szerűen jelentős következményekkel az ökoszisztéma számára. Ez a tényező a talajban található toxikus anyagok érzékeny indikátoraként használható fel. A talaj-mikroorganizmusok korlátozott működésére utal, ha a nitrifikáció a 100 ng NO<sub>2</sub>-N/5h\*g száraz anyag irányérték alatt van.

A „nitrifikációs potenciál” paraméter és a nitrát tartalom együttes mérése fontos információt szolgáltat a talajban lejátszódó nitrifikáló és denitrifikáló folyamatokról.

### **4.1.6. A talaj, a talajlevegő, a szivárgóvíz és a talajvíz releváns paramétereinek vizsgálata egy ásványolaj eredetű szénhidrogén + BTEX szennyezés példáján**

Ebben a fejezetben egy ásványolaj eredetű szénhidrogén + BTEX szennyezés példáján táblázat formában mutatjuk be, hogy a természetes lebomlási és megkötési folyamatok vizsgálatába a talaj (beleértve a talajeluátumot is), a talajlevegő, a szivárgóvíz és a talajvíz melyik paramétereit kell bevonni és ezekről a paramétereikről milyen jellemző értékek és más információk állnak rendelkezésre. A paraméterek bemutatása a 4.1.1 -4.1.5. fejezetekben található.

ÚTMUTATÓ A TELÍTETLEN TALAJZÓNÁBAN LEJÁTSZÓDÓ TERMÉSZETES SZENNYEZŐANYAG LEBOMLÁS ÉS MEGKÖTÉS ÉRTÉKELÉSÉHEZ

**4.1.6. – 1. táblázat:** A talaj és a talajeulátum lényeges paraméterei példaként egy ásványolaj + BTEX szennyezés esetén bemutatva.

paraméterek	a folyamatok lejátszódásának jellemző tartománya <sup>1)</sup>	meghatározási, mérési határ <sup>2)</sup>	jelentőség, megjegyzések	hivatkozás <sup>3)</sup>
<b>szennyezők és metabolitok</b>				
szénhidrogéntartalom	20 000 mg/kg sz.a.	100 mg/kg sz.a. 0,1mg/dm <sup>3</sup> (TE)	a szennyezőanyag terhelést jellemzi; fékező hatást fejt ki 50 000 mg/kg sz.a. felett	
szénhidrogénvegyület azonosítás	C35-ig	n.é.	az anyagi összetételt és a metabolikus átalakulásokat jellemzi; az alifás és aromás szénhidrogének aránya lényeges; az izo-alkánok nem bomlanak le anaerob körülmények között	U, V-BAY, L, 68
BTEX és más alkil-benzolok	450 mg/kg sz.a.	0,1 mg/kg sz.a.	a szennyezőanyag terhelést jellemzi	U
benzoesav	n.a.	0,4 mg/kg sz.a.	a szennyezőanyag terhelést jellemzi; a toluol közbenső bomlásterméke; további bomlástermékek vizsgálata ésszerű	U
kísérő szennyezők	n.a.	klb.	fizikai-kémiai hatás a főszennyezőre; fékező hatás a biológiai lebontásra	L
<b>hidrogeológiai paraméterek</b>				
a telítetlen talajzóna vastagsága	10 m-ig, 10m-nél nagyobb vastagság esetén a költség szempontok figyelembevételével vizsgálandó	n.é.	hatással van a szennyezés kiterjedésére és transzportjára a szennyezőforrás elhelyezkedésétől függően	L, 82
kapilláris erő	0,5 MPa-ig	n.a.	hatással van a szennyező eloszlásra a talajban	L, 77
<b>talajparaméterek</b>				
talajféleség/ szemcseméret eloszlás	általában a közepes szemcseméretű talajok optimálisak	n.a.	befolyást gyakorol a szennyezőanyag szorpcióra és transzportra, valamint a biológiai elérhetőségre; a kapilláris erő, a pórus részarány és az agyagásvány-tartalom levezethető ebből a paraméterből	L
rétegfelépítés, rétegvastagság és -szövetszerkezet	n.a.	n.é.	finomszemcsés rétegekben a szennyezőanyagok felhalmozódhatnak; a réteghatárokon és repedésekben oldalirányú anyagtranszport mehet végbe	L
pórustérfogat	durva és finompórusok jelenléte szükséges	n.é.	befolyást gyakorol a talajventillációra és az anyagtranszportra; a >10 µm pórusok részaránya a lebomlás szempontjából, a <0,2 µm finompórusok részaránya pedig a megkötés szempontjából döntő fontosságú; indirekt meghatározás lehetséges a fizikai talajféleségen keresztül	
szivárgási tényező	$K_p > 10^{-4}$	n.a.	hatással van a talajventillációra és az anyagtranszportra; a megadott tartományérték <i>in situ</i> kármentesítések tapasztalataiból származik	L

ÚTMUTATÓ A TELÍTETLEN TALAJZÓNÁBAN LEJÁTSZÓDÓ TERMÉSZETES  
SZENNYEZŐANYAG LEBOMLÁS ÉS MEGKÖTÉS ÉRTÉKELÉSÉHEZ

4.1.6.1. - 1. táblázat: folytatás

paraméterek	a folyamatok lejátszódásának jellemző tartománya <sup>1)</sup>	meghatározási, mérési határ <sup>2)</sup>	jelentőség, megjegyzések	hivatkozás <sup>3)</sup>
humusztartalom	n.a.	n.a.	hatással van a szennyezőanyagok szorpciójának mértékére	
agyagásvány-tartalom	n.a.	n.a.	hatással van a szennyezőanyagok szorpciójának mértékére; teljes szennyezőanyag lebomlás lehetséges még magas agyagásvány-tartalom esetén is; közvetetten meghatározható a fizikai talajfűléség alapján	L, 27
Fe-, Al-, Mn-oxidok	n.a.	klb.	befolyást gyakorolnak a szennyezőanyagok adszorpciójának mértékére	L
karbonát-tartalom	n.a.	10 mg/kg sz.a.	környezeti tényező, amely befolyásolja a talaj pufferkapacitását és pH-értékét	U, L
kationcserélő kapacitás	n.a.	n.a.	a talajok reszorpciós kapacitásának mértékét jellemzik, mely a pH-tól függ	L
sótartalom	n.a.	klb.	hatással van a lebomlási és megkötési folyamatokra; meghatározása a szulfát-, nitrát-, és karbonáttartalomból, valamint más ionok mennyiségéből történhet	L
szárazanyag-tartalom, talajnedvesség	a vízfelvevő kapacitás 50 %-a optimális	0,1 tömeg%	környezeti tényező, mely hatással van a biológiai lebomlásra; a telítetlen talajzónában túlnyomórészt aerob lebomlás megy végbe 50 VFK % értéknél	L
<b>fizikai-kémiai paraméterek</b>				
talajhőmérséklet	5-40 °C legalább 10 °C évi középértékben	0,1 °C	a lebomlási és kémiai átalakulási folyamatokra befolyást gyakorló környezeti tényező; mérsékelt időjárási övezetben általában biztosítva van ez a feltétel	U, L
pH-érték	pH 5-9	0,1 pH-egység	a lebomlási és kémiai átalakulási folyamatokra befolyást gyakorló környezeti tényező; a pH <5 érték kizáró tényezőnek tekintendő	U, A- HLUG, A- ITVA, L, 51
nitrát tartalom	Függ a C-tartalomtól, optimális C:N arány = 100:10-15	2 mg/kg sz.a.	elektron akceptor amennyiben anareob folyamatok mennek végbe; a nitrogénellátás indikátora	L
vastartalom	n.a.	4 mg/kg sz.a.	elektron akceptor az anareob folyamatok számára; aerob feltételek mellett vashidroxid kiválás lehetséges	L, U
összes nitrogén-tartalom	Függ a C-tartalomtól, optimális C:N arány = 100:10-15	50 mg N/kg sz.a.	tápanyag, a nitrogénellátás indikátora	L
ammónium-tartalom	Függ a C-tartalomtól, optimális C:N arány = 100:10-1	2 mg/kg sz.a.	tápanyag, a nitrogénellátás indikátora	L

ÚTMUTATÓ A TELÍTETLEN TALAJZÓNÁBAN LEJÁTSZÓDÓ TERMÉSZETES SZENNYEZŐANYAG LEBOMLÁS ÉS MEGKÖTÉS ÉRTÉKELÉSÉHEZ

**4.1.6.1. - 1. táblázat: folytatás**

paraméterek	a folyamatok lejátszódásának jellemző tartománya <sup>1)</sup>	meghatározási, mérési határ <sup>2)</sup>	jelentőség, megjegyzések	hivatkozás <sup>3)</sup>
hozzáférhető foszfát	Függ a C-tartalomtól, optimális C:P arány = 100:2	30 mg/kg sz.a. (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -ben számítva)	tápanyag, a foszforellátás indikátora	L
összes szerves szén tartalom (TOC), oldható szerves szén tartalom (DOC)	n.a.	4 mg/kg sz.a., illetve 0,3 mg/dm <sup>3</sup>	a szénellátás indikátora a talajban; elektron donor; csökkenése biológiai lebomlási folyamatra utal; magas TOC érték hatást gyakorol a talajlégzésre, mint biológiai paraméterre	A-HLUG
<b>biológiai paraméterek</b>				
talajlégzés (bazális légzés)	>20 mg CO <sub>2</sub> / kg sz.a., nap	10 kg CO <sub>2</sub> /kg sz.a.,nap	a talaj-mikroorganizmusok anyagcsere aktivitásának mutatószáma; nagy karbonáttartalmú homoktalajok esetében figyelembe kell venni az abiotikus CO <sub>2</sub> képződést	U, L
dehidrogenáz-aktivitás	n.a.	4 ng TPF / g sz.a.,16 óra	a talaj-mikroorganizmusok metabolikus enzimaktivitásának indikátora; nem minden esetben kifejező és reprodukálható	L, 72
nitifikációs potenciál	Nem állnak rendelkezésre abszolút adatok; a szennyezetlen kontrolltalaj értékeitől való tolerálható eltérésre korlátozódik	2,5 mg/kg sz.a. (nitrogénként meghatározva)	a talaj-mikroorganizmusok élettér-funkcióinak ökotoxikológiai indikátora	D, L
mikrobiális biomassza	n.a.	n.a.	jellemzi a mikrobiális közösség nagyságát és a mikrobiológiai aktivitást; indirekt meghatározása a talajlégzésen keresztül is lehetséges, de csak az aerob organizmusokra és bizonyos anareob organizmusokra kiterjedően	L

**Jelmagyarázat:** n.a.: nem áll rendelkezésre adat  
n.é.: nem értelmezhető  
sz.a.: szárazanyag-tartalomra számítva  
TE: talajeluátumra vonatkoztatva  
klb: különböző lehet

1) Azt a mérési érték tartományt, koncentráció-tartományt illetve eloszlás-tartományt adtuk meg ebben az oszlopban, amelyeken belül a természetes lebomlási és megkötési folyamatok végbemennek.

2) A megadott meghatározási / mérési határ értékek az 5.3.1 fejezetben felsorolt meghatározási eljárásokra, és mérési pontosságokra vonatkoznak.

3) A feltüntetett adatok a következő forrásokból származnak:

- U: „Hosszú időtartamú vizsgálatok a telítetlen talajzónában végbemenő természetes szennyezőanyag lebomlás és a megkötés értékeléséhez” című kutatási jelentés [1];

-V-BAY: Hátrahagyott környezeti károk fenntartható mentesítése a természetes öntisztulási képesség kihasználásával, Bayerische Verbundvorhaben;

- A-HLUG: Segédlet a talajvíz monitorozott természetes lebomlási és megkötési folyamataihoz, Tartományi Környezetvédelmi és Geológiai Hivatal, Hessen [5];

**ÚTMUTATÓ A TELÍTETLEN TALAJZÓNÁBAN LEJÁTSZÓDÓ TERMÉSZETES SZENNYEZŐANYAG LEBOMLÁS ÉS MEGKÖTÉS ÉRTÉKELÉSÉHEZ**

- A-ITVA: „Monitorozott természetes lebomlás” H1-12 segédlet, Ingenieurtechnisches Verband Altlasten eV. [4];
- D: „Talaj és talajösszetevők biológiai vizsgálati eljárásai” jelentés, DECHEMA Munkacsoport, „Talajok biológiai vizsgálati eljárásainak validálása” [19];
- L: Szakirodalmi tanulmány a fenti „U” jelű kutatási projekt keretében;
- A szakirodalmi tanulmányban felhasznált eredeti szakirodalmi közlések: Az egyes eredeti közlemények számozását (1, 2, 3,...) a szakirodalmi tanulmányból vettük át, felsorolásuk annak mellékletében a 29-31. oldalon található.

**4.1.6. - 2. táblázat:** A talajlevegő releváns paraméterei példaként egy ásványolaj eredetű szénhidrogén + BTEX szennyezés esetén bemutatva.

Paraméterek	a folyamatok lejátszódásának jellemző tartománya <sup>1)</sup>	meghatározási, mérési határ <sup>2)</sup>	jelentőség, megjegyzések	hivatkozás <sup>3)</sup>
<b>szennyezők és metabolitok</b>				
összes szerves szén tartalom (TOC)	>100 mg/m <sup>3</sup>	1 mg/ m <sup>3</sup>	a szennyezési helyzet jellemzésének összegző paramétere	U
n-alkánok	>10 mg/m <sup>3</sup>	1 mg/ m <sup>3</sup>	a szénhidrogén illékony alkotóinak jellemzése / transzportja	U
szénhidrogén azonosítás	C4-10		az illékony szénhidrogén alkotók azonosítása; a paraméter csak akkor ésszerű, ha az n-alkán / izo-alkán arány lényeges	U
BTEX és alkilbenzolok	>1 mg/m <sup>3</sup>	> 0,1 mg/m <sup>3</sup>	a szénhidrogén illékony alkotóinak jellemzése / transzportja	U
<b>fizikai-kémiai paraméterek</b>				
Oxigéntartalom	legalább 5 %-kal alacsonyabb, mint az összehasonlítható nem szennyezett talaj esetében  <1 % a szennyezőanyag lebomlás előrehaladásának egyértelmű indikátora	0,1 térfogat %	az aerob biológiai lebomlási folyamatok elektron akceptora	U, A- HLUG L
széndioxid-tartalom	legalább 5 %-kal magasabb, mint az összehasonlítható nem szennyezett talaj esetében	0,1 térfogat %	az aerob biológiai lebomlási folyamatok végterméke; csak >1000 mg/kg ásványolaj eredetű szénhidrogén tartalom felett kifejező; karbonáttartalmú talajok esetében az abiotikus CO <sub>2</sub> -képződést figyelembe kell venni	L, 42
Metán	n.a.	0,1 térfogat %	az anaerob lebomlás végterméke; a biológiai lebomlási folyamatok elektron donora; magnövekedett mennyisége anaerob folyamatokra utal	30, 51, 108, 110, 122

ÚTMUTATÓ A TELÍTETLEN TALAJZÓNÁBAN LEJÁTSZÓDÓ TERMÉSZETES SZENNYEZŐANYAG LEBOMLÁS ÉS MEGKÖTÉS ÉRTÉKELÉSÉHEZ

**4.1.6. - 2. táblázat:** folytatás

Paraméterek	a folyamatok lejátszódásának jellemző tartománya <sup>1)</sup>	meghatározási, mérési határ <sup>2)</sup>	jelentőség, megjegyzések	hivatkozás <sup>3)</sup>
Molekuláris hidrogén	n.a.		az anareobiózis indikátora; a biológiai lebomlási folyamatok elektron donora; magnövekedett mennyisége anaerob folyamatokra utal	L
Kénhidrogén	n.a.	n.a.	az anaerob biológiai lebomlási folyamat elektron donora; szennyezetlen talajnál mérhetőhöz képest magnövekedett mennyisége anaerob folyamatokra utal	L

1), 2), 3) lásd a 4.1.6. – 1. táblázat lábjegyzetei.

A szivárgóvíz releváns paramétereit a 4.6.1.-3. táblázatban foglaltuk össze. Az 5.1.2. fejezetben leírt okokból (a mintavárározási idő miatti mérési hiba, kipárolgási veszteség) a szennyezőanyagokat nem soroltuk a szivárgóvíz releváns paramétereire közé.

**4.1.6. - 3. táblázat:** A szivárgóvíz releváns paramétereire példaként egy ásványolaj eredetű szénhidrogén + BTEX szennyezés esetével bemutatva

paraméterek	a folyamatok lejátszódásának jellemző tartománya <sup>1)</sup>	meghatározási, mérési határ <sup>2)</sup>	jelentőség, megjegyzések	hivatkozás <sup>3)</sup>
<b>fizikai-kémiai paraméterek</b>				
vezetőképesség	n.a.	1 $\mu\text{S}/\text{cm}$	a különböző ionok indikátora; befolyást gyakorol a környezeti feltételekre	85
pH-érték	pH 5-9	0,1 pH egység	a biológiai lebomlási és kémiai átalakulási folyamatokra befolyást gyakorló környezeti tényező	U, L A-HLUG A-ITVA,
Nitrát	<5 $\text{mg}/\text{dm}^3$ jelzi a természetes lebomlási folyamatot (talajvízből levezetett érték)	0,1 $\text{mg}/\text{dm}^3$	elektron akceptor, amennyiben anaerob folyamatok mennek végbe, a nitrogénellátás indikátora	V-BAY A-HLUG
Vas	Fe(II) >5 $\text{mg}/\text{dm}^3$ érték a természetes lebomlási folyamatok egyértelmű indikátora	0,02 $\text{mg}/\text{dm}^3$	az Fe(II) az anaerob lebomlási folyamatok végterméke; az Fe(II) tartalom növekedése a mikrobiológiai lebomlása utal	V-BAY A-HLUG
szulfát	<5 $\text{mg}/\text{dm}^3$ jelzi a természetes lebomlási folyamatokat (talajvízből levezetett érték)	0,1 $\text{mg}/\text{dm}^3$	elektron akceptor az anaerob lebomlási folyamatok számára; a szulfáttartalom csökkenés szulfátlégrezésre mutat	V-BAY A-HLUG
hozzáférhető foszfát	függ a C-tartalomtól; optimális C:P arány = 100:2	0,1 $\text{mg}/\text{dm}^3$	tápanyag; a foszforellátás indikátora	L
hidrogénkarbonát/savkapacitás	n.a.	n.a.	a pufferkapacitásra és a pH-értékre befolyást gyakorló környezeti tényező; növekedése biológiai lebomlásra utal	A-HULG

ÚTMUTATÓ A TELÍTETLEN TALAJZÓNÁBAN LEJÁTSZÓDÓ TERMÉSZETES SZENNYEZŐANYAG LEBOMLÁS ÉS MEGKÖTÉS ÉRTÉKELÉSÉHEZ

**4.1.6. - 3. táblázat:** folytatás

paraméterek	a folyamatok lejátszódásának jellemző tartománya <sup>1)</sup>	meghatározási, mérési határ <sup>2)</sup>	jelentőség, megjegyzések	hivatkozás <sup>3)</sup>
összes szerves szén tartalom (TOC), oldható szerves szén tartalom (DOC)	n.a.	0,3 mg/dm <sup>3</sup>	a szénellátás indikátora vizes fázisokban; elektron donor; csökkenése biológiai lebomlási folyamatra utal;	A-HLUG

1), 2), 3) lásd a 4.1.6. – 1. táblázat lábjegyzetei.

A talajvíz releváns paramétereit 4.1.6.-4 táblázat foglalja össze figyelembe véve a talajvíz anyagtranszport útvonal funkcióit, illetve a szennyezőanyag lebomlási reakcióter talajvíz funkciót.

**4.1.6. - 4. táblázat:** A talajvíz releváns paramétereit példaként egy ásványolaj eredetű szénhidrogén + BTEX szennyezés estén bemutatva

paraméterek	a folyamatok lejátszódásának jellemző tartománya <sup>1)</sup>	meghatározási, mérési határ <sup>2)</sup>	jelentőség, megjegyzések	hivatkozás <sup>3)</sup>
<b>szennyezőanyagok, metabolitok</b>				
szénhidrogéntartalom	< 5 mg/dm <sup>3</sup> (ez az A-HLUG szerinti vizsgálati érték 50-szeresének felel meg)	0,1 mg/dm <sup>3</sup>	a szennyeződés helyzetének jellemzése	U, A-HLUG
szénhidrogénvegyület azonosítás	C35-ig	n.é.	az anyagi összetételt és a metabolikus átalakulásokat jellemzi ; az alifás és aromás szénhidrogének aránya lényeges; az n-alkánok relatív csökkenése a phytánhoz/pristánhoz viszonyítva a természetes lebomlási folyamatokat jelzi; a C10-től C40-ig terjedően ajánlható a szénhidrogén alkotók azonosítása (elemzése)	U, V-BAY A-HLUG L, 68
BTEX és más alkil-benzolok	< 1 mg/dm <sup>3</sup> (ez az A-HLUG szerinti vizsgálati érték 50-szeresének felel meg); az egyes alkotókra vonatkozóan max. < 0,2 mg/dm <sup>3</sup>	1 µg/dm <sup>3</sup>	a szennyezési helyzet jellemzése	L, A-HLUG
benzooesavak	n.a.	0,01 mg/dm <sup>3</sup>	a biológiai lebomlás jellemzése; a toluol metabolitja; további lebomlási termékek vizsgálata ésszerű	U

ÚTMUTATÓ A TELÍTETLEN TALAJZÓNÁBAN LEJÁTSZÓDÓ TERMÉSZETES  
SZENNYEZŐANYAG LEBOMLÁS ÉS MEGKÖTÉS ÉRTÉKELÉSÉHEZ

**4.1.6.-4. táblázat: folytatás**

paraméterek	a folyamatok lejátszódásának jellemző tartománya <sup>1)</sup>	meghatározási, mérési határ <sup>2)</sup>	jelentőség, megjegyzések	hivatkozás <sup>3)</sup>
<b>hidrogeológiai paraméterek</b>				
talajvíztükör helyzete	n.é.	1 cm	a szennyeződéstranszportra befolyást gyakorol; ingadozásai befolyásolják a talajvíz szennyezőanyag tartalmát	U
talajvíz utánpótlódási sebesség	200-350 mm/év	n.a.	befolyást gyakorol a szennyezőeloszlásra, és -transzportra	U
<b>fizikai-kémiai paraméterek</b>				
hőmérséklet	5-25 °C	0,1 °C	a lebomlási és kémiai átalakulási folyamatokra befolyást gyakorló környezeti tényező;	L
vezetőképesség	n.a.	1 µS/cm	a különböző ionok indikátora; befolyást gyakorol a környezeti feltételekre	85
pH-érték	pH 5-9	0,1 pH egység	a biológiai lebomlási és kémiai átalakulási folyamatokra befolyást gyakorló környezeti tényező	U, A- HLUG A- ITVA, L, 51
redoxpotenciál	<-100 mV érték a természetes lebomlási folyamatok egyértelmű indikátora	1 mV	a biológiai lebomlási és kémiai átalakulási folyamatokra befolyást gyakorló környezeti tényező; megkülönböztető paraméter az aerob, illetve anareob lebomlási körülményekre vonatkozóan	V- BAY, L
oxigéntartalom	> 2 mg/dm <sup>3</sup> < 0,5 mg/dm <sup>3</sup> egyértelműen jelzi az oxigénfogyasztást és annak a lebomlási folyamatok által korlátozott mivoltát	0,1 mg/dm <sup>3</sup>	az aerob biológiai lebomlási folyamatok elektron akceptora	V- BAY, L
nitrát	<5 mg/dm <sup>3</sup> jelzi a természetes lebomlási folyamatot; 50 mg/dm <sup>3</sup> határérték az ivóvízre vonatkozó előírás szerint	0,1 mg/dm <sup>3</sup>	elektron akceptor amennyiben anareob folyamatok mennek végbe; csökkenése a denitrifikációt jelzi; a nitrogénellátás indikátora	V- BAY A- HLUG
ammónium	n.a. 0,5 mg/dm <sup>3</sup> határérték az ivóvízre vonatkozó előírás szerint	< 0,03 mg/dm <sup>3</sup>	tápanyag; a nitrogénellátás indikátora; oxigénszegény környezeti feltételeket jelez	L
vas	Fe(II) >5mg/dm <sup>3</sup> érték a természetes lebomlási folyamatok egyértelmű indikátora	0,02 mg/dm <sup>3</sup>	az Fe(II) az anareob lebomlási folyamatok végterméke; az Fe(II) tartalom növekedése a mikrobiológiai lebomlása utal	V- BAY A- HLUG
szulfát	<5 mg/dm <sup>3</sup> jelzi a természetes lebomlási folyamatokat	0,1 mg/dm <sup>3</sup>	elektron akceptor az anareob lebomlási folyamatok számára; a szulfáttartalom csökkenés szulfátlégre mutat	V- BAY A- HLUG

**ÚTMUTATÓ A TELÍTETLEN TALAJZÓNÁBAN LEJÁTSZÓDÓ TERMÉSZETES SZENNYEZŐANYAG LEBOMLÁS ÉS MEGKÖTÉS ÉRTÉKELÉSÉHEZ**

**4.1.6. - 4. táblázat: folytatás**

paraméterek	a folyamatok lejátszódásának jellemző tartománya <sup>1)</sup>	meghatározási, mérési határ <sup>2)</sup>	Jelentőség, megjegyzések	hivatkozás <sup>3)</sup>
hozzáférhető foszfát	függ a széntartalomtól; optimális C:P arány = 100:2	0,1 mg/ dm <sup>3</sup>	tápanyag; a foszforellátás indikátora	L
hidrogénkarbonát /savkapacitás	n.a.	n.a.	a pufferkapacitásra és a pH-értékre befolyást gyakorló miliótényező; növekedése biológiai lebomlásra utal	A-HULG
összes szerves szén tartalom (TOC), oldható szerves szén tartalom (DOC)	n.a.	0,3 mg/dm <sup>3</sup>	a szénellátás indikátora vizes fázisokban; elektron donor; csökkenése biológiai lebomlási folyamatra utal;	A-HLUG
kénhidrogén	n.a.	n.a.	az anaerob lebomlás végterméke; a biológiai lebomlási folyamatok elektron donora; növekedése a háttérértékhez képest anaerob biológiai lebomlási folyamatokra utal	L
metán	n.a.	1 µg/dm <sup>3</sup>	az anaerob lebomlás végterméke; a biológiai lebomlási folyamatok elektron donora; növekedése a háttérértékhez képest anaerob biológiai lebomlási folyamatokra utal	L, 54, [11]

1), 2), 3) lásd a 4.1.6. – 1. táblázat lábjegyzetei.

A telítetlen talajzóna természetes lebomlási és megkötési folyamatainak értékelése szempontjából releváns éghajlati paramétereket az alábbi, 4.1.6. – 5. táblázat mutatja be.

**4.1.6. - 5. táblázat: A természetes lebomlási és megkötési folyamatok releváns éghajlati paraméterei.**

paraméterek	a folyamatok lejátszódásának jellemző tartománya <sup>1)</sup>	meghatározási, mérési határ <sup>2)</sup>	jelentőség, megjegyzések	hivatkozás <sup>3)</sup>
levegő hőmérséklet	5-40 °C	0,1 °C	befolyást gyakorol a környezeti feltételekre; talajlevegő mintavételt 5 °C alatt nem szabad végezni	U, L
csapadékmennyiség	500-1 000 mm a megfelelő szivárgóvíz mennyiséghez szükséges	0,1 mm	befolyást gyakorol a szennyezőanyag eloszlásra és -transzportra; fizikai talajfőleségtől függően a szükséges csapadékmennyiség legalább: 550 mm homoktalajok esetén, és 850 mm agyagos talajok esetén	L
légnomás	mintegy 1 000 hPa	0,1 hPa	befolyást gyakorol a talajlevegővel végbemenő anyagtranszportra és a felületi emisszióra; különösen nagy nyomásingadozás a mintavételeket befolyásolhatja	L

1), 2), 3) lásd a 4.1.6. – 1. táblázat lábjegyzetei.

## 4.2. A telítetlen és a telített talajzóna közötti kölcsönhatások

A telítetlen és telített talajzóna közötti kölcsönhatások az átmeneti zónában, a kapilláris zónában lépnek fel. A két talajzóna között a kapilláris zónán keresztül mennek végbe az anyagátadási folyamatok. A talaj kapilláris hatása miatt a kapilláris zónában nem csak a telítetlen talajzóna felől a telített talajzóna felé irányuló anyagtranszport lehetséges, hanem ellenkező irányú is. Az anyagátadási folyamatok szempontjából egyrészt a transzportközeg (szivárgóvíz, talajlevegő) bír fontossággal, másrészt a talajtest átmeneti zónában fennálló állapotjellemzői – pórusrendszer, repedések – lényegesek.

A telítetlen és telített talajzóna közötti kölcsönhatások szempontjából a talajvízszint ingadozásainak igen nagy jelentősége van. A váltakozó talajvízállás folytán a talajvízben található anyagok (például anionok és kationok) a telítetlen talajzónába továbbíthatnak. Fordított irányban pedig, a telítetlen talajzóna szilárdanyag mátrixán szorbeálódott anyagok oldódás révén a talajvízbe juthatnak. Emellett a talajvízszint ingadozása a víztartalom időleges változását és a légpórus térfogat megváltozását idézheti elő a telítetlen talajzóna telített zónával határos talajrétegeiben és ezáltal az átmeneti zóna környezeti körülményeinek megváltozásához vezethet.

A szennyezett területeken a telítetlen és a telített talajzóna közötti kölcsönhatások jelentős hatást gyakorolnak a szennyezőanyagok természetes lebomlására és megkötésére. Ezek a kölcsönhatások befolyásolják a szennyezőanyag eloszlást és a szennyezésterjedést, a lebomlás körülményeit, valamint a mikroorganizmusok által meghatározott, adott szennyezőanyagra vonatkozóan fennálló lebontási kapacitást is.

A szennyezésterjedés szempontjából a telítetlen talajzónából a talajvíz felé irányuló következő transzport útvonalaknak és anyagátadási folyamatoknak van jelentőségük:

- nem víz fázisú folyadékok (Non Aqueous Phase Liquid, azaz NAPL) függőleges irányú transzportja, például az ásványolaj eredetű szénhidrogének, kismértékben klórozott szénhidrogének esetében,
- az oldott anyagok transzportja a szivárgóvíz terjedési útvonalon,
- az illékony anyagok szétterjedése a talajlevegő transzportútvonalon,
- a talajvízszint ingadozás miatti anyagszállítás.

A szennyezőanyagok anyagtranszport és anyagátadás útvonalát lényegében fizikai-kémiai tulajdonságaik határozzák meg. Nem víz fázisú szennyezőanyagok, mint például az ásványolaj eredetű szénhidrogének esetében különösen a szennyezőanyag viszkozitása és sűrűsége fontos jellemző. Az ásványolaj eredetű szénhidrogén, mint könnyebb fázis, a talajvíz felszínén úszik és mint összefüggő fázis a talajvízszintnek megfelelően mozog, emellett egy visszamaradó telített zónát hátrahagyva.

A telítetlen és telített talajzónák közötti átmeneti zónában lejátszódó lebomlási folyamatokat az ott fennálló környezeti feltételek határozzák meg. Ezeket a feltételeket a két talajzóna közötti kölcsönhatás a következő tényezőkön keresztül módosíthatja:

- A tápanyagtartalom változása, amely vagy a lebomlási folyamatok korlátozását, vagy épp ellenkezőleg, a fennálló tápanyagkorlát feloldását eredményezi.
- A talaj víztartalmának változása.
- Az oxigénellátás változása, amely hatással van az aerob, illetve anaerob lebomlási folyamatokra. Az olyan szennyezőanyagok esetében, mint például az ásványolaj eredetű szénhidrogének, amelyek lebomlása túlnyomórészt a kapilláris zónában megy végbe, a váltakozó aerob és anaerob környezeti feltételek ösztönző hatást gyakorolnak a biológiai lebomlásra [2].

Emellett a talajvízállás szintváltozásai mikroorganizmusokat juttathatnak be a telítetlen talajzónából a talajvízbe, vagy megfordítva. Ez hozzájárulhat az adott terület biológiai lebontási potenciáljának térbeli kiterjedéséhez.

Különös figyelmet érdemelnek a telítetlen és telített talajzónák közötti kölcsönhatások a természetes lebomlási és megkötési folyamatok talajvíz-monitoringja szempontjából. A [1] kutatási projekt vizsgálatai kimutatták, hogy a talajvízszint ingadozásai jelentős hatással vannak a BTEX vegyületek víztartó rétegbe történő szállítására és ezen vegyületek koncentráció-profiljára a talajvízben. Ez a hatás nemcsak a kiszállítás helyén volt igazolható, hanem a talajvíz áramlási sebességének megfelelő időbeli késleltetéssel a talajvíz áramlás irányában is, a szennyezőcsóva mentén. A szennyezőanyag szennyezőcsóva mentén fellépő koncentrációcsökkenésének kimutatása tehát nem elegendő bizonyíték a természetes lebomlási és megkötési folyamatok igazolására. (Ez a meghatározás rendszerint egyidejű mérésekkel történik.) A telítetlen talajzónából a talajvízbe irányuló szennyezőanyag-átadás időbeli lefolyását mindenképpen figyelembe kell venni és a monitoring eredményeit ennek megfelelően kell értékelni.

A víztartó rétegbe szállított szennyezőanyagok talajvízállás ingadozás által előidézett koncentrációváltozásai a talajvízszint ingadozás tartományában fennálló szennyezőanyag eloszlástól függenek. Így például a talajvízszint megemelkedése a talajvíz szennyezőanyag koncentrációjának növekedését eredményezheti, amennyiben szennyezőgóc található a talajvízszint ingadozás tartományában, de le is csökkenhet a talajvíz szennyezőanyag koncentrációja, amennyiben a nagyobb vízmennyiség hígító hatása érvényesül. A szennyezőanyag koncentráció időben lejátszódó változásait nehéz előre jelezni, ezért a szennyezőanyag koncentráció monitoringja mindenképpen szükséges.

## **5. A telítetlen talajzónában végbemenő természetes szennyező lebomlási és megkötési folyamatok igazolásának, és a koncentrációcsökkenés analitikai ellenőrzésének vizsgálati programja egy TPH + BTEX szennyezés példáján keresztül**

Ebben a fejezetben bemutatjuk, hogy mit tartalmazhat a vizsgálati stratégia és az ebből levezetett, a telítetlen talajzónában lejátszódó természetes lebomlási és megkötési folyamatokat igazoló vizsgálati program. Ismertetjük emellett a vizsgálatok mennyiségi kereteivel és minőségbiztosításával szemben támasztott minimális követelményeket is. A vizsgálati program két alapvető előfeltétele, hogy a természetes lebomlási és megkötési folyamatok kármentesítési stratégiába történő bevonását a hatóság elfogadta és a helyszín specifikus adottságok ehhez megfelelőek.

Példaként a kutatási program tárgyát képező németországi Schäferhof-Süd (Nienburg, Alsó-Szászország) üzemanyag tartálytelep terület vizsgálatához kialakított vizsgálati programot mutatjuk be. (Ezt a programot a [2] kutatási projekt keretében hajtották végre.) A vizsgálatok volumene és adott esetben a vizsgálatok típusa is más esetekben – az adott helyszín adottságaitól és a kármentesítés célkitűzéseitől függően – jelentősen eltérhet ettől.

### **5.1. Minőségbiztosítás a vizsgálati program keretében**

A Schäferhof-Süd tartálypark terület vizsgálatakor a minőségbiztosítás alapját a következő szabályozások képezték:

- A németországi Szövetségi Talajvédelmi és Hátrahagyott Környezeti Károk Törvény. Ezen belül különösen az 1 Függelék: A mintavételre, az elemzésre és a vizsgálatok minőségbiztosítására vonatkozó követelmények [7],<sup>8</sup>
- A Szövetségi és Tartományi Talajvédelmi Munkaközösség Minőségbiztosítási Segédlete [9],
- A mintavételre, a mintakezelésre, és a kémiai vizsgálati módszerekre vonatkozó követelmények állami ingatlanok esetében [12],
- Normák, műszaki segédletek és más általánosan elfogadott módszerek.

Azoknak a paramétereknek a meghatározásához, amelyekhez nem álltak rendelkezésre a fentiekben felsorolt alapvető szabályozások, a kutatást végző intézmény bevált módszereit alkalmaztuk és mutattuk be [7].

A helyszíni vizsgálati program kivitelezésekor a minőségbiztosítás a következő munkafázisokra terjed ki:

- vizsgálati stratégia, vizsgálati program,
- mintavétel: talaj, talajlevegő, szivárgóvíz, és talajvíz,

---

<sup>8</sup> A szennyezések mérésére (mintavételre, elemzésekre) vonatkozó hazai jogszabályi alapkövetelmények a 6/2009.(IV. 14.) KvVM-EüM-FVM együttes rendelet 2. és 3. §-ban és IV. Mellékletében található, az előírásokat az együttes rendeletben foglalt mérési kötelezettségek egységes szabályozása (Mérési Kódex) tartalmazza. A vizsgálatok minőségbiztosítására vonatkozó hazai követelményekre vonatkozó átfogó tájékoztatás a Kármentesítési Útmutató 6. „Tényfeltárás és monitoring” című kiadványokban található.

ÚTMUTATÓ A TELÍTETLEN TALAJZÓNÁBAN LEJÁTSZÓDÓ TERMÉSZETES SZENNYEZŐANYAG LEBOMLÁS ÉS MEGKÖTÉS ÉRTÉKELÉSÉHEZ

- mintakezelés,
- helyszíni analitika,
- kémiai-analitikai vizsgálatok – laboratóriumi eljárások,
- az elemzési eredmények értelmezése és értékelése.

Az analitikai vizsgálatok minőségbiztosítása szempontjából ki kell emelnünk a helyszíni analitikát, amelynek eredményét a mintatárolás és -kezelés nem hamisíthatja meg. A helyszíni analízis általában egyszerűen kivitelezhető, jól bevált módszert jelent.

**5.1.1. - 1. táblázat:** A telítetlen talajzóna természetes szennyezőanyag lebomlási és megkötési folyamatainak releváns paraméterei (egy TPH + BTEX szennyeződés példáján keresztül).

<b>kategóriák</b>	<b>paraméterek</b>	<b>Közeg *</b>
szennyezők, metabolitok (közbenső bomlástermékek)	szénhidrogén-tartalom szénhidrogén vegyületek azonosítása n-alkán tartalom BTEX vegyületek és alkil-benzolok koncentrációja benzoesav koncentráció	T, TV T TL T, TL, TV TV
a terület hidrogeológiai paraméterei	Talajvízszint szivárgóvíz mennyiség	TV/T CS, (SZV, TV)
talajparaméterek	fizikai talajféleség / szemcseméret eloszlás rétegfelépítés, rétegvastagságok Pórustérfogat szivárgási tényező talajnedvesség, szárazanyag-tartalom	T T T T T
fizikai-kémiai paraméterek	Hőmérséklet Légnomás Csapadékmennyiség Vezetőképesség pH-érték Redoxpotenciál Oxigéntartalom széndioxid-tartalom Nitráttartalom összes nitrogén/ammónium hozzáférhető foszfát Vastartalom Szulfáttartalom összes szerves szén tartalom (TOC), oldható szerves szén tartalom (DOC) karbonát-tartalom, karbonátkeménység	T, L, TV L CS SZV, TV T, SZV, TV TV TL, TV TL, T, SZV, TV T T T, SZV, TV TV T, SZV, TV T T, SZV, TV
biológiai paraméterek	Talajlégzés nitrifikációs potenciál	T T

\* A közegek jele: T: talaj, TL: talajlevegő, L: levegő, TV: talajvíz, SZV: szivárgóvíz.

### 5.1.1. A vizsgálati programmal szemben támasztott minimális követelmények

A vizsgálati program célja annak vizsgálata, hogy megfelelőek-e a helyszín-specifikus keretfeltételek a természetes lebomlási és megkötési folyamatok kármentesítési stratégiába való beillesztése szempontjából. Az alábbiakban bemutatjuk a helyszíni vizsgálati programmal szemben támasztott minimálisan elfogadható követelményeket. A 4. fejezetben bemutatott szakmai megalapozásnak megfelelően az 5.1.1. - 1. táblázatban szerepeltetett paraméterek alkalmazhatók a talaj, talajlevegő, szivárgóvíz és talajvíz vizsgálatakor.

Bemutatjuk továbbá a kialakítandó mérési helyek, a mintavételek számának, és a mintavétel időbeli tervezésének követelményeit. A tényleges követelmények adott esetben a helyszín adottságaitól és a szennyezés helyzeti jellemzőitől függően meghaladhatják a leírtakat. A kialakítandó mérési helyekkel, a mintavételek számával, és a vizsgálati időintervallummal szembeni követelmények a kapott eredményektől függően, a vizsgálatok folyamán változhatnak, és emiatt szükség lehet a helyszíni vizsgálati program módosítására.

#### Mintavételi helyek, fúrási területek

- **Talaj:** 1 m-nél mélyebben fekvő szennyeződés esetén a talajmintavétel besajtolásos magmintavétellel történik. A fúrásokat a vizsgálat kezdetén kijelölt kör alakú fúrási területeken kell végrehajtani. Minden egyes vizsgálati időpontban két egymástól legalább 1 m-re levő fúrást kell lemélyíteni a kijelölt fúrási területen belül. A későbbi időpontban kivitelezett fúrásoknak ugyanígy 1 m-re kell lenniük egymástól és a korábbi fúrólukaktól. Ilyen módon a fúrások nem befolyásolják egymást és az elemzési eredmények összehasonlíthatósága biztosítható. A fúrási területek elrendezése a szennyezés horizontális kiterjedésétől és eloszlásától függ. Szennyezési gócként legalább két fúrási területet kell kijelölni. A fúrási területek száma a helyszín adottságainak függően ennél lényegesen nagyobb is lehet. Függőleges irányban a fúrásoknak a telítetlen talajzónában elhelyezkedő szennyezés teljes mélységét kell elérniük. Amennyiben a víztartó réteget elérte és oda bejutott a szennyezés, akkor a kapilláris réteget és a talajvizet vezető réteg felső zónáját is el kell érnie a fúrásnak.
- **Talajlevegő:** A talajlevegő mintavételhez a 3865 VDI segédlet szerint kiépített mintavevő állások létrehozásával állandó mintavételi helyek kialakítása javasolható. A mintavevő kiépítésének mélysége a függőleges irányú szennyezőanyag eloszláshoz igazodik. Nagy mélységbe lejutott szennyeződés esetén két, vagy több mélységben is szükséges lehet talajlevegő mintavétel. Ez utóbbi esetben betartandó, hogy a talajvízszint ingadozása miatt a szűrőzött szakasznak legalább 2 m-re kell lennie a talajvíztükörtől. Szennyezési gócként legalább egy talajlevegő mintavételi helyet kell kijelölni.
- **Szivárgóvíz:** A szivárgóvíz összetételének elvileg nagy jelentősége van a természetes lebomlási és megkötési folyamatok értékelése szempontjából. A szivárgóvíz elszívó szondával történő mintavétele műszaki nehézségekkel jár (amint azt az 5.1.2. fejezet bemutatja). A vizsgálati eredmény megbízhatósága is korlátozott. Emiatt a szivárgóvíz vizsgálatok csak lehetséges kiegészítő vizsgálatként javasolhatók, ami-

kor más közegek vizsgálatával valamelyik lényeges paraméter nem határozható meg. A szivárgóvíz mintavételi helyek kiépítéséhez nem állnak rendelkezésre szabványosított megoldások. Annak érdekében, hogy a mintavételi helyen a lehető legkevésbé bolygassák a talajt, a műanyag szárral meghosszabbított szondákat vezetősínek segítségével a függőlegeshez képest mintegy 30° szögben besajtolással helyezték a talajba (lásd 5.3.2. fejezet). Így a kevésbé bolygatott talajrészről lehet szivárgóvíz mintához jutni. Többnyire nemesacél elszívó szondát alkalmaznak, mivel ennek anyaga csekély mértékben adszorbeálja a szennyező anyagokat és hosszú ideig ellenálló. Nagy jelentősége van a mintavétel szempontjából az elszívó szonda és a talaj közötti átmeneti zóna funkcionálisan megfelelő kialakításának, ajánlatos kvarcliszt köpennyel körülvenni a szondát. Az elszívó szondát nem adszorbeáló anyagból (például teflon) készült tömlővezetéken keresztül gyűjtőpalackkal kell összekapcsolni. A gyűjtőpalack vákuum szivattyúhoz csatlakozik, amely folyamatosan légnyomáscsökkenést tart fenn. A fúrólyukat a szonda csúcsánál és talajfelszíni részén agyaggal, a többi részen a furatanyaggal kell kitölteni. A mérési helyek számára és kiépítési mélységére a talajlevegő esetében elmondott minimális követelmények érvényesek. Ez azt jelenti, hogy minden szennyező gócnál legalább egy mérési helyet kell biztosítani. Itt is be kell tartani a legalább 2 m távolságot a szűrőzött szakasz és a talajvíztükör között annak érdekében, hogy a talajvízszint megemelkedése ne hamisítsa meg az eredményeket.

- **Talajvíz:** Mintavételi helyeket csak abban az esetben kell létrehozni, amennyiben a területen a telített talajzónába irányuló szennyezőanyag transzport megy végbe, vagy legalábbis nem zárható ki a szennyezőanyag-átadás a telített talajzónába. A talajvíz mintavevő helyek a [9] előírásai szerint építendőek ki<sup>9</sup>. A korábban kapott mérési eredmények, vagy a szennyező anyagok fizikai-kémiai tulajdonságai alapján becsült, illetve várható szennyezőanyag eloszlástól függően olyan mintavételi hely csoportokat kell tervezni, amelyek célszerűen legalább két (vagy adott esetben még több) szűrőzött szakaszt tartalmaznak a különböző mélységekből történő mintavételhez. Legalább egy mintavételi hely kiépítése szükséges a szennyező góc tartományában és egy a talajvíz áramlás irányával ellentétes irányban (a felvízi részen) a szennyezett tartományon kívül. A szennyezésterjedés irányában lefelé (az alvízi részen), az adott esetben fennálló szennyezőcsóva hosszának megfelelően egy, vagy több mintavételi helyet szükséges létrehozni. Amennyiben a terület hidrogeológiai viszonyai tisztázatlanok, és a víztartó rétegben szennyezőcsóva alakult ki, az előbbieken mellett oldalirányban legalább további két mintavételi hely kiépítése szükséges az oldalirányú szennyezőcsóva kiterjedés meghatározása érdekében.
- **Meteorológiai mérőállomás:** A természetes lebomlási és megkötési folyamatok szempontjából lényeges éghajlati tényezők (levegőhőmérséklet, légnyomás, csapadékmennyiség) meghatározása céljából rendszerint a meteorológiai szolgálat legközelebbi mérőállomásának adatai használhatók. A mobil mérőállomás helyszíni alkalmazása csak akkor szükséges, ha a körzeti meteorológiai mérőállomás adatainak a felhasználhatóságával szemben megalapozott érvek állnak rendelkezésre.

---

<sup>9</sup> A talajvíz mintavevő helyek kiépítésére vonatkozó előírásokat a 6/2009. (IV. 14.) KvVM-EüM-FVM együttes rendeletben foglalt mérési kötelezettségek szabályozása (Mérési Kódex) tartalmazza.

### **A mintavételek száma**

A fúrásonként szükséges minták száma a mindenkori fúrási mélységhez igazodik. Fúrási méterenként legalább egy talajmintát kell venni. A geológiai (vizuális) jelleg megváltozásakor és a vízzel telített talajzóna átmeneti tartományában egy fúrási méteren belül minden rétegből külön mintát kell venni. Az egyes mélységekből származó vizsgálati eredmények megbízhatósága szempontjából a minimálisan elfogadható óvintézkedést fúrási területenként egy adott vizsgálati időben két fúrás végrehajtásával lehet biztosítani (lásd: mintavételi helyek és fúrási területek).

Talajlevegő mintavétel: mintavételi helyenként és mintavételi időpontként legalább egy talajlevegő mintát kell megvenni, illetve helyszíni analitikával elemezni ([9] előírásai szerint).

A szivárgóvizet legfeljebb négy hét időtartamon keresztül gyűjtőpalackokban kell felfogni. Ezután a palackok tartalmát mintaként ki kell venni és le kell fagyasztani. Ezt kell később keverékminta előállítására felhasználni. A keverékminta legfeljebb három egyedi mintából állítandó elő.

A talajvíz mintavételt ([9] előírásainak<sup>10</sup> megfelelően) állandósult hőmérséklet-, pH-, és vezetőképesség-érték elérésekor, illetve állandó oxigéntartalom elérését követően kell elvégezni. Mintavételi helyenként, illetve szűrőzött szakaszonként és mintavételi időpontként legalább egy talajvízmintát kell venni az elemzés céljára.

### **A mintavétel időterve**

A vizsgálatok teljes keretidőtartama a munkafázisok követelményeihez igazodik, ezt a mintavétel időbeli elosztására vonatkozó követelmények alábbi bemutatásához kapcsolódóan figyelembe kell venni.

A talajminták megvételének hosszabb időközönként kell történnie. A vizsgálati program teljes időtartamától függően legalább egy mintavétel szükséges a kezdő és befejező időpontban, de legfeljebb évente egyszer szükséges talajvizsgálatot végezni. Gyakoribb mintavételi fúrás a talajtest túlzott bolygatásával jár a fúrási területeken és emellett általában aránytalanul magas költségeket von maga után.

Talajlevegő mintákat legalább negyedévente kell venni, annak érdekében, hogy az évszakok hatását számításba vegyük.

Ehhez hasonlóan, a szivárgóvíz keverékmintákat legalább negyedévente kell elkészíteni (a mintavételek száma alfejezetben leírtak szerint).

---

<sup>10</sup> A 6/2009. (IV. 14.) KvVM-EüM-FVM együttes rendelet IV. Melléklete és az együttes rendeletben foglalt mérési kötelezettségek szabályozása (Mérési Kódex) tartalmazza a talajvíz mintavételre vonatkozó előírásokat.

A talajvízminták megvétele a vizsgálati program kezdetekor legalább negyedévente egyszer, a későbbiek folyamán a vizsgálati eredmény függvényében már minimálisan féléves turnusokban végzendő.

### 5.1.2. A mintavétel és a mintakezelés módszerei

Az alábbiakban bemutatott mintavételi és mintakezelési módszereket alkalmazták a Schäferhof-Süd tartálytelep terület vizsgálatainak keretében.

#### Minőségbiztosítás a mintavételkor

Általános minőségbiztosítási intézkedésként ([9] előírásai<sup>11</sup> szerint) az alábbi minőségbiztosítási intézkedéseket alkalmazták:

- a mintavevő berendezés tisztításának előírásai;
- minőségbiztosítási minták megvétele (vakminta értékek, ismételt meghatározások, stb.);
- mintajelölés (előkészített címkék);
- a megtöltendő mintatartók elhelyezése;
- adott esetben helyszíni mintaelőkészítés, -stabilizálás;
- mintatárolás a minták elszállításáig;
- a mintavétel és a mérés közötti tárolási idő regisztrálása;
- a mintaszállítás körülményeire vonatkozó előírások;
- a mintavétel dokumentálása.

#### Talaj mintavétel

A talajminták vétele 6 m, vagy 8 m felszín alatti mélységből besajtolásos magminta-vétellel történt (DN 100). A fúrólukak a fúrás után azonnal agyagpellellettel lezárásra kerültek. A fúrások számára 1 m átmérőjű fúrási területeket jelöltek ki. Mindegyik fúrási területen két-két egymással szemben fekvő egyedi fúrást mélyítették le a kezdeti és befejező mintavételkor. A kijelölt fúrási területen a fúrásoknak eléggé távol kellett elhelyezkedniük egymástól ahhoz, hogy ne gyakoroljanak egymásra hatást. Ezzel egyidejűleg biztosítani kellett, hogy a párhuzamosan megvett minták, valamint a vizsgálat kezdetén és befejezésekor kivett minták elemzési eredményei összehasonlíthatóak legyenek.

Az oxigén bevitel elkerülése és az illékony anyagok kipárolgási veszteségének kiküszöbölése érdekében műanyagtömlő béléscsőves tömlőmagminta fúrásokat hajtottak végre DIN 4021 szerint. (A béléscsőből a [9] és a [12] előírások szerint vették meg a mintákat.) Az 1 m hosszúságú béléscsőveket a vizsgálati helyszínen asztali körfűrészsel két szemben fekvő hosszanti vágással 1mm falvastagság meghagyásával bemetsztették. Ezt követően a fennmaradt falvastagságot késsel vágták át és a béléscsővet vékony nemesacél lemezekkel két részre választották szét, majd az egyik fúrómagfelet 10 l-es vödörbe töltötték, melyet tetővel azonnal lezártak. A vödör tartalmát max. 10 s ideig tartó többszöri rázással homogenizálták, majd megvették a mintát. Ez az intervallum mintavételnek nevezett mintavételi eljárás biztosította a kis térfogatrészekben belüli

---

<sup>11</sup> A 6/2009. (IV. 14.) KvVM-EüM-FVM együttes rendelet és az együttes rendeletben foglalt mérési kötelezettségek szabályozása (Mérési Kódex) tartalmazza a minőségbiztosításra vonatkozó előírásokat.

szennyezőanyag-tartalom eltérések homogenizálását. A mintavételhez csatlakozóan megtörtént a mintabemérés a szennyezőanyag analízis számára. A másik fűrőmagfél a rétegleírás és a magprofilfelvétel céljára szolgált.

Amint azt a mérési eredmények minőségét tárgyaló 5.4.2. fejezetben később leírjuk, a fentiekben bemutatott intervallum mintavétel a homogenizálás nélküli egyedi mintavételekhez képest nem járt többlet kipárolgással. Ez a megállapítás azonban a vizsgálat tárgyát képező Schäferhof-Süd tartálytelep szennyezés bemutatott feltételeire vonatkozóan érvényes, nem általánosítható.

### **Talajlevegő mintavétel**

A talajlevegő mintavevő szondával rendszerint negyedévente vettek mintát. A mintavétel a kétszeres szonda térfogatnak megfelelő talajlevegő elszívásával kezdődött [9]. Egy külön erre a célra szolgáló mintavételi kampányt bonyolítottak le a mérési eredmények minőségbiztosítása érdekében. Három hónapon keresztül két hetente vettek talajlevegő mintákat, amelyeket vagy közvetlenül, helyszíni analitikával vizsgáltak, vagy 10 cm<sup>3</sup> térfogatú speciális gázmintatartó palackokban gyűjtötték össze. A laboratóriumi vizsgálatok során kizárólag a mintavevőből származó eredeti levegőmintákat elemezték, mivel a talajlevegő szennyezőanyag dúsítási eljárásai lehetséges hibaforrásként kerültek besorolásra [12]. Amikor a környezeti hőmérséklet 5°C alá süllyedt nem végeztek talajlevegő mintavételt, mert ekkor már számolni kell a szennyezőanyagok mintavevő készüléken való kondenzációjával.

### **Szivárgóvíz mintavétel**

A szivárgóvíz mintákat 20 mm átmérőjű nemesacél elszívószondákkal vették (63 mm hosszúságú porózus test), melyeket teflontömlő segítségével csatlakoztattak a műanyagköpennyel ellátott gyűjtőpalackokhoz. A gyűjtőpalackokon keresztül csatlakozó vákuumszivattyú segítségével 200 mbar, illetve 350 mbar nyomáscsökkentést hoztak létre és tartottak fenn folyamatosan a 2 m és 4 m talajfelszíntől mért mintavételi szinteken végzett mintavételkor. Folyamatos vízmintavételt végeztek.

Az első szivárgóvíz mintavételt a DVWK (1990) [13] előírásai szerint négy héttel a szonda beépítése után hajtották végre. Ezt követően három hónap mintavételi időintervallumban legfeljebb négy hét időközönként vettek szivárgóvíz mintákat. Ezeket lefagyasztották a három hónap mintavételi időszak keverékmintájának az elemzéséig. Évente három mintavételi időszakban (tavasz, nyár, ősz) a csapadékmennyiségtől függően mintavételi helyenként 100 cm<sup>3</sup>-tól 4000 cm<sup>3</sup> mennyiségben lehetett szivárgóvíz mintát venni.

A szivárgóvíz mintavételkor komoly műszaki problémák léptek fel, amelyek miatt egyes mintavételi helyek használhatatlanná váltak. Az elszívószonda kiemelésével és ismételt beépítésével sikerült megoldani a problémákat. A nehézségeket a vizes oldatból kiváló fémhidroxidok, elsősorban a vashidroxidok okozták, melyek lerakódása a nemesacél szondát eltömítette és a teflontömlőben is elzáródást okozott, a mintavételi hely részleges, vagy teljes működésképtelenségét idézve elő. A teflontömlő elzáródását az 1 mm átmérőjű tömlők 4 mm átmérőjűre cserélésével sikerült megszüntetni. A kiválás

vizsgálata nyilvánvalóvá tette, hogy a fémhidroxidok nem az elszívó szonda anyagából, hanem túlnyomórészt a talajból származnak. Vashidroxid kiválás részben a gyűjtőpalackokban is képződött, ezeket a palackokat aztán ki kellett cserélni annak érdekében, hogy a szivárgóvíz alkotóinak adszorpciója a kiváláson elkerülhető legyen.

A rutinvizsgálatokon kívül deutériummal jelzett toluollal elvégzett kiegészítő vizsgálat során igazolódott, hogy a nyomáscsökkentett gyűjtőpalackot alkalmazó mintavételi technika nem alkalmas a nagymértékben illékony anyagok, mint például BTEX, vagy alkil-benzol meghatározására, mert a kipárolgási veszteség nagy.

Egy további kiegészítő vizsgálat során a mintavételi technikának a szivárgóvíz lényeges fizikai-kémiai jellemzőire gyakorolt hatását vizsgálták. Kimutatható volt ennek során, hogy a négy hetes mintavételi időtartam alatt változtak a gyűjtőpalackokban felfogott szivárgóvíz elemzés eredményei. Ennek oka az állásidő és a csökkentett nyomás. A vezetőképesség változása elhanyagolható volt, azonban a pH-érték, a nitrát- és szulfát-koncentráció jelentősen megváltozott. A pH-érték a négy hét állásidő alatt 0,2-0,6 egységgel lett nagyobb, nyilvánvalóan a széndioxid kipárolgása és a szénsavegyensúly eltolódása miatt. A nitrátkoncentráció 60%-kal nőtt, feltehetően a szivárgóvíz ammóniumtartalmának nitrifikációja miatt. A szulfátkoncentráció szintén 60%-kal lett nagyobb a négy hét időtartam alatt. Ezekből az eredményekből levonható a következtetés, hogy a szivárgóvíz elszívó szondás mintavételi eljárása a fizikai-kémiai jellemzők meghatározásakor csak feltételesen alkalmazható.

### **Talajvíz mintavétel**

A talajvíz mintavételi helyeken, illetve mintavevő csoportoknál negyedévente vettek mintát a talajvíz szivattyúzásával. A szivattyúzást a mintavételi helyen bevezetett beme-rülő szivattyú segítségével egy csőrátéten keresztül végezték. (A mintavétel a [9] előírásainak megfelelően történt). A megszabott paraméterek 10 perc mérési időn keresztül állandó értéke mellett vették a mintákat: hőmérséklet ( $\pm 0,1$  °C), pH-érték ( $\pm 0,1$ ), vezetőképesség ( $\pm 10\%$ ), oxigéntartalom t ( $\pm 0,2$  mg/dm<sup>3</sup>). Annak érdekében, hogy a szivattyúzott víz a környező talajvíztestnek megfelelő legyen, a mintavétel előtt mintegy 20 percig szivattyúztak. Ezáltal a szűrőnél elhelyezkedő mintavevő térfogat mintegy háromszorosának megfelelő vízmennyiség cserélődött. Az elszivattyúzott vizet a mintavételi helytől elegendő távolságban áramlási irányban lefelé vezették el. A vizsgálandó jellemzőtől függően, vagy egyszerű barnaüveg mintavevő palackba, vagy légmentesen záródó speciális mintatartó edénybe töltötték és légmentesen lezárták a vízmintákat. A megvett vízmintákat 4 °C-ra lehűtötték, fénytől védve tárolták, haladéktalanul a laboratóriumba szállították és egy héten belül elemezték.

### **5.1.3 A helyszíni vizsgálatok eljárásai, a kémiai-analitikai vizsgálati eljárások**

Az alábbiakban a Schäferhof-Süd tartálytelep vizsgálati projekt keretében a vizsgálandó jellemzők meghatározásakor alkalmazott helyszíni és laboranalitikai eljárásokat mutatjuk be.

### Az analitika minőségbiztosítása

A [9] alábbi minőségbiztosítási intézkedéseit<sup>12</sup> alkalmazták a helyszíni analitika és a laboranalitika minőségbiztosításának általános intézkedéseiként:

- mintabefogadás (mintaállapot, hőmérséklet, stabilizálás),
- a minta előkészítés dokumentálása,
- eltérés a vizsgálati előírásoktól (dokumentálás),
- a készülékek ellenőrzése,
- a kimutathatósági határ megállapítása,
- kalibrálás,
- a mérési eredmények dokumentálása,
- vakpróba értékek meghatározása,
- kétszer elvégzett vizsgálatok.

### Talaj analitika

A talaj analitika alkalmazott eljárásait és szabványait az 5.1.3. - 1. táblázatban foglaltuk össze. Az ásványolaj eredetű szénhidrogének meghatározásakor a DIN ISO 16703 (E 03.2002) szerinti eljárást alkalmazták. Emellett a kezdő vizsgálatnál az ISO TR 11046 (06.1994) szabványnak megfelelő eljárást is használtak.

#### 5.1.3. - 1. táblázat: A talajminták vizsgálatokor alkalmazott eljárások és szabványok<sup>13</sup>

paraméter	szabvány, eljárás	meghatározási, mérési határérték *
szénhidrogén tartalom	DIN ISO 16703 (E 03.2002) és ISO TR 11046 (06.1994)	100 mg/kg sz.a.
szénhidrogén vegyület-azonosítás	a vizsgálatot lebonyolító eljárása (nem szabványos házi eljárás)	
szénhidrogén eluátum	DIN 38414-S4 (10.1984)	0,1 mg/dm <sup>3</sup>
BTEX és alkil-benzolok	DIN 38407-F) (05.1991)	100 µg/kg sz.a.
benzoesav	a vizsgálatot lebonyolító eljárása (nem szabványos házi eljárás) HPLC eljárás	0,4 mg/kg sz.a.
fizikai talajfésülés	DIN 4022-1/3, DIN 18196 (10.1988)	
szemcseméret eloszlás	DIN 18123 (04.1983)	
iszapszemcse elemzés	DIN 18123 (04.1983)	
rétegfelépítés, rétegvastagság	DIN 4022-1/3 (09.1987)	
pórustérfogat	DIN 19683 Bl. 13 (03.1997)	
szivárgási tényező	DVGW W113 (1983)	
talajnedvesség, szárazanyag tartalom	DIN ISO 11465 (12.1996)	

<sup>12</sup> A 6/2009. (IV. 14.) KvVM-EüM-FVM együttes rendelet és az együttes rendeletben foglalt mérési kötelezettségek szabályozása (Mérési Kódex) tartalmazza az analitika minőségbiztosítására vonatkozó előírásokat.

<sup>13</sup> A 6/2009. (IV. 14.) KvVM-EüM-FVM együttes rendelet és az együttes rendeletben foglalt mérési kötelezettségek szabályozása (Mérési Kódex) tartalmazza a talajminták vizsgálatokor alkalmazandó eljárásokat, előírásokat és szabványokat.

ÚTMUTATÓ A TELÍTETLEN TALAJZÓNÁBAN LEJÁTSZÓDÓ TERMÉSZETES  
SZENNYEZŐANYAG LEBOMLÁS ÉS MEGKÖTÉS ÉRTÉKELÉSÉHEZ

**5.1.3. – 1. táblázat:** folytatás

Paraméter	szabvány, eljárás	meghatározási, mérési határérték *
hőmérséklet pH-érték nitrát és ammónium összes nitrogén hozzáférhető foszfát vas	mérőérzékelő DIN ISO 10390 (05.1997) DIN 38409-H28 / VD Lufa-Metho- denbl. 1. kötet (1991) DIN ISO 11261 (05.1997) PMB(Blau-)Meth., / VD Lufa-Metho- denbl. 1. kötet (1991) DIN EN ISO 11885 (04.1998)	2 mg/kg sz.a. nitrogén- ként meghatározva 50 mg/kg sz.a. nitrogén- ként meghatározva 30 mg/kg sz.a. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -ként meghatározva 4 mg/kg sz.a.
összes szerves szén tartal- lom (TOC), oldható szerves szén tartalom (DOC)	DIN ISO 10694 (08.1996)	4 mg/kg sz.a.
karbonáttartalom talajlégzés dehidrogenáz-aktivitás nitrifikációs potenciál	DIN ISO 10694 (08.1996) DIN 19737 (04.2001) DIN 19733-1 (07.1998) DIN ISO 14238 (10.1991)	10 mg/kg sz.a. 4 mg CO <sub>2</sub> /kg sz.a., nap 0,004TPF/g sz.a., 16 h 2,5 mg/kg sz.a.

\* sz.a.: szárazanyagra vonatkoztatva

**Talajlevegő analitika**

Az alkalmazott talajlevegő analitikai eljárások szabványai az 5.1.3. - 2. táblázatban láthatók. A talajlevegő oxigén-, széndioxid-, és metántartalmának meghatározását a helyszínen, hordozható GC-PID készülékkel végezték. A BTEX vegyületek, az alkilbenzolok és az n-alkánok elemzése laboratóriumban GC/MSD eljárással történt. Annak érdekében, hogy a szennyezés helyzetére vonatkozóan kismértékben szennyezett területek részeken is egyértelműek legyenek az eredmények, az ásványolaj eredetű szénhidrogén, BTEX és alkil-benzol meghatározása mellett az összes szerves szén tartalmat is meghatározták a talajlevegőben. Ezt a mérést a helyszínen GC-FID készülékkel végezték. Szabványosított eljárás erre vonatkozóan nem áll rendelkezésre.

**5.1.3. – 2. táblázat:** A talajlevegő minták vizsgálatokor alkalmazott eljárások szabványai

Paraméter	szabvány, eljárás	meghatározási, mérési határérték
n-alkán	VDI 3865 Blatt 2 és 3 (01.1998 / 11.1996)	1 mg/m <sup>3</sup>
BTEX és más alkil- benzolok	VDI 3865 Blatt 2/3 (01.1998 / 11.1996)	0,1 mg/m <sup>3</sup>
összes szerves széntarta- lom	VDI 3481 Blatt 1 (08.1975)	1 mg/m <sup>3</sup>
oxigéntartalom	VDI 3865 Blatt 2 (01.1998)	0,1 térfogat %
széndioxid-tartalom	VDI 3865 Blatt 2 (01.1998)	0,1 térfogat %
metántartalom	VDI 3865 Blatt 2 (01.1998)	0,1 térfogat %

### Szivárgóvíz és talajvíz analitika

A projekt keretében a szivárgóvíz és talajvíz analitikában az 5.1.3. - 3. táblázatban felsorolt eljárásokat és szabványokat alkalmazták.

**5.1.3. – 3. táblázat:** a szivárgóvíz és talajvíz analitikában alkalmazott eljárások, szabványok<sup>14</sup>

Paraméter	szabvány, eljárás	meghatározási, mérési határérték *
szénhidrogén-tartalom BTEX és alkil-benzolok	DIN EN ISO 9377-2 (07.2001) és DIN 38407-F9) (05.1991)	0,1 mg/dm <sup>3</sup> 1 µg/dm <sup>3</sup>
benzoesav	a vizsgálatot lebonyolító eljárása (nem szabványos házi eljárás) HPCL eljárás	0,01 mg/dm <sup>3</sup>
hőmérséklet vezetőképesség	DIN 38404-C4 (12.1976) DIN EN 27888 (11.1993)	
pH-érték redoxpotenciál oxigéntartalom	DIN 38404-C5 (01.1984) DIN 38404-C6 (05.1984) DIN 25814 (11.1992)	
nitrát-tartalom	DIN EN ISO 10304-1/2 (05.1995/11.1996)	1 mg/dm <sup>3</sup>
hozzáférhető foszfát	DIN EN ISI 10304-1/2 (04.1995/11.1996)	1 mg/dm <sup>3</sup>
vas	DIN EN ISO 11885 (04.1998)	0,02 mg/dm <sup>3</sup>
szulfát	DIN EN ISO 10304-1/2 (04.1995/11.1996)	1 mg/dm <sup>3</sup>
összes szerves szén tartalom (TOC), oldható szerves szén tartalom (DOC)	DIN EN 1484 (08.1997)	1 mg/dm <sup>3</sup>
savkapacitás, karbonát-keményesség	DIN EN 1484 (08.1997), DIN 38409-H7/DIN38405-D8 (05.1979/1971)	n.a.

A fentiekén kívül a projekt lebonyolító eljárásával elemezték a talajvízminta BTEX-metabolit (benzoesav, valamint metil-, C2- és C3-benzoesav) tartalmát, valamint a talajvíz metántartalmát is meghatározták a Dr. Weßling GmbH. saját eljárásával.

### 5.2. A hosszú időtartamú vizsgálatok lefolytatása

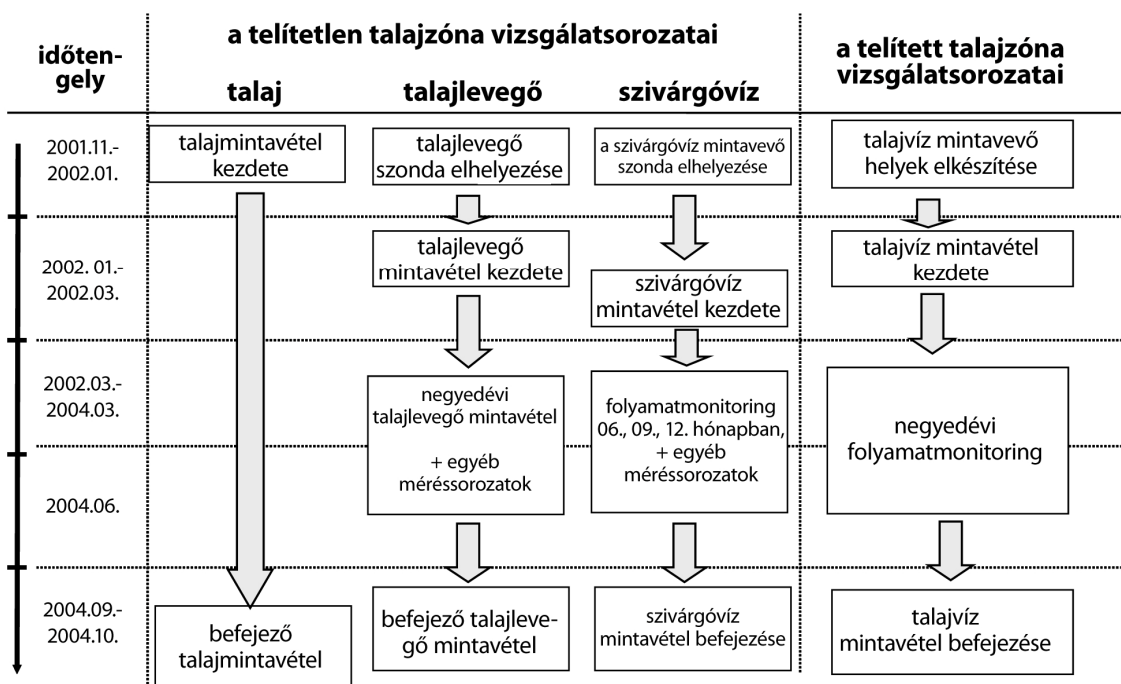
Az alábbiakban bemutatjuk a telítetlen talajzónában lejátszódó természetes lebomlási és megkötési folyamatok igazolásához és a szennyezőanyag-tartalom időbeli alakulásának elemzéssel történő ellenőrzéséhez ajánlható eljárás folyamatát. Ebből a célból példaképpen a Schäferhof-Süd tartály telephely vizsgálatait írjuk le. Részletesebb információk erre vonatkozóan a kutatási projekt zárójelentésében található [1]. A vizsgálatok

---

<sup>14</sup> A 6/2009. (IV. 14.) KvVM-EüM-FVM együttes rendelet és az együttes rendeletben foglalt mérési kötelezettségek szabályozása (Mérési Kódex) tartalmazza a talajvíz vizsgálatokhoz alkalmazandó eljárásokat, előírásokat és szabványokat.

## ÚTMUTATÓ A TELÍTETLEN TALAJZÓNÁBAN LEJÁTSZÓDÓ TERMÉSZETES SZENNYEZŐANYAG LEBOMLÁS ÉS MEGKÖTÉS ÉRTÉKELÉSÉHEZ

menetét az 5.2. - 1. ábra szemlélteti, feltüntetve a legfontosabb vizsgálat sorozatokat és munkafeladat csoportokat.



**5.2.-1. ábra:** A hosszú időtartamú vizsgálatok lefolytatása Schäferhof-Süd tartálytelepen

### 5.2.1. Kiinduló vizsgálatok

A telítetlen talajzónában, a kapillaris zónában és a telített talajzónában fennálló szennyezési szint meghatározása céljából egy 7,5 x 15 m nagyságú vizsgálati területen nyolc 1 m átmérőjű mintavételi fúrási területen vettek mintákat. Összehasonlítás céljából két kismértékben szennyezett területrészen, illetve egy nem szennyezett területrészen kijelölt ugyancsak 1 m átmérőjű mintavételi fúrási területen került sor mintavételre. Minta-vételi fúrási területenként két fúrást mélyítettek le (lásd 5.1.2. fejezet). A vizsgálati területen és az összehasonlítás céljából vizsgált két területen egy-egy mintavételi helyen az egyes szennyezőanyag-tartalom értékek meghatározása mellett a talaj fizikai, fizikai-kémiai és biológiai jellemző paramétereit is vizsgálták.

### 5.2.2. A beavatkozási monitoring

Annak érdekében, hogy a talajlevegő, szivárgóvíz és talajvíz közvetítő közegeken keresztül végbemenő szennyezőanyag-transzportot meghatározzák, és a természetes lebomlási és megkötési folyamatokat igazoló paraméterek alakulását ezekben a közegekben nyomon tudják követni, a vizsgálati területen és a két összehasonlító vizsgálati területen állandó talajlevegő-, szivárgóvíz- és talajvíz-mintavételi helyeket építettek ki (lásd 5.3.2. fejezet). Negyedéves mérési ciklusokban vettek talajlevegő- és talajvízmintákat és elvégezték ezek helyszíni vizsgálatát. Márciustól decemberig havon-

ta szállították el az összegyűlt szivárgóvíz mintákat. Három hónapos mintavételi időszakonként készített gyűjtőmintákat vizsgáltak. (A különböző közegek esetében vizsgált paramétereket az 5.4.1. fejezetben bemutatott vizsgálati terv táblázatok tartalmazzák.) Az éghajlati paraméterek folyamatos gyűjtése érdekében helyszíni meteorológiai mérőállomást szereltek fel és a talajba hőmérséklet-érzékelő szondákat helyeztek el. A mérési adatokat négy-hat hetente vették át a mérőberendezésből.

### **5.2.3. A befejező vizsgálatok**

A kiinduló vizsgálattal analóg módon a három év vizsgálati időszakot követően ismételen meghatározták a vizsgálati területen és az összehasonlító területeken a szennyezőanyag koncentrációkat és az összetételi változásokat. A nagyszámú mérési adatot statisztikai módszerrel értékelték ki. A biológiai lebomlás által előidézett, valamint a szivárgóvízzel való kimosódás és a talajlevegővel végbemenő kipárolgás által okozott szennyezőanyag csökkenést is figyelembe véve értékelték az eredményeket.

### **5.3. Mintavételi terv**

Ez a fejezet a Schäferhof-Süd tartály telephelyen folytatott vizsgálatok mérési paramétereinek, mintavételi helyeinek és talaj-, talajlevegő-, szivárgóvíz- és talajvíz mintavételeinek adatait, információit foglalja össze, kitérve a mintakezelés kérdéskörére is.

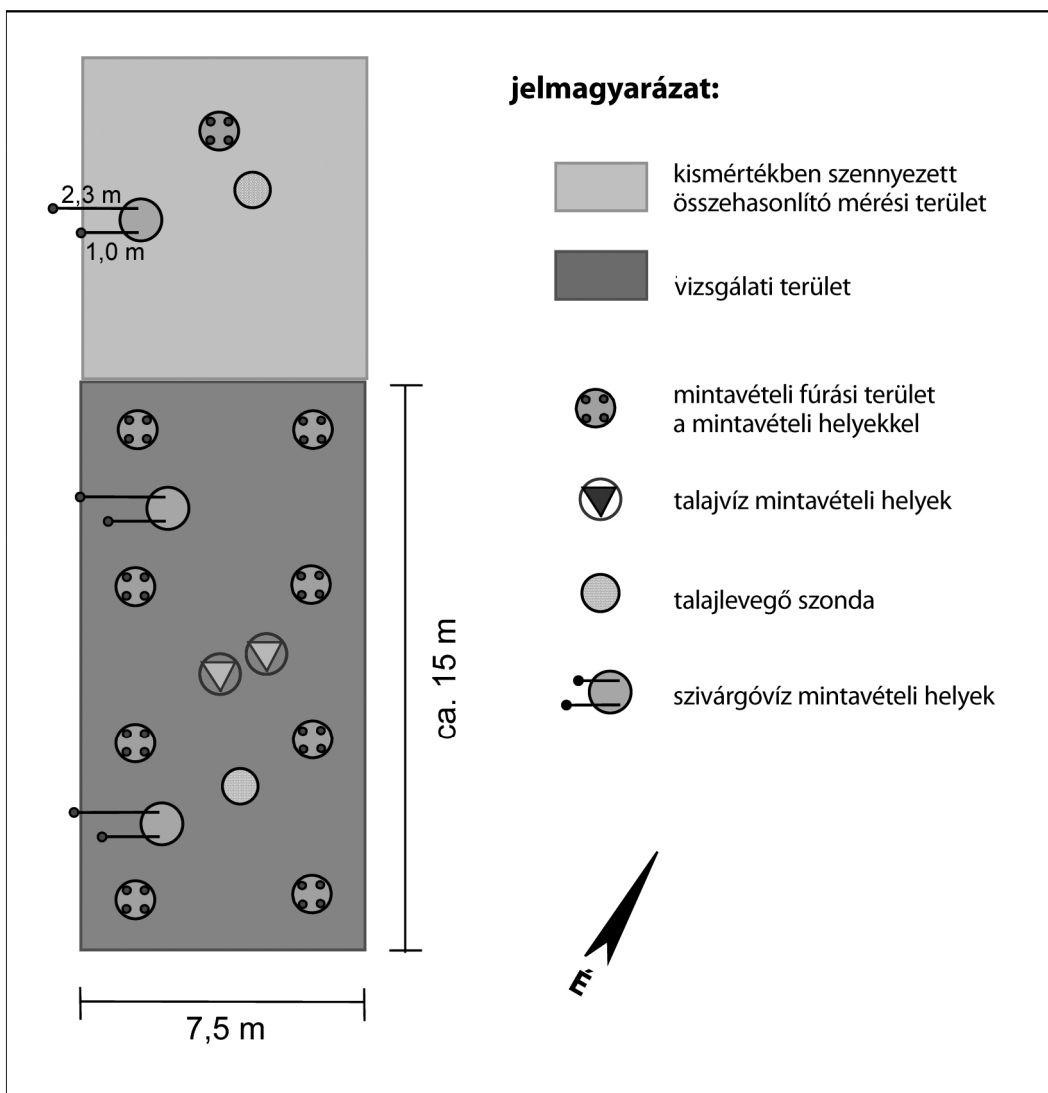
#### **5.3.1. A talaj-, talajlevegő-, szivárgóvíz- és talajvíz-vizsgálatok mért paramétere**

Az egyes közegek vizsgálatokor mért paraméterek és ezek meghatározási/mérési határai az 5.1.3. - 1. – 5.1.3. - 3. táblázatokban, valamint az 5.4.1. vizsgálati terv fejezetben láthatók. Az illető helyszín adottságaitól függően kell a paraméterek körét bővíteni. A további vizsgálatra példa lehet a metil-tercier-butiléter (MTBE) tartalom meghatározása, mivel az ásványolaj miatti szennyezések esetén fennáll az MTBE általi kísérő szennyezés lehetősége.

#### **5.3.2. Talaj, talajlevegő, szivárgóvíz és talajvíz mintavételi helyek**

A Schäferhof-Süd tartálytelep helyszín szennyezett részterületén és azzal határos alacsony szennyezettségű részterületén kijelölt két mintavételi területen meghatározott 1 m átmérőjű fúrési területek és a mintavételi helyek elhelyezését mutatja be az 5.3.2. - 1. ábra. A távolabb elhelyezkedő szennyezésmentes összehasonlító vizsgálati területet nem tüntettük fel.

A talajminták megvételéhez a vizsgálati területen nyolc 1 m átmérőjű mintavételi fúrési területet jelöltek ki, a kismértékben szennyezett és szennyezésmentes két összehasonlító területen pedig egyet-egyet. Mindegyik mintavételi fúrési területen két-két egymással szemben fekvő helyen mélyítették le a fúrásokat a vizsgálat kezdő és befejező időpontjában (v. ö. 5.1.2. fejezet).



**5.3.2. - 1. ábra:** A Schäferhof-Süd tartálytelep szennyezett területén és kismértékben szennyezett összehasonlító területén kijelölt fúrási mintavételi helyek és más mintavételi helyek elhelyezési vázlata. (A mintavételi fúrási területek és a mintavételi helyek ábrázolása felnagyított.)

A talajlevegő mintavétel számára három állandó mintavételi helyet építettek ki, egyet-egyét a vizsgált területen (mintavételi mélység 4 m), a kismértékben szennyezett (mintavételi mélység 4 m) és a nem szennyezett összehasonlító területen (mintavételi mélység 3,5 m). A mintavételi helyeket a VDI 3865 segédletnek megfelelően építették ki. A mintavételi hely szennyezettségének felmérése érdekében a talajlevegő szonda behelyezését megelőzően besajtolásos magminta-vevővel, illetve spirálfúróval talajmintákat vettek és ezeket ásványolaj eredetű szénhidrogénre, BTEX-re és alkil-benzolra elemezték.

A szivárgóvíz mintavétel céljából a vizsgálati területen két mintavételi helyet, a két összehasonlító területen egy-egy mintavételi helyet alakítottak ki (lásd 5.3.2. - 1. ábra). A vizsgálati területen és a szennyezett összehasonlító területen mintegy 2 m, és 3,5 m

mélységben, a nem szennyezett összehasonlító területen 1,7 m mélységben helyeztek el nemesacél mintavevő szondákat. Annak érdekében, hogy a mintavételi helyen a lehető legkevesbé bolygassák a talajt, a műanyag szárral meghosszabbított szondákat a függőlegeshez képest mintegy 30° szögben helyezték a talajba.

A szivárgóvíz mintavételi helyek kiépítésére szabványelőírás nem áll rendelkezésre, ezért az alkalmazott módszert a következőkben részletesebben bemutatjuk. Az 50 mm átmérőjű fúrólukákat besajtolással működő magmintavevővel, a függőlegeshez képest mintegy 30° szögben elhelyezett vezetősín alkalmazásával alakították ki. A talaj furatba szóródásának elkerülése céljából 50 mm átmérőjű köpenycső kitámasztást alkalmaztak. Az elszívó szonda (átmérője 20 mm) és a talaj közötti átmeneti zóna kvarcliszttel történő „burkolása” érdekében az elszívó szonda csúcsának legalsó 10 cm szakaszát kisebb átmérőre előforgácsolták és a szondát lazán helyezték el a tervezett mélységben. A kvarcliszt pakolást a szondához közvetlenül csatlakoztatott tömlőn keresztül, nagynyomású levegővel sajtolták a fúrólukba. A köpenycső eltávolítása és a végleges feltöltés előtt ellenőrizték az elszívó szonda működőképességét (kiszivatták a beiszapolódott vizet). Ezt követően az elszívó szonda csúcsa felett és talajszinten agyagtömítést helyeztek el, a fúrólukat a kitermelt anyaggal feltöltötték. Az agyagtömítés célja az volt, hogy megakadályozzák a csapadékvíz közvetlen bejutását a szondaszárnál. Az elszívó szonda átmérője 20 mm volt, a porózus elszívótest hosszúsága pedig 63 mm. A szondákat teflontömlővel csatlakoztatták a műanyagköpenyes gyűjtőpalackokhoz. Vákuumszabályozó készülék segítségével a két mintavételi mélységhez (felszín alatt 2 m, 4 m) folyamatosan 200 mbar, illetve 350 mbar nyomáscsökkenést biztosítottak. (Az elszívó szondák üzemeltetésekor tapasztalt műszaki problémákat az 5.1.2. fejezetben mutattuk be.)

A talajvíz mintavételéhez a már rendelkezésre álló négy ideiglenesen szűrőzött talajvíz mintavételi hely mellett öt mintavételi hely csoportot hoztak létre (a [9] előírásainak betartásával): egyet a felvízi részen, egyet a vizsgálati területen, hármat a vizsgálati területhez képest alvíz irányban a szennyezőcsőva középvonala mentén. Mindegyik mintavételi hely csoportnál két furatot mélyítettek le 7 m, illetve 10 m mélységig és ezeket 4-7 m, illetve 9-10 m tartományban szűrőzték annak érdekében, hogy a szennyezőanyag függőleges irányú eloszlása a vízáadó rétegben vizsgálható legyen.

### **5.3.3. Talaj, talajlevegő, szivárgóvíz és talajvíz mintavétel és minta előkészítés**

A kutatási projekt [1] vizsgálati programjának keretében részletes mintavételi terveket készítettek. A mintavételi tervek a következő adatokat tartalmazták:

- talaj: mintavételi pont (a mintavételi fúrási terület és a fúrás helyének megnevezése), minta megjelölés, mintavételi időpont,
- talajlevegő, szivárgóvíz és talajvíz: a mintavételi hely megnevezése, a minta megnevezése, a helyszíni analitikával meghatározandó jellemzők.

A mintavételi időintervallumokat és időpontokat az 5.3.3. - 1. táblázat foglalja össze.

ÚTMUTATÓ A TELÍTETLEN TALAJZÓNÁBAN LEJÁTSZÓDÓ TERMÉSZETES SZENNYEZŐANYAG LEBOMLÁS ÉS MEGKÖTÉS ÉRTÉKELÉSÉHEZ

**5.3.3. - 1. táblázat:** A mintavételi hely kiépítés és a mintavételek időterve

mintavételi hely	év / negyedév															
	2001		2002				2003				2004				2005	
	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
<b>vizsgálati terület</b>																
talaj		K	É											Z	É	
talajlevegő		B	K	F	F	F	F	F	F	F	F	F	Z	É		
szivárgóvíz		B	K	F	F	F		F	F	F		F	Z	É		
<b>szennyezett összehasonlító terület</b>																
talaj		K	É											Z	É	
talajlevegő		B	K	F	F	F	F	F	F	F		F	Z	É		
szivárgóvíz		B	K	F	F	F		F	F	F		F	Z	É		
<b>nem szennyezett összehasonlító terület</b>																
talaj		K	É											Z	É	
talajlevegő		B	K	F	F	F	F	F	F	F	F	F	Z	É		
szivárgóvíz		B	K	F	F	F		F	F	F		F	Z	É		
<b>talajvíz mintavételi helyek</b>																
felvízi terület		B	K	F	F	F	F	F	F	F	F	F	Z	É		
vizsgálati terület		B	K	F	F	F	F	F	F	F	F	F	Z	É		
alvízi terület 1		B	K	F	F	F	F	F	F	F	F	F	Z	É		
alvízi terület 2		B	K	F	F	F	F	F	F	F	F	F	Z	É		
alvízi terület 3		B	K	F	F	F	F	F	F	F	F	F	Z	É		

**Jelmagyarázat:** B = a mintavevő berendezés beépítése      Z = befejező mintavétel, vizsgálat  
 K = kezdő mintavétel, vizsgálat                              É = kiértékelés  
 F = folytatólagos mintavétel, vizsgálat

A mintavételek száma az 5.4.1. fejezetben bemutatásra kerülő talaj, talajlevegő, szivárgóvíz és talavíz vizsgálati tervekben látható. Az egyes paraméterek meghatározásához alkalmazott minta előkészítés a mindenkor vizsgálati eljárásához és vizsgálati utasításokhoz igazodott. A minta előkészítés szintén szerepel a vizsgálati/elemezési tervekben.

**5.4. A vizsgálati terv és a mérési adatok minősége (megbízhatósága)**

A Schäferhof-Süd tartálytelep vizsgálati program vizsgálati terve a vizsgálati minták származási adatait és számát, a vizsgálatok számát, és a vizsgálati eljárásra és a vizsgálati utasításokra való utalásokat foglalja magába. A hosszú időtartamú vizsgálati program során a vizsgálati tervet a vizsgálati eredményeknek és tapasztalatoknak megfelelően többször módosították.

**5.4.1. A helyszíni és laborvizsgálatok vizsgálati tervei, vizsgálati eljárásai**

A vizsgálati programban [1] alkalmazott vizsgálati eljárásokat az 5.3.1. fejezetben írtuk le. Az alábbiakban a talaj, talajlevegő, szivárgóvíz és talajvíz vizsgálati tervek formájában mutatjuk be a program keretében elvégzett vizsgálatokat.

**ÚTMUTATÓ A TELÍTETLEN TALAJZÓNÁBAN LEJÁTSZÓDÓ TERMÉSZETES SZENNYEZŐANYAG LEBOMLÁS ÉS MEGKÖTÉS ÉRTÉKELÉSÉHEZ**

Az **5.4.1. - 1. – 5.4.1. - 4. táblázatok** jelmagyarázata:

**M** – mintavételi helyek száma, **P/M** – mintavételek száma mintavételi helyenként

**Σ** – mintavételek száma a területen, **D** – a párhuzamos kontrollelemzések száma

**5.4.1. - 1. táblázat:** A talajvizsgálatok vizsgálati terve Schäferhof-Süd tartálytelep vizsgálati programban

paraméterek	a minták származási helye és száma												vizsgálatok száma		eljárás, vizsgálati utasítás
	vizsgálati terület				szennyezett összehasonlító terület				nem szennyezett összehasonlító terület				kez- dő	befe- jező	
	M	P/M	Σ	D	M	P/M	Σ	D	M	P/M	Σ	D			
CH-tartalom	16	6	96	16	2	6	12	2	2	6	12	2	140	140	ISO/DIS 16703
CH-tartalom	8	1	8		1	1	1		1	1	1		10	10	ISO TR 11046
CH vegyület azonosítás	1	6	6		1	6	6						12	12	házi eljárás
CH-eluátum	1	6	6		1	6	6						12	12	DIN 38414-S4
BTEX és alkil-benzolok	16	6	96	16	2	6	12	2	2	6	12	2	140	140	DIN 38407-F9
benzoesavak	2	6	12		1	6	6						18	18	házi eljárás
fizikai talajféleség	16	6	96		2	6	12		2	6	12		120	120	DIN 4022-1-3
rétegfelépítés / réteg-vastagság	16	1	16		2	1	2		2	1	2		20	20	DIN 4022/1-3
szemcseméret eloszlás	1	6	6		1	6	6		1	6	6		18	0	DIN 18123
iszap szemcseméret elemzés	1	6	6		1	6	6		1	6	6		18	0	* 1
pórustérfogat	1	6	6		1	6	6		1	6	6		18	0	DIN19683 Bl.13
szivárgási tényező	1	6	6		1	6	6		1	6	6		18	0	DVGW Merkblatt W113
talajnedvesség /szárazanyag	16	6	96		2	6	12		2	6	12		120	120	DIN ISO 11465
hőmérséklet	4	1	4										foly.	foly.	mérő-érzékelő
pH-érték	1	6	6		1	6	6		1	6	6		18	18	DIN ISO 10390
nitrát	1	6	6		1	6	6		1	6	6		18	18	DIN 38409-H28, VD Lufa-Metho- denb. Bd. 1.
ammónium	1	6	6		1	6	6		1	6	6		18	18	DIN ISO 11621
összes nitrogén	1	6	6		1	6	6		1	6	6		18	18	DIN ISO 11621
hozzáférhető foszfát	1	6	6		1	6	6		1	6	6		18	18	PMB(Blau-) elj. VD Lufa-Metho- denb.
vas	1	6	6		1	6	6						12		DIN EN ISO 11885
TOC / DOC	1	6	6		1	6	6		1	6	6		18	18	DIN ISO 11694
karbonát	1	6	6		1	6	6		1	6	6		18	18	DIN ISO 10694
talajlégzés	1	6	6		1	6	6		1	6	6		18	18	DIN 19737
dehidrogenáz-aktivitás	1	6	6		1	6	6		1	6	6		18	18	DIN 19733-1
nitifikációs potenciál	1	4	4		1	4	4		1	4	4		12	12	DIN ISO 14328

\* 1 – alacsony iszapszemcse részarány esetén alkalmazható eljárás.

ÚTMUTATÓ A TELÍTETLEN TALAJZÓNÁBAN LEJÁTSZÓDÓ TERMÉSZETES  
SZENNYEZŐANYAG LEBOMLÁS ÉS MEGKÖTÉS ÉRTÉKELÉSÉHEZ

**5.4.1. - 2. táblázat:** A talajlevegő vizsgálatok vizsgálati terve Schäferhof-Süd tartálytelep vizsgálati programban

paraméterek	a minták származási helye és száma												vizsgálatok száma		eljárás, vizsgálati utasítás
	vizsgálati terület				szennyezett összehasonlító terület				nem szennyezett összehasonlító terület						
	M	P/M	Σ	D	M	P/M	Σ	D	M	P/M	Σ	D	/idő-pont	összesen	
n-alkánok	1	1	1		1	1	1		1	1	1		3	30	VDI 3865 Blatt 2 és 3
screening (vegyület azonosítás)	1	1	1		1	1	1		1	1	1		3	6	
BTEX	1	1	1		1	1	1		1	1	1		3	30	VDI 3865 Blatt 2 és 3
alkil-benzolok	1	1	1		1	1	1		1	1	1		3	30	
összes szén tartalom	1	1	1		1	1	1		1	1	1		3	30	házi eljárás
oxigéntartalom	1	1	1		1	1	1		1	1	1		3	30	VDI 3865 Blatt2
széndioxid-tartalom	1	1	1		1	1	1		1	1	1		3	30	VDI 3865 Blatt2
metán	1	1	1		1	1	1		1	1	1		3	30	

**5.4.1. - 3. táblázat:** A szivárgóvíz vizsgálatok vizsgálati terve Schäferhof-Süd tartálytelep vizsgálati programban

paraméterek	a minták származási helye és száma												vizsgálatok száma		eljárás, vizsgálati utasítás
	vizsgálati terület				szennyezett összehasonlító terület				nem szennyezett összehasonlító terület						
	M	P/M	Σ	D	M	P/M	Σ	D	M	P/M	Σ	D	/idő-pont	összesen	
vezetőképesség	2	2	4		1	2	2		1	1	1		7	70	DIN EN 27888
pH-érték	2	2	4		1	2	2		1	1	1		7	70	DIN 38404-C5
oxigéntartalom	2	2	4		1	2	2		1	1	1		7	70	DIN EN 25814
nitrát	2	2	4		1	2	2		1	1	1		7	70	DIN EN ISO 10304-1
szulfát	2	2	4		1	2	2		1	1	1		7	70	DIN EN ISO 10304-1
összes vas	2	2	4		1	2	2		1	1	1		7	70	DIN EN ISO 11885
összes szerves széntartalom	2	2	4		1	2	2		1	1	1		7	70	DIN EN 1484
savkapacitás / karbonát-keményesség	2	2	4		1	2	2		1	1	1		7	70	DIN 38409-H7

ÚTMUTATÓ A TELÍTETLEN TALAJZÓNÁBAN LEJÁTSZÓDÓ TERMÉSZETES  
SZENNYEZŐANYAG LEBOMLÁS ÉS MEGKÖTÉS ÉRTÉKELÉSÉHEZ

**5.4.1. - 4. táblázat:** A talajvíz vizsgálatok vizsgálati terve Schäferhof-Süd tartálytelep vizsgálati programban

paraméterek	a minták származási helye és száma												vizsgálatok száma		eljárás, vizsgálati utasítás
	felvíz MP1				vizsgálati terület MP2				alvíz MP 3-5				/idő-pont	4 idő-pont *	
	M	P/M	Σ	D	M	P/M	Σ	D	M	P/M	Σ	D			
szénhidrogén-tartalom	1	2	2		1	2	2		3	2	6		10	40	DIN EN ISO 9377-2
BTEX	1	2	2		1	2	2		3	2	6		10	40	DIN 38407-F9
talajvízszint	1	2	2		1	2	2		3	2	6		10	40	
hőmérséklet	1	2	2		1	2	2		3	2	6		10	40	DIN 38404-C4
vezetőképesség	1	2	2		1	2	2		3	2	6		10	40	DIN EN 27888
pH-érték	1	2	2		1	2	2		3	2	6		10	40	DIN 38404-C5
redoxpotenciál	1	2	2		1	2	2		3	2	6		10	40	DIN 38404-C6
oxigéntartalom	1	2	2		1	2	2		3	2	6		10	40	DIN EN 25814
nitrát	1	2	2		1	2	2		3	2	6		10	40	DIN EN ISO 10304-1
vas	1	2	2		1	2	2		3	2	6		10	40	DIN EN ISO 11885
szulfát	1	2	2		1	2	2		3	2	6		10	40	DIN EN ISO 10304-1
összes szerves szén tartalom	1	2	2		1	2	2		3	2	6		10	40	DIN EN 1484
savkapacitás / karbonát-keményesség	1	2	2		1	2	2		3	2	6		10	40	DIN 38409-H7

\* 4 időpontra számítva, eltérően az 5.3.3. – 1. táblázatban bemutatott időtervtől

A fenti táblázatokban szerepeltetett valamennyi vizsgálati eljárás alkalmas az adott vizsgálati célra és ajánlható a vizsgálati gyakorlat számára. Ezek az eljárások a saját eljárások kivételével az adott közeg esetében általánosan elfogadott vizsgálati eljárások.

#### 5.4.2. A mérési eredmények minőségének értékelése

A vizsgálati eredmények minőségére vonatkozóan a Schäferhof –Süd tartálytelep kutatási projekt keretében szerzett tapasztalatok az alábbiakban foglalhatók össze.

#### Talajvizsgálatok

A DIN ISO 16703 szerint elvégzett TPH elemzés és a DIN 38407-F9 szerinti BTEX elemzés belső minőségellenőrzése céljából fúrásonként párhuzamos kontrollelemzéseket végeztek egy kiválasztott mélységből vett mintákkal. Az intervallum minták (lásd 5.1.2. fejezet) TPH elemzési eredményének középértéktől való normál eltérése < 10%, a BTEX és alkil-benzol elemzési eredményének középértéktől való normál eltérése < 25% volt. Sok esetben ennél jóval alacsonyabb értékű (< 5%) volt az eltérés. Külső minőségellenőrzés céljából a kezdő mintavételkor minden tizedik-huszedik mintát, vagyis az 1 m átmérőjű mintavételi fúrási területenként egy mintát független külső laboratóriumban elemeztek. A projekt vizsgálati labor és az összehasonlító laboratórium eredményei közötti részben jelentős nagyságú eltérések megerősítették az ásványolajjal szennyezett talajokra vonatkozó korábbi összehasonlító vizsgálataink eredményeit [14].

A nagymértékben illékony szénhidrogének (BTEX és alkil-benzolok) intervallum minta elemzési eredményeinek minőségellenőrzése céljából a telítetlen és a telített talajzónából vett magmintákat vizsgáltak. Közvetlenül a fúrómagot tartalmazó bélésű felnyitása után az 1 m hosszúságú fúrómag hosszában elosztva 10 homogenizálás nélküli egyedi mintát vettek. Ezután készítették elő az 5.1.2. fejezetben leírtak szerint homogenizált 10 intervallum mintát. A mintákat elemezték. Az intervallum mintákkal összehasonlítva az egyedi minták alacsonyabb átlageredmény adtak, a telítetlen talajzóna esetében 17%-ig terjedő, a telített talajzóna esetében 50%-ig terjedő volt az eltérés. Az intervallum minták elemzésekor a középértéktől való normál eltérés 6-17% volt a telítetlen talajzóna esetében és 25% a telített talajzóna esetében. Ez jóval alacsonyabb, mint az egyedi minták esetében meghatározott normál eltérések, melyek a telítetlen talajzónában mintegy 50% értékűek, a telített talajzóna mintáinak esetében 100%-ot meghaladó értékűek voltak. Ezek az eredmények rávilágítanak arra, hogy a tárgyalt Schäferhof-Süd tartálytelep talajszennyezés viszonyai mellett a fúrómag-intervallum mintavétel a fúrómag egy mintavételi pontjából megvett egyedi mintákkal szemben az eredmények minősége szempontjából sokkal előnyösebb.

### **Talajlevegő analitika**

A talajlevegő vizsgálatok eredményeinek minőségét a mintavételi eljárás és az alkalmazott analitika határozza meg. A vizsgálatok céljára eredeti talajlevegő mintákat használtak (lásd 5.1.2. fejezet), mivel a talajlevegő aktív szén alkalmazásával történő dúsítása a mintakezelési műveletek nagyobb számából adódóan több hibalehetőségeket hordoz, mint a gázgyűjtő palackkal (speciális gyűjtőpalackkal) történő mintavétel [1].

A talajlevegő analitika mérési eltéréseinek meghatározása céljából három hónapig tartó mérési kampányt hajtottak végre, melynek során két hetente vettek talajlevegő mintákat. Ezeknek a mintáknak a vizsgálatok a vizsgálati tervben előírt valamennyi vizsgálati paraméterre (lásd 5.1.3. - 2. táblázat) elvégezték az elemzést és emellett metántartalomra is vizsgálták a mintákat, valamint GC/MS (gázkromatográffal kapcsolt spektrométeres) vizsgálattal a szénhidrogén vegyület azonosítást végeztek. Az egymás utáni mintavételi időpontokban kivett minták mérési eredményei összességében csak igen kicsi mértékben tértek el egymástól. A BTEX és alkil-benzol koncentrációk kivétel képeztek ez alól, ezek nagyobb mértékű ingadozása azonban arra volt visszavezethető, hogy a talajvíztükör megemelkedése miatt szennyezett talajvíz jutott be a talajlevegő mintavevő szondába. A kapott eredmények alapján levonható következtetésként, hogy ha a talajlevegő mintavevő szondát nem éri zavaró hatás, akkor a mérés – tekintettel a megfelelő mintavételi és analitikai eljárásra – megbízható eredményeket biztosít.

### **Szivárgóvíz analitika**

A kutatási projekt keretében a szivárgóvíz analitika eredményeinek minőségére a mintavételi eljárás gyakorolt hatást [1]. Amint azt az 5.1.2. fejezetben leírtuk, vashidroxid kiválások képződtek a nemesacél szondán, a vezetőkömlőkön és a mintagyűjtő palackokban. A szivárgóvíz egyes összetevői a kiváláson adszorbeálódtak, a mérési eredmény emiatt a valóságosnál kisebb lett. Emellett igazolódott a nagymértékben illékony szennyezők (BTEX és alkil-benzolok) mintavételi technikára visszavezethető kipárolgási vesztesége is. A mintavételi időpontok közötti tárolási idő alatt a szivárgóvíz több

fizikai-kémiai jellemzője (pH-érték, nitrát- és szulfáttartalom) jelentős mértékben megváltozott (lásd 5.1.2. fejezet).

A fenti gyakorlati tapasztalatok alapján a szivárgóvíz nagymértékben illékony szénhidrogén tartalmának elemzéséről le kellett mondani. A szivárgóvíz fizikai-kémiai jellemzőinek értékelésekor a mintavételből és mérés technikából adódó mérési eredmény változásokat figyelembe kellett venni.

### **Talajvíz analitika**

A kutatási projekt keretében a talajvíz analitikai vizsgálatokat a [9] előírásai<sup>15</sup> szerint végezték el. A vizsgálatok során nem merült fel az eredmények korlátozott minőségére utaló tényező.

### **5.5. A vizsgálati eredmények értékelése**

A szennyezőanyagok természetes lebomlási és megkötési folyamatok miatti koncentrációcsökkenésének elemző vizsgálatához a vizsgálati program eredményeit értékelni kell. Az értékeléskor a különböző közegek vizsgálatkor kapott eredmények között összefüggéseket kell feltárni. Értékelni szükséges egyrészt a szennyezőanyag koncentráció vizsgálati időszakban bekövetkezett változását, másrészt a területen végbemenő szennyezőanyag lebomlást és megkötést meghatározó környezeti feltételeket és ezek változásait. A vizsgálati eredmények értékelése alapozza meg a szennyezőanyag koncentráció változásának vizsgálaton túli időszakra vonatkozó prognózisát.

A kutatási projekt során már a vizsgálatok ideje alatt folyamatosan értékelték az eredményeket [1]. Az értékelés befolyásolta a vizsgálati program további menetét. A talaj, a talajlevegő, a szivárgóvíz, a talajvíz mintavételi és vizsgálati terveit (v.ö. 5.3.3. és 5.4.1.) a már rendelkezésre álló eredményeknek megfelelően módosították. Így a hosszú időtartamú vizsgálat közben a szivárgóvíz vizsgálati tervét a reprodukálható és az adott paramétert megfelelően kifejező eredményeket biztosító vizsgálatokra korlátozták. A vizsgálati programot azonban bővítették is kiegészítő vizsgálatokkal. Ennek célja az egyes mintavételi technikák alkalmasságának felülvizsgálata és a természetes lebomlási és megkötési folyamatok értékeléséhez felhasznált paraméterek ellenőrzése volt.

A vizsgálati terület horizontális és vertikális résztartományaiban az ásványolaj eredetű szénhidrogén, BTEX és alkil-benzol szennyezőanyagok koncentráció csökkenése vizsgálatokkal igazolható volt. A koncentrációcsökkenés bizonyítását statisztikai eljárással is alátámasztották (v.ö. 3.3.7. fejezet). A szennyezőanyagok mikrobiológiai lebomlása a helyszínen kvalitatív szempontból igazolható volt. A lebomlási, kioldási és kipárolgási folyamatok mennyiségi mérlegének felállítása azonban nem volt lehetséges. Az eredmények értékelése szempontjából a talaj, a talajlevegő és a talajvíz vizsgálatok megfelelőnek bizonyultak, a szivárgóvíz vizsgálatok eredményei azonban csak bizonyos megszorításokkal voltak felhasználhatók (v.ö. 5.1.1. és 5.1.2. fejezet).

---

<sup>15</sup> A 6/2009. (IV. 14.) KvVM-EüM-FVM együttes rendelet és az együttes rendeletben foglalt mérési kötelezettségek szabályozása (Mérési Kódex) tartalmazza a talajvíz analitikai vizsgálatokra vonatkozó előírásokat és szabványokat.

## 6. A terület természetes szennyezőanyag lebontási és megkötési potenciáljának jellemzése

Egy adott szennyezett terület telítetlen talajzónájára jellemző természetes szennyezőanyag lebontási és megkötési potenciál értékelését az illetékes hatóság végzi el, egyedi döntés keretében. A jelen Útmutató ehhez nyújt segítséget. Az alábbiakban adatok segítségével mutatjuk be, miképpen értékelhetők minőségi és mennyiségi szempontból a talaj természetes lebomlási és megkötési folyamatai.

Egy adott területen lejátszódó természetes lebomlás és megkötés minőségi értékelésekor nem egyetlen paramétert kell vizsgálnunk, hanem több paramétert és közeget kell bevonni a vizsgálatba.

A Schäferhof-Süd tartálytelep kutatási projekt során a talaj és a talajlevegő szennyezőanyag elemzési eredményeinek összehasonlítása azt mutatta, hogy a vizsgálat időtartama alatt a szennyezés összetétele jelentősen megváltozott (a nagymértékben illékony szénhidrogének aránya lecsökkent). Az összehasonlítás a telítetlen talajzónában lejátszódó mikrobiológiai lebomlásra engedett következtetni [1]. A szénhidrogénnel szennyezett területek lebomlási folyamatai általában ezzel analóg módon igazolhatók. A talaj szennyezőanyag tartalmának vizsgálatával (vizsgálandó paraméterek: szénhidrogén-tartalom, szénhidrogén azonosítás, szénhidrogén eluátum, BTEX-, alkil-benzol-tartalom, adott esetben további szennyezők), és a talajlevegő vizsgálatával (vizsgálandó paraméterek: összes szerves szén tartalom, n-alkán-, BTEX-, alkil-benzol-tartalom, adott esetben GC/MS meghatározás) kvalitatív igazolás lehetséges. A szénhidrogén vegyületek azonosítása révén a szelektív lebomlási folyamatok is kimutathatók, például az alkánok szelektív lebomlása anaerob talajzónákban. A vizsgálat következtetések levonását teszi lehetővé a visszamaradó nem lebontható szennyezőanyagokra vonatkozóan is. A szennyezőanyag lebomlás telítetlen talajzónában található anyagcsere-termékek (metabolitok) azonosításán alapuló bizonyítása a projekt során szerzett ismeretek alapján nem célravezető (talaj, talajeluátum talajlevegő és szivárgóvíz metabolit vizsgálat). A metabolitok lehetséges toxikus hatásainak vizsgálatára a vizsgálati programnak ki kell terjednie, ami a biológiai paraméterek meghatározásával lehetséges.

A természetes lebomlási folyamatokra vonatkozó kvalitatív következtetések vonhatók le az előbbiektől mellett a talajlevegő oxigéntartalom és széndioxid-tartalom jellemzőiből is. A Schäferhof-Süd tartálytelep területén a talajlevegő nagyon alacsony oxigén koncentrációja és nagyon magas széndioxid koncentrációja a mikrobiológiai lebomlást jelezte. A két különböző mértékben szennyezett területrész (a vizsgálati terület és a kismértékben szennyezett összehasonlító terület) összehasonlításával mennyiségi következtetések is levonhatók voltak a lebomlási folyamat lejátszódására. Emellett a talajlevegő oxigén- és széndioxid-tartalmának segítségével a mikrobiális aktivitás hőmérsékletváltozás miatt várható évszakos ingadozásai is meghatározhatók. Az évszakok hatása a nagyon kis mértékben szennyezett (összes szerves szén tartalom  $< 100 \text{ mg/m}^3$ , n-alkánok  $< 10 \text{ mg/m}^3$ , BTEX  $< 1 \text{ mg/m}^3$ ) talajrészekben már nem mutatható ki. A kutatási projekt tapasztalatai azt mutatták, hogy az oxigén- és széndioxid-tartalom paraméterek, hozzájuk kapcsolva a talajlevegő szennyezőanyag tartalmát, együttesen a mikrobiológiai szennyezőanyag lebomlás jól alkalmazható indikátorai. Ezt az indikátort előnyben kell ré-

szesíteni a talajminták talajlégzés paraméterével szemben, mivel a mikrobiológiai aktivitást a talajvizsgálat az adott pontban jelzi, ezzel szemben a talajlevegő vizsgálatok kiterjedt térrészre vonatkozó információt hordoznak.

Az aerob lebomlási folyamatok mellett nem zárható ki az anaerob folyamatok lejátszódása sem a telítetlen talajzónában. A Schäferhof-Süd tartálytelep kutatási programja igazolta, hogy a talaj nagymértékű szennyezettségének tartományában (> 1000 mg ásványolaj eredetű szénhidrogén / kg talaj) teljes nitrát felhasználás megy végbe. A szivárgóvíz kimutathatósági határ alatti nitrát koncentrációja ilyen módon esetleg anaerob mikroorganizmusok által végzett szennyezőanyag lebontásra utalhat. Ezzel szemben a szivárgóvíz szulfátkoncentrációja különböző okokból nem alkalmazható az anaerob folyamatok indikátoraként. (A talaj szulfáttartalmú ásványai és az ásványolaj szennyezés kéntartalmú vegyületeinek oxidációja miatt hamis következtetések adódhatnak.) A szivárgóvíz paramétereinek esetében mindig mérlegelni kell a meghatározás hasznosságát és határait (műszaki feladat, a mintavételi technika nehézségei, a mért értékek időbeli módosulásai, v.ö. 5.1.1. és 5.1.2. fejezet). Amennyiben eltekintünk a szivárgóvíz mintavételtől, akkor a talajlevegő metántartalmának kimutatása használható fel az anaerob folyamatok indikátoraként.

Amint az a Schäferhof-Süd tartálytelep kutatási projekt során igazolódott, az adott terület természetes lebomlási folyamatainak értékelésekor a biológiai paraméterek csak feltételeken alkalmazhatók a szennyezés (kiinduló szennyezőanyagok és anyagcsere bomlástermékek) lebontási folyamatban résztvevő talajorganizmusokra gyakorolt ökotoxikus hatásainak indikátoraként [1]. A talajlégzés paraméter elvileg alkalmas a mikrobiológiai aktivitás jelzésére és ugyanakkor a szennyező ökotoxikus hatásának kimutatására, a dehidrogenáz-aktivitás paraméter alkalmassága ugyanerre már nem volt igazolható. Végül a nitrifikációs potenciál paraméter alkalmas ugyan a mikrobiológiai aktivitás indikátoraként, de meghatározása igen költséges. Ebben az esetben a költségek és a hasznosság mérlegelése szükséges.

A szennyezőanyag lebontás és megkötés értékeléséhez elengedhetetlen a területet jellemző környezeti feltételek ismerete. Az ebben a tekintetben lényeges talajjellemzőkre és fizikai-kémiai jellemzőkre vonatkozó adatokat az Útmutató 4.1.3. és 4.1.4. fejezete, valamint a 4.1.6. fejezet táblázata tartalmazza. Amint az a kutatási projekt során igazolódott, különösen nagy jelentőségű a folyamatok által érintett talajzónák pH-értéke. A < 5 pH-érték olyan körülményeket jelez, amelyek már gátolják a természetes lebomlási folyamatok lejátszódását (v.ö. 4.1.6.1. - 1. táblázat). Ha a környezeti feltételek adott helyszínen megváltoznak, akkor az érintett paramétereket a vizsgálat időtartama alatt ismételtelen meg kell mérni. Ezt a jelenséget demonstrálja a pH-érték példája, amely a vizsgálat időtartama alatt semleges irányba változott. A helyszín környezeti körülményeinek megváltozását előidéző okok a következők lehetnek:

- a területfelszín (használatának) változásai, például elzárása a környezettől, vagy az elzárás megszüntetése,
- a hidrológiai feltételek megváltozása, például a talajvízszint ingadozásai (v.ö. 4.2. fejezet),
- a szennyezőanyag lebomlás előrehaladása folytán bekövetkező anyagösszetétel változások, például a lebomlási termékek keletkezése, az elektron akceptor felhasználása.

A telítetlen talajzónában lejátszódó természetes lebomlás és megkötés mennyiségi megítélése a helyszín adottságainak (geológiai, hidrogeológiai, környezeti feltételek, szennyezőanyag eloszlás) kisebb, vagy nagyobb mértékű heterogenitása miatt csak korlátozottan lehetséges. A paraméterek meghatározásakor pontszerű és térben integrált mintavételeket, illetve ennek megfelelő mérési eljárásokat is alkalmazni kell. A kis térfogatrészekre kiterjedő heterogenitások, mint például a lokális szennyezőanyag gócek (amelyen belül általában szintén inhomogén a szennyezőanyag eloszlás) csak pontszerű mintavételekkel (talajszondázás) határozhatók meg. A térben integrált eljárások (talajlevegő-, szivárgóvíz- és talajvíz-vizsgálatok) a felszín alatti viszonyok nagyobb térfogatra kiterjedő meghatározását teszik lehetővé. A Schäferhof-Süd tartálytelep terület tapasztalatai azt mutatták, hogy a két vizsgálati eljárás csoport kiegészíti egymást és mindkettő szükséges a telítetlen talajzóna természetes lebomlási és megkötési folyamatainak értékelésekor. A szivárgóvíz vizsgálatok – tekintettel a mintavétel várható műszaki nehézségeire és az eredmények korlátozott felhasználhatóságára (v.ö. 5.4.2 fejezet) – csak akkor ajánlhatók kiegészítő vizsgálat céljára, ha más közeg vizsgálatával nem határozhatók meg paraméterek. A szivárgóvíz egyes paraméterei (például a nagymértékben illékony szénhidrogének koncentrációja) jó közelítéssel meghatározhatók a talajlevegő mért megfelelő jellemzőiből, tapasztalati megoszlási együtthatók figyelembe vételével [1].

Az adott területen végbemenő szennyezőanyag lebomlás mennyiségi meghatározásához a talaj és a szennyezést szállító transzportközegek (talajlevegő, talajvíz) szennyezőanyag koncentrációinak több éves vizsgálata is szükséges lehet. A vizsgálati időtartam hosszát az adott egyedi esetre kell megállapítani. A terület várható heterogenitása miatt (különösen a talaj és szennyezőanyag paraméterek esetében) a mérési eredményeket alá kell támasztanunk statisztikai értékeléssel is (lásd 3.3.7. fejezet). A szennyezőanyag lebomlás értékelésekor gyakran a számítás alapjául vett 0. és 1. rendű elméleti reakciókinetikákat fenntartással kell kezelnünk, különösen amennyiben a számítás alapját talajvizsgálatok eredményei képezik [1]. A telítetlen talajzóna szennyező anyagainak várható lebomlási sebessége és időszükséglete ebből adódóan csak hozzávetőlegesen számítható. A szennyezőanyag csökkenés időtartama egyebek mellett a talaj kezdő időpontban fennálló szennyezőanyag terhelésétől is függ. A Schäferhof-Süd kutatási projekt eredményei szerint a telítetlen talajzóna kismértékű kezdeti szennyezőanyag terhelése (< 400 mg ásványolaj eredetű szénhidrogén / kg talaj) esetén a vizsgálat 3 év időtartama alatt a szennyezőanyag lebomlása teljesen végbement. Míg azokon a területrészekben, ahol a telítetlen talajzóna szennyezettségének kezdeti értéke ennél nagyobb volt, ott szennyezőanyag lebomlás egyáltalán nem volt kimutatható, vagy nagyon kis mértékű volt a lebomlás.

Egy adott helyszínen végbemenő szennyezőanyag megkötés mennyiségi meghatározása a szennyezőanyag transzport egyes tételeinek felmérésével lehetséges. A telítetlen talajzónából a talajvízbe és a légkörbe, mint határoló közegekbe irányuló szennyezőanyag kiszállítás becslése alapján állíthatók fel a lebomlási, kipárolgási és szennyezőanyag kimosódási folyamatok mérlegei.

A talajvízzel elszállított szennyezőanyag mennyiség becsléséhez a helyszín következő mért jellemzőire van szükség:

- a szennyezőanyag koncentrációja a talajvízben felváz irányban, a szennyezési gócban, és alváz irányban; a szennyezőcsóva karakterének és kiterjedésének függvényében egy vagy több, különböző mélységekben elhelyezett szűrőzésekkel ellátott mintavételi hely csoport szükséges;
- a talajvíztartó réteg vastagsága a szennyezett zónában;
- a talajvíztartó réteg porozitása és a talajvíz áramlási sebessége.

A szennyezőanyag mennyiség becsléséhez a számítás alapját képező adatok a megfelelő szakirodalmi forrásokból hozzáférhetőek [15].

A talajlevegő légkörbe irányuló szennyezőanyag transzportjának mennyiségi meghatározása kizárólag talajlevegő vizsgálatok alapján nem lehetséges, hanem a talajlevegőbe irányuló anyagátadás kinetikájának meghatározására szolgáló speciális helyszíni műveleteket igényel. Ehhez a következő eljárások állnak rendelkezésre:

- a szennyezett talajlevegő elszívása és kicserélése nem szennyezett levegőre (környezeti levegő beáramoltatása);
- a szennyezett talajlevegő kiszorítása inert nemesgázok telítetlen talajzónába történő bejuttatásával.

Az egyensúly beállás talajlevegő mérésekkel vizsgálható és a talajlevegő útján végbe menő szennyezőanyag kiszállítás becslésére használható fel [16].

A természetes lebomlási és megkötési folyamatok értékelését célul kitűző vizsgálati programnak a vizsgálat kezdő időpontjában meghatározott állapot mellett figyelembe kell vennie a terület adottságainak, jellemzőinek időbeli változásait (hidrogeológiai viszonyok, környezeti feltételek, szennyezőanyag-leltár és eloszlás). A Schäferhof-Süd kutatási projekt eredményei azt mutatják, hogy egyes paraméterek csak az időbeli mérési adatsorok kiértékelése után vonhatók be a folyamatok értékelésébe. Így a talajlevegő oxigén- és széndioxid-tartalom paraméterei, valamint szennyezőanyag specifikus paraméterei csak az évszak szerinti változások ismeretében, az előző évi adatokkal való összehasonlításban, és a vizsgált terület szennyezőanyag-leltárával való összefüggésben értékelhetők. Egyetlen időpont talajlevegő paraméter adatai alapján alig vonható le következtetés a lejátszódó természetes lebomlási és megkötési folyamatokra. A talajvíz paraméterek szennyezőanyag transzport meghatározása céljából történő értékeléshez is elengedhetetlenek az idősorok szerint ismételt mérések. A kutatási projekt keretében a BTEX példáján igazolható volt, hogy a szennyezőanyagok talajvíz általi transzportja időben nagymértékben ingadozik. Ennek elsődleges oka a változó talajvízszint. A talajvíz szennyezőanyag koncentrációjának ehhez kapcsolódó változásai áramlási irányban nagy távolságon keresztül hullámszerűen, azaz a talajvízszint változási ritmusának megfelelően továbbterjednek [1].

A terület szennyezőanyag lebontási és megkötési potenciáljának jellemzéséhez a telített talajzóna (talajvíz) esetében rendelkezésünkre állnak az értékelést megalapozó szakanyagok. Ezek tartalmazzak utalásokat a telítetlen zóna értékelésére is, azonban a telítetlen zónára nem alkalmazhatók. A telített talajzóna esetében például a lényegi

paraméterek egyedi értékeléseinek összefoglaló minősítésén (rangsorolásán) alapuló értékelési eljárásokat alkalmaznak [10]. A természetes lebomlási és megkötési folyamatok esetében rendelkezésre álló jelenlegi ismereteink hiányosságai folytán ez az eljárás nem alkalmazható a sokkal heterogénebb és összetettebb telítetlen talajzóna folyamatainak értékelésére. A telített talajzóna esetében alkalmazott további értékelési eljárások ellenőrző paraméterlistákon alapulnak, melyek segítségével a területeket az értékelési kritériumok szerint csoportokba sorolják. Adott csoport esetében a természetes lebomlási és megkötési folyamatok felhasználása alapján véve lehetséges, korlátozottan lehetséges, vagy nem lehetséges a területen [5]. Ennek az értékelési eljárásnak az adaptálása a telítetlen talajzóna szennyezéseinek esetére gyakorlati tapasztalatok hiányában jelenleg nem lehetséges.

## Irodalomjegyzék

- [1] UMWELTBUNDESAMT (2005): Langzeituntersuchungen zur Beurteilung des natürlichen Schadstoffabbaus und -rückhaltes in der ungesättigten Bodenzone, Abschlussbericht. Forschungsbericht  
FKZ 298 76 712/02, 163 S., Anh.
- [2] UMWELTBUNDESAMT (2004): Langzeituntersuchungen zu den Möglichkeiten und Grenzen der Nutzung natürlicher Selbstreinigungsprozesse für ausgewählte Schadstoffe am Beispiel kontaminierter militärischer Liegenschaften - Literaturstudie (Teilschritt 1), Forschungsbericht  
FKZ 298 76 712/02, UBA-Texte 49/04, Berlin, 106 S., 31 S. Anh., ISSN 0722-186X.
- [3] LABO (2005): Berücksichtigung natürlicher Schadstoffminderungsprozesse bei der Altlastenbearbeitung - Positionspapier des Ad-hoc Unterausschusses „Natural Attenuation“ des Ständigen Ausschusses Altlasten (ALA) der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO), Entwurf vom 09.03.2005
- [4] ITVA (2004): Monitored Natural Attenuation. Ingenieurtechnischer Verband Altlasten e.V., Berlin,  
ITVA-Arbeitshilfe – H1-12, Stand Dezember 2004
- [5] HLUG (2004): Arbeitshilfe zu überwachten natürlichen Abbau- und Rückhalteprozessen im Grundwasser (Monitored Natural Attenuation MNA). Wiesbaden, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie. Handbuch Altlasten, Bd.8, T.1
- [6] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (2004): Natürliche Schadstoffminderung bei Grundwasserverunreinigungen durch Altlasten und schädliche Bodenveränderungen – Natural Attenuation - Merkblatt Nr. 3.8/3 vom 05.11.2004, München, 17 S.
- [7] BBodSchV (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 12.07.1999.  
Bundesgesetzblatt I, G 5702, Nr. 36, 1554-1582
- [8] US-EPA, OSWER (1999): Use of Monitored Natural Attenuation at Superfund, RCRA Corrective Action and Underground Storage Tank Sites. OSWER-Directive 9200, 4-17, Washington, D.C.
- [9] LABO (2002): Arbeitshilfe Qualitätssicherung. Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz  
(LABO) - Altlastenausschuss (ALA), Unterausschuss "Arbeitshilfe für Qualitätsfragen bei der Altlastenbearbeitung", 471 S.
- [10] WIEDEMEIER T.H., WILSON J.T., KAMPBELL D.H., MILLER R.N., HANSEN J.E. (1995): Technical protocol for implementing intrinsic remediation with long-term monitoring for natural attenuation of fuel contamination dissolved in groundwater. – Air Force Center for Environmental Excellence (AFCEE)/Brooks Air Force Center, Technology Transfer Division, San Antonio, Texas. 2 vol.

- [11] KAMPBELL D.H. & VANDEGRIFT S. A. (1998): Analysis of dissolved methane, ethane, and ethylene in ground water by a standard gas chromatographic technique. *J. Chromatogr. Sci.* **36**, 253-256.
- [12] BUNDESANSTALT FÜR MATERIALFORSCHUNG UND –PRÜFUNG (2001): Anforderungen an Probennahme, Probenvorbehandlung und chemische Untersuchungsmethoden auf Bundesliegenschaften. 2001. Auf der Grundlage der Verwaltungsvereinbarung zwischen der Oberfinanzdirektion (OFD) Hannover und der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM), aktualisierte Fassung: Februar 2001. Berlin, 42 S.
- [13] DVWK (1990): DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU: Gewinnung von Bodenwasser mit Hilfe der Saugkerzenmethode. Merkblätter zur Wasserwirtschaft **217**, Bonn. 12 S.
- [14] BUNDESANSTALT FÜR MATERIALFORSCHUNG UND –PRÜFUNG (2001): Ringversuchsauswertung 7. BAM-Ringversuch „Altlasten“ . Organochlorpestizide, Polyzyklische Aromaten, Mineralölkohlenwasserstoffe, Schwermetalle und Cyanide in Boden. Berlin, 41 S.
- [15] WIEDEMEYER, T.H., RIFAI, H.S., NEWELL, C.J., WILSON, J.T. (1999): Natural Attenuation of Fuels and Chlorinated Solvents in the Subsurface. John Wiley & Sons, 617 S.
- [16] BATTELLE INGENIEURTECHNIK GMBH (1995): Demonstrationsvorhaben zur *in situ*-Sanierung von kontaminierten Böden bei der Bundeswehrliegenschaft Fliegerhorst Preschen mit dem Bioventing-Verfahren.  
Endbericht zum Vorhaben im Rahmen des Altlastenprogrammes Ost der Bundeswehr. Battelle Ingenieurtechnik GmbH, Eschborn
- [17] UMWELTBUNDESAMT (2002): Leitfaden „Biologische Verfahren zur Bodensanierung“. Projekträger Abfallwirtschaft und Altlastensanierung, Förderkennzeichen 1491064. 493 S.
- [18] ITVA (2003): Nachsorge und Überwachung von sanierten Altlasten. Ingenieurtechnischer Verband Altlasten e.V., Berlin, ITVA-Handlungsempfehlung – H 1 – 1, Stand Dezember 2003
- [19] DECHEMA (2001): Biologische Testverfahren für Boden und Bodenmaterial, DECHEMAArbeitsgruppe „Validierung biologischer Testmethoden für Böden“, 7. Bericht des Interdisziplinären Arbeitskreises „Umweltbiotechnologie – Boden“ (IAK), 61 S.