

**Korai figyelmeztető rendszerek a modern környezetmenedzsmentben**

**Tanulmány**

**Dr. Gruiz Katalin**

**2007**

## Tartalom

Korai figyelmeztető rendszerek a modern környezetmenedzsmentben.....	1
Bevezetés, MOKKA kontextus.....	3
Korai figyelmeztető rendszerek a környezetvédelemben .....	3
Általános korai figyelmeztetés, előrejelzés.....	5
Tevékenységfüggő korai figyelmeztetőrendszerek.....	6
A környezeti kockázatfelmérés, mint korai figyelmeztető rendszer (X0) .....	6
Adatok pontos előrejelzésekhez.....	9
Módszerek, végpontok, indikátorok a korai figyelmeztető rendszerekben .....	10
Korai figyelmeztető rendszer elhelyezése.....	11
A távérzékelés, GIS-alapú módszerek és hiperspektrális kiértékelés... <b>Hiba! A könyvjelző nem létezik.</b>	
Pontforrás-közeli indikátorok és módszerek.....	11
Transzportútvonalon alkalmazható indikátorok és módszerek.....	13
Receptor környezeti elembe (befogadó) alkalmazható indikátorok és módszerek.....	16
Környezeti elemekben elhelyezett szenzorok.....	17
Biológiai indikátorok .....	17
Biomonitorok elhelyezése és a korai figyelmeztetés koncepciója.....	18
A kagylómonitor és más vízi állatok .....	19
Fizikai-kémiai módszerek korai figyelmeztető rendszerként .....	20
Biológiai és környezettoxikológiai módszerek szennyezőanyagok hatásának kimutatására .....	20
Bioindikátorok, bioszenzorok, mikropróbák .....	21
Biológiai és géntechnikai módszerek a faji diverzitás jellemzésére és fajok kimutatására.....	22
Molekuláris módszerek a diverzitás jellemzésére és egyes fajok kimutatására.....	22
A MOKKA Projektben fejlesztett innovatív módszerek alkalmazása korai figyelmeztetésre .....	25
Modellezés .....	25
QSAR (= Quantitative Structure Activity relationship).....	25
Távérzékelés.....	26
In situ szenzorok .....	26
Innovatív mintavétel .....	26
In situ mérések .....	27
On site mérések.....	27
Push-pull technikák.....	27
Biodegradáció .....	28
Bioakkumuláció .....	28
Diverzitás .....	28
Káros hatások mérése.....	29
Korai figyelmeztetésre alkalmas érzékeny fajok .....	29
Integrált monitoring .....	29
Összefoglalás .....	30
Publikációk.....	30

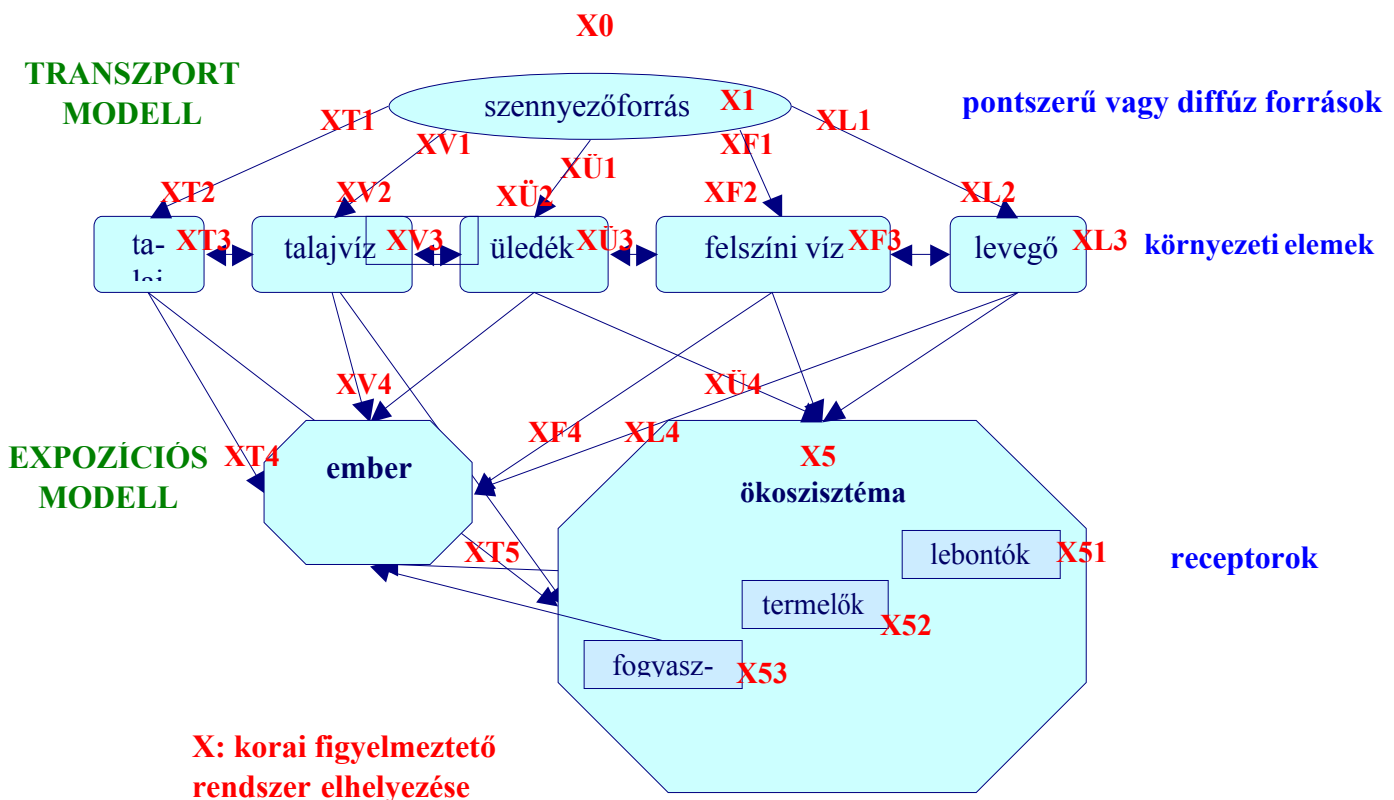
## Bevezetés, MOKKA kontextus

A modern környezetmenedzsment mérnöki eszköztárának (engineering tool) egyik leghatékonyabb eszköze a korai figyelmeztető jelek mérése, illetve folyamatos megfigyelése. Célja, hogy vegyi anyag gyártás, használat vagy bármilyen technológia-alkalmazás során, a környezetbe történő kibocsátással összefüggésben, a kibocsátott szennyezőanyag által veszélyeztetett (endangered) a környezet, a veszélynek (hazard) kitett ökoszisztéma és az ember még a visszafordíthatatlan károsodásokat (damage) megelőzően védelembe kerülhessen.

A korai figyelmeztető rendszerek, mint minden más, a környezet állapotát számszerű adattal jellemző módszer lehet matematikai modell alapján előrejelző rendszer, alapulhat fizikai-kémiai vagy biológiai, illetve ökológiai vizsgálat eredménye alapján és itt is minőségjavulást várhatunk az integrált módszeralkalmazástól ([Hivatkozás másik cikkekre, JLCR belül](#)). A hagyományos környezetmonitoringgal összehasonlítva, a korai figyelmeztető rendszerek nagyon specifikus, illetve szelektív indikátorokat és/vagy szuperérzékeny mérési módszereket. Tehát maximálisan kihasználják és ötvözik a környezetre, az ökológiai rendszerekre, a humán egészségre vonatkozó tudásbázist, és a környezetben történő mérésére (fizikai-kémiai analízis és biológiai-ökológiai tesztelés) valamint előrejelzésre alkalmas legújabb technikákat.

## Korai figyelmeztető rendszerek a környezetvédelemben

A környezetvédelemben alkalmazható korai figyelmeztető rendszerek alapja a problémához illeszkedő kockázati modell (risk model) és a megbízható előrejelzés (prediction). Az integrált kockázati modell mind lokálisan, mind regionálisan, mind globálisan alkalmazható és a korai figyelmeztetés koncepcionális alapját képezi.



1. ábra: Az integrált kockázati modell szerkezete és a korai figyelmeztető rendszerek elhelyezési lehetőségei a forrásban, a transzportútvonalon és a receptorok élőhelyein.

Az integrált kockázati modell (integrated risk modell) egy vegyi anyag (substance, chemical substance, chemical) környezetbe kerülését követő sorsát (fate) írja le feltételezett vagy valódi környezetben. A kockázati modell egyetlen vegyi anyagra vehető fel, és adatok, információk, ismeretek szükségesek hozzá. A kiindulási pont a szennyezőanyag forrása, amely lehet pontszerű vagy diffúz. A forrásból a vegyi anyag tulajdonságaitól függő jellemző transzportútvonalakon (transport routes or pathways) terjed tovább. A szennyezőanyag terjedését az anyag tulajdonságain kívül a környezet jellemzői is befolyásolják. A vegyi anyag mozgását a környezetben transzport modellekkel írhatjuk le a forrástól a célként megjelölt környezeti elemig.

Az integrált kockázati modell másik fele az expozíciós modell (exposure model), amely megadja, hogy a szennyezett környezeti elemet használó ökoszisztéma vagy ember milyen módon van kitéve (exposed) a szennyezett környezeti elemnek, illetve e a benne lévő vegyi anyagnak (belégzés, lenyelés, bőrkontaktus). A forrás és a receptorok vegyi anyag tartalma mennyiségekkel vagy koncentrációkkal (mg, kg, tonna, stb.), a transzport maga anyagáramokkal (kg/óra, stb.) jellemezhető.

Az integrált kockázati modell leképezi a valóságban potenciálisan létrejövő anyagáramokat, melyek ismeretében bármely helyen bármely időpontban megadhatjuk a vegyi anyag koncentrációját, melyet aztán a károsan még nem ható (megengedhető, elfogadható) koncentrációkhoz (No Effect Concentration) viszonyítva kapjuk a kockázati tényezőt, mellyel kvantitatíve jellemezhetjük a kockázatot.

Az integrált kockázati modell felvétele után lehet meghatározni a korai figyelmeztető rendszerek célszerű, minél „korábbi” elhelyezését a rendszerben (forrásban, transzportútvonalon, receptorokban, stb.). Ezeket a lehetséges elhelyezési pontokat jelöltük X-el az 1. ábrán.

A korai figyelmeztető rendszer egyik kritériuma – amennyiben nem tisztán előrejelzésen alapul, – hogy vagy térben, vagy időben, vagy mindkettőben a lehető legközelebb kell állnia a kibocsátás megjelenésének helyéhez, illetve idejéhez. A másik kritérium, hogy a módszer érzékenysége nagy legyen, vagy ha pl. egy kémiai analitikai mérési módszer érzékenysége (pl. kimutatási határa) *ab ovo* nem elég nagy, akkor dúsítási vagy más előkezelési módszerrel kombinálva meg lehessen növelni az érzékenységet. Az érzékenységhez gyakran kapcsolódik a szelektivitás kritériuma, főként a kockázat alapú (risk based) koncepcióban a forráshoz kötődő eljárásoknál. A transzportútvonal végére illesztett, vagyis a receptorokhoz kötődő eljárásoknál kevésbé lehet cél (sokszor nem is lehetséges) a szelektivitás, ott a lehető legkorábban megjelenő már nem elfogadható mértékű káros hatás mérésére kell alapoznunk, esetleg szelektív válaszok (erre kicsi az esély), de inkább egyáltalán nem szelektív, inkább kumulált válaszok nagy érzékenységgel történő észlelésére. A szelektív módszerek célzott, forrás-specifikus intézkedést tesznek lehetővé, a nem specifikus, vagyis receptor-specifikus módszerek (pl. ökoszisztéma diverzitásának változása, bizonyos érzékeny fajok kipusztulása, stb.) általában csak azt jelzik, hogy probléma van, de nem adnak egyértelmű felvilágosítást az okról. Ugyanakkor utóbbiak környezeti realitása nagy, valós problémát jeleznek, valós nagyságú válasszal, de a válasz integratív, vagyis az összes felmerülő ok, forrás hatásának összegzését jelenti. Tehát pl. a szennyezőanyagok jelenlétén túl a válasz magában foglalja az időjárási, klimatikus, szezonális, nem ismert biológiai (pl. vírusjárvány) hatást.

A korai figyelmeztető rendszerek koncepcionálisan lehetnek általánosak vagy tevékenység- függőek. Bármelyikről is beszélünk, a munka első lépése a kockázatos anyagok, ágensek, egyéb tényezők listázása és prioritások felállítása. Ha pontosan ismerjük a kockázat forrását, azonosítottuk az anyagot vagy ágenszt, akkor a forráshoz közel, konkrét anyagokat vagy ágenseket figyelünk meg. Ha a forrás diffúz vagy ismeretlen, akkor az összefolyásokban, transzportútvonalak kereszteződésénél, befolyásoknál igyekszünk megtalálni a kulcshelyeket, és ott figyeljük meg az ismert szennyezőanyagokat vagy ágenseket, illetve az azonosított vagy nem azonosított hatásokat. Ha semmit nem tudunk a forrásokról és anyagokról, ágensekről, vagy az anyagok és ágensek nem

elsődleges (ismert) hatásai dominálnak, akkor nem tehetünk mást, mint, hogy a transzportútvonalak végén lévő befogadó környezeti elemeket, azok ökoszisztémáját vagy a területet használó embereket figyeljük meg. Azonosított forrás és ágens esetében az anyag vagy az ágens direkt fizikai mérésén vagy kémiai analízisén alapuló korai figyelmeztető rendszereket érdemes alkalmazni. Amennyiben a környezeti elemekben tudjuk megfogni a problémát, akkor a környezeti elem integrált fizikai-kémiai biológiai tesztelése a megoldás, de ha csak receptorszinten jelenik meg a káros hatás, akkor a célszervezetek ismeretében természetesen a legalkalmasabb célszervezeteket, kitüntetett célszervezet híján a teljes ökoszisztémát vagy az embert tudjuk megfigyelni. A teljes ökoszisztéma esetén ökológiai korai figyelmeztetést alkalmazunk, mely általában a fajok diverzitását vagy egyes indikátorfajok meglétét, hiányát vagy anyagcsere-változását vizsgálja. Ezeknél a vizsgáló-rendszereknél nagy jelentőséggel bírnak a modern géntechnikák, illetve a modern géntechnikák és a hagyományos biológiai, mikrobiológiai és ökológiai tudás ötvözése, a hagyományos tudás lefordítás a modern géntechnika nyelvére.

### *Általános korai figyelmeztetés, előrejelzés*

Az általános korai figyelmeztető rendszer a vegyi anyag gyártott és/vagy használt mennyisége, környezetben való viselkedése és káros hatásai alapján jelez előre, hívja fel a figyelmet az elővigyázatosságra, a vegyi anyag mérőszámmal jellemzett veszélyessége alapján. Akkor alkalmazzuk, ha a vegyi anyagot jól ismerjük, de a felhasználás helye előre nem ismert, sőt később sem követhető térben és időben. Ilyen esetben a gyártott, eladott, exportált vagy importált anyagmennyiség önmagában használható korai figyelmeztető indikátorként, hiszen a tervezett mennyiségekből képezhető egy kockázati mérőszám. A mérőszám nagyságától függő intézkedést, korlátozást, kockázatsökkentési beavatkozást lehet végezni. Az integrált környezetmenedzsment, a megelőzés és a vegyi anyagokkal kapcsolatos szabályozások alkalmazzák ezt a koncepciót.

Ilyen rendszereket működtet az EU a vegyi anyagokkal kapcsolatos kockázatmenedzsmentben (REACH rendelet), például a nagy mennyiségben gyártott és használt toxikus anyagok kiemelt figyelemmel kísérésével és monitoringjával, szigorúbb előírásokkal, korlátozásokkal, kockázatsökkentéssel, kiterjedtebb kockázatmenedzsmenttel. A környezetbe teljes mennyiségében, ráadásul szinte kontrollálhatatlan eloszlásban, diffúz módon kikerülő gyártott anyagok, mint például a peszticidek, ilyen, előrejelzésen alapuló általános figyelmeztető rendszerek kontrollja alatt állnak, a környezetmonitoring a legkitettebb környezeti elemek és ökoszisztémák ellenőrzését szolgálja.

Korai figyelmeztető rendszerek között tehát kiemelt szerepük van az **előrejelzéseknek**. Vegyi anyagok gyártásával, használatával, gyártás, szállítás és használat közben, valamint hulladékként környezetbe kerülésével kapcsolatos előrejelzések adatbázisokra és aktuális mérési eredményekre támaszkodhatnak.

A vegyi anyagok környezeti kockázatának kvantitatív felmérése az egyik leghatékonyabb előrejelzési módszer, mely a tevékenységet, vagyis a vegyi anyag gyártását és használatát megelőzően is képes figyelmeztetni az anyag környezetbe kerülésével kapcsolatos potenciális problémákra.

**A kockázatselmérés** matematikai módszerekkel, – mérési képességünktől függetlenül (nincs mérés, amit behatárol a kimutathatósági határ, a legkisebb már hatást mutató koncentráció vagy dózis, stb.) – képes előrejelezni egy vegyi anyag várható környezeti koncentrációját, annak növekedését, valamint a káros hatás (adverse effect) potenciális megjelenését a környezetben. A metodika hatékonysága mellett sem költséges, illetve nem költséges, ha megfelelő minőségű adatbázisokra támaszkodhat. Manapság a költségek nagy részét az adja, hogy egy-egy egyedi felméréshez egyedi adatbázist kell létrehozni, mert az elérhető adatbázisok hiányosak, nem hozzáférhetőek, rossz minőségű adatokat tartalmaznak.

A kockázatfelmérés alapján történő előrejelzéssel – a bemenő adatok pontosságának javításával – a lehető legkorábbi és legérzékenyebb eredmény érhető el. Ugyanakkor korlátozza az eredmény minőségét a környezet- és a vegyi anyag-használat heterogenitása és emiatt időbeli és térbeli előrejelezhetőségének lokális szintet jellemző pontatlansága. A probléma hasonlatos az emberek egyéni kitettségének és érzékenységének problémájára. Hiába mondjuk ki egy vegyi anyag okozta környezetszennyezésről, hogy az általában elhanyagolható, ha van néhány ember, akinek az életmódja, mozgástera vagy egyéni anyagcsereje, érzékenysége az átlagosnál nagyobb kockázatot jelent nála. Az egyéni eltéréseket megfelelő biztonsági faktorokkal lehet figyelembe venni. Általában nem a legérzékenyebb elem biztonságát vesszük alapul, hanem az átlagos érzékenységűhöz viszonyítva építünk be egy biztonsági faktort az előrejelzési metodikába. A biztonsági faktor nagysága a földrajzi, időbeli és egyéni eltérésektől (szórástól) függ.

### ***Tevékenységtől függő korai figyelmeztetőrendszerek***

A tevékenységtől függő korai figyelmeztetőrendszerek a tevékenység természetétől függően alapozhatnak a forrás (pontos forrás vagy diffúz), a terjedési útvonalak, a receptor környezeti elemek vagy a környezeti elemeket használó receptorszervezetek, vagyis az ökoszisztéma és az ember jellemző adataira. Ezek az adatok lehetnek adatbázisokban rendelkezésre álló adatok, mint a gyártott és használt anyag mennyisége, az anyag ismert hatásai és az érintett környezet jellemzői. A korai figyelmeztetőrendszerek alapjául szolgáló másik adattípus a mért adat, melyet a kockázati modell által kijelölt forrásban, forrásközeli, transzportútvonalon elhelyezkedő, vagy a receptor elemekben található forrás pontokon elhelyezett in situ mérőeszközök jelei vagy vett minták laboratóriumi eredményeiből nyerhetünk, vagy magát az érintett receptor-közösséget vagy szervezetet vizsgáljuk. A transzportútvonalon elhelyezkedő megfigyelőpont is lehet a forráshoz közeli, a kibocsátást jellemző pont vagy a felhasználóhoz, a kitett receptorelemhez közeli vagy abban elhelyezett pont, ami már az expozíciós modell része (ld. 1. ábra)

Minél távolabb helyezkedik el a mérőpontunk a forrástól, annál érzékenyebb és szelektívebb módszerre van szükségünk, hiszen akkor már nagyfokú hígulás és más transzport- és sorsfolyamatoknak kitett, nagy zajokkal terhelt, kisebb koncentráció mérésére, kimutatására van szükség, ugyanakkor ezeken a távoli pontokon jelentkező hatások, melyek nagy környezeti realizmussal mutatják a káros hatást. A receptorok, befogadók szintjén elhelyezett megfigyelőrendszerek csak akkor hatékonyak, ha a vegyi anyag „jele” felerősíthető. Spontán módon, például a vegyi anyagra rendkívül érzékeny fajokra gyakorolt hatáson esetleg másodlagos biológiai hatásokon keresztül, vagy a módszer részeként kiprovokált érzékenységnöveléssel: helyi koncentráció szelektív gyűjtő rendszerekkel, a mérőmódszer érzékenységének növelésével, stb. Tehát itt vagy fizikai-kémiai, vagy biológiai módszerekre vagy a kettő kombinációjára van szükség és a magas zajszint miatt kulcsfontosságú a szelektivitás.

### **A környezeti kockázatfelmérés, mint korai figyelmeztető rendszer (X0)**

A környezeti kockázatfelmérést (KKF) a vegyi anyag által okozott károk előrejelzésére általános szinten, lokális, regionális vagy globális szinten lehet használni.

**Általános szinten** tudjuk a legérzékenyebb, valóban nagyon korai figyelmeztetést megkapni egy jó adatokra épülő mennyiségi KKF eredménytől. Ez az eredmény egyértelműen jelez, ha a vegyi anyag gyártásából, használatából, környezetbe kerüléséből előrejelezhető probléma nagysága meghaladja az elfogadható mértéket, tehát megadja azt, hogy a problémával foglalkozni kell, arra komplex menedzsment-stratégiát kell kidolgozni.

A menedzsment stratégia magába foglalja a környezeti kockázat – az általános szintet követően a konkrét tevékenységek helyétől és mértékétől függő – felmérését, a gyártott és felhasznált mennyiségek korlátozását, a használati kategóriák korlátozását, valamint a kitett környezet

megfelelő monitorozását, a lehető legkorábban jelet adó fizikai-kémiai és biológiai indikátorok bevetésével. A menedzsment stratégia természetesen tartalmazza a felmérési eredmények nagyságához kötött intézkedéseket is.

Az általános szintű előrejelzés regionális (Európa) vagy globális (egész Föld) szintre vonatkozik, nem helyszínspecifikus, lokális szintre nem ad konkrét információt, hiszen nem foglalja magába a vegyi anyaggal kapcsolatos tevékenységek földrajzi eloszlását és az érintett környezet és környezethasználat jellemzőit.

**Lokális szintű** előrejelzést a vegyianyag helyi gyártási, felhasználási és környezetbe kerülési adataiból lehet végezni. A vegyianyag teljes életciklusát figyelembe kell venni, és érdemes szétválasztani a gyártás és a használat, valamint a hulladékként való megjelenés folyamatait. A használaton és hulladékba kerülésen belül is tovább kell kategorizálni, például, ipari, mezőgazdasági, háztartási, pontszerű, diffúz, stb.

Legegyszerűbb dolgunk a lokálisan jelentkező, pontforrásból kiinduló kibocsátásoknál van. Ennek tipikus példája a vegyi anyag gyártása, valamint a lokális szennyezettség és az ezekhez kötődő kockázatok.

**A vegyianyag gyártásával** kapcsolatos kockázatok nagy pontossággal jelezhetőek előre és az előrejelzés folyamatosan validálható, az integrált kockázati modell alapján felállított korai figyelmeztető rendszer segítségével. A jó koncepció-modell a gyártási/technológiai folyamatok, a folyamatokból történő állandó vagy potenciális kibocsátás ismeretét tételezi fel és szükségesek hozzá a vegyi anyagra és a helyi környezetre vonatkozó adatok. Ez az eset az integrált kockázati modellünkben, a forrásban vagy a forrás közvetlen közelében felállított, az anyag tulajdonságaitól függő megfigyelőrendszert kíván. A forrásból kiinduló domináns transzportútvonalat elsősorban a vegyianyag tulajdonságai határozzák meg, de befolyásolják a gyártási technológia és környezet fő jellemzői (hőmérséklet, széljárás, felszíni víz közelsége, talajtípus, stb.) is. Ismert forrás esetében a korai figyelmeztető rendszer elhelyezése a forráshoz térben közel történik, tehát az X1, XL1, XF1, XV1 XÜ1, XT1 pontokon, az anyag domináns terjedési útvonalaának függvényében. Ezek szerint illékony anyagnál az üzem levegőjét, a technológiai elemekből kikerülő gőzmennyiséget, vízdoldható anyag esetében a szennyvizet a keletkezés helyén vagy/és a szennyvíztisztítóból kikerüléskor kell monitorozni, felszíni vízbe kerülés előtt, vagy a felszín alatti vizet, ha felszín alatti vízbe szivárgás feltételezhető. Ha a gyártott anyag szorbeálódó típusú, akkor a forró pontok talaját vagy üledékét kell megfigyelés alatt tartani, illetve az ezekkel egyensúlyt tartó víz- vagy gőzfázisokat.

Például egy klórozott szénhidrogén gyártási folyamata tökéletesen ismert: technológiai lépések, műveletek, folyamatok, reaktorok, segédanyagok, anyagformák, transzportfolyamatok, a műveletek során a környezettel és az emberrel való találkozás lehetőségei, és minden egyéb részlet. Ismertek a vegyi anyag fizikai-kémiai és környezeti tulajdonságai (illékonyasága, vízdoldhatósága, szorbeálódó képessége, megoszlása a fizikai fázisok között, így a Henry- és a Kow állandók, fotodegradációra, hidrolízisre és biodegradációra való hajlama, toxikus és más káros hatásai, stb.), így a gyártás környezet szempontjából „forró pontjai” azonosíthatóak. Ezekre a pontokra kell állítani azokat a monitoring pontokat, melyek mérési eredményei korai figyelmeztető rendszerként működnek.

A potenciális kibocsátási pontokon környezetbe kerülő maximális mennyiségekből előrejelzett kockázatok nagysága szerinti sorrendbe kell állítani a forró pontokat és a kockázat nagyságától (ami magában foglalja a potenciális kár nagyságán kívül az előfordulás gyakoriságát is) függően, ezeken a helyeken mérő, illetve ellenőrző pontokat kialakítani, megfelelő érzékenységgű fizikai-kémiai vagy biológiai indikátorok kiválasztásával és mérésével. Ha a kibocsátott mennyiség viszonylag nagy koncentrációt okoz a levegőben vagy a vízben, akkor azok közvetlen mérésével, szelektív szenzorok elhelyezésével és folyamatos jel produkálásával vagy időszakosan vett minták laboratóriumi mérésével követhetjük nyomon. Ha a kibocsátás nem okoz kimutatható káros határ

feletti koncentrációt, akkor a levegőt és a vizet ismert áramban szelektív elnyeletőkön/szorbereken keresztül vezetve (szívva) az elnyeletőkben/szorberekben elhelyezett szenzorok segítségével fizikai-kémiai végpontok mérésével akár folyamatos jeleket nyerhetünk a kibocsátásról. Hasonlóképpen járhatunk el a szorbeálódó szennyezőanyagoknál, ahol a levegő és/vagy a víz megnövelt érzékenységgű analízise alapján extrapolálhatunk a szilárd fázisok szennyezettségére a megoszlási hányadosok ismeretében.

Ismert vegyi anyag pontszerű kibocsátását a transzportútvonalon is jól követhetjük, korai figyelmeztetés céljára forrásközeli mérőpontot alkalmazunk a receptorok irányába mutató transzportútvonal(ak) mentén.

Nehezebb helyzet áll elő, ha ugyanennek a vegyi anyagnak a **felhasználásáról** van szó. Ha ez a felhasználás ipari felhasználás, ha tehát egy ipari alapanyagról van szó, akkor a konkrét használati helyek helyszínspecifikus kockázatfelméréséből következő forró pontokat kell monitorozni a kibocsátás ellenőrzésére. A probléma analóg a gyártás során alkalmazott monitoringgal. Ha a klórozott szénhidrogént, pl. perklóretilént, ruhatisztításra használják egy tisztítóüzemben, akkor a mosóberendezésből kikerülő gőzök, a mosóvizekkel távozó PCE koncentrációját kell a potenciális kibocsátások helyén mérni és természetesen a keletkező hulladék (persár) kezeléséből, tárolásából, elszállításából adódó kibocsátásokat. Tulajdonképpen ezek a forrásközeli kontrollmérések csak arra kellenek, hogy a nagy pontossággal előrejelezhető értékeket (melyeket a vegyi anyag tulajdonságai és a környezeti paraméterek ismeretében pontosan meghatároztak és az engedély kiadásánál, mint még elfogadható értéket akceptáltak) validáljuk, bizonyítsuk, hogy annál nagyobb kibocsátás nincs, illetve, ha annál nagyobb a kibocsátás, akkor intézkedés történik.

**Ha a vegyi anyag felhasználása** nem ipari, hanem pl. háztartásokban vagy a mezőgazdaságban történik, akkor a felhasználás diffúznak tekintendő, helyszíne előre nem ismert. Átlagos területre végezhetjük el a számításainkat, de akkor a különösen érzékeny területek és területhasználatok nincsenek figyelembe véve, vagy pesszimista megközelítéssel a lehető legrosszabb esetre készítjük az előrejelzést és ezzel túlbecsüljük a kockázatot egy átlagos helyszínen.

<b>Integrált kockázati modell</b>	<b>Helyszínspecifikus kockázatfelmérés</b>	<b>Monitoring korai indikátorokkal</b>
Szennyezőanyagforrás	<b>Pontforrás</b> Diffúz forrás	<b>Pontforrásban</b>
Transzportútvonal	Transzportmodell	Transzportútvonalon forrásközelen
Környezeti elem	Környezeti elem	Transzportútvonalon receptorközelen
Területhasználat	Expozíciós modell (területhasználatfüggő)	Korai indikátorok receptor környezeti elemben
Receptorok: ökoszisztéma, ember	Receptorok: ökoszisztéma: RQ ember: HQ	Korai indikátorok: ökoszisztémában ökoszisztématagban emberben



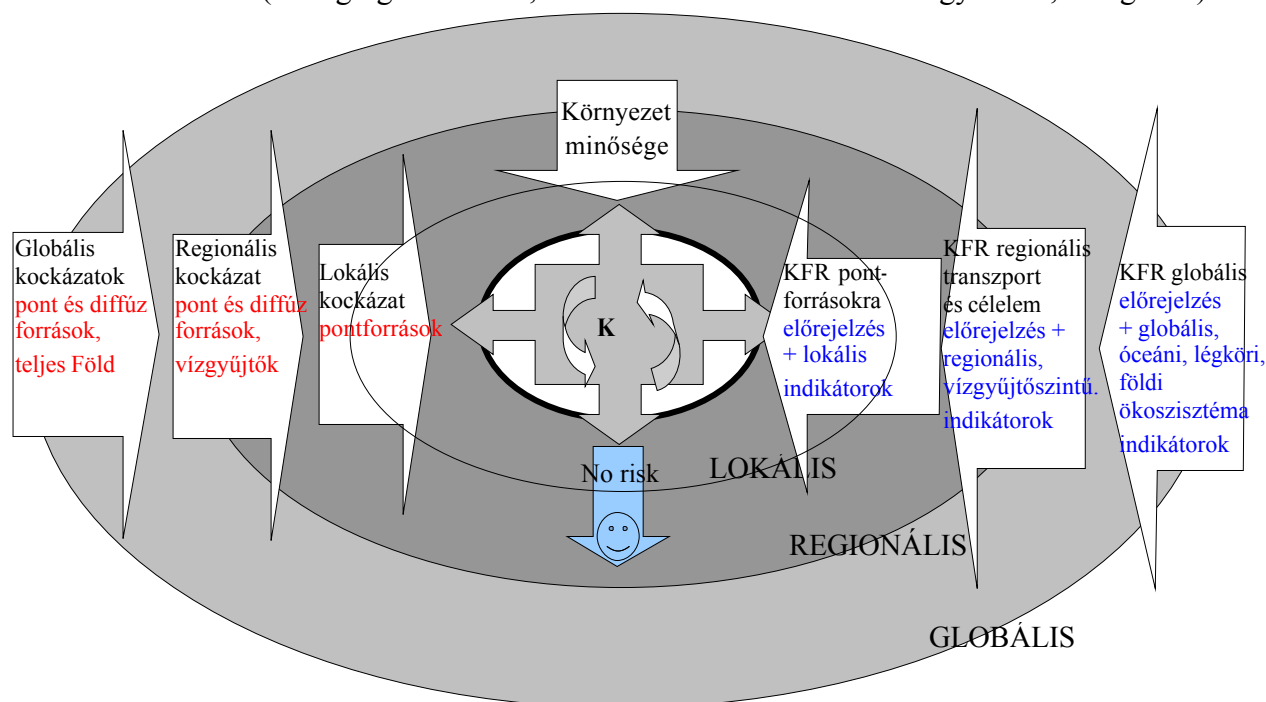
2. ábra: Kockázatfelmérés és monitoring az integrált kockázati modell alapján  
(HQ = Humán Risk Quotient, RQ = Environmental Risk Quotient)

A vegyi anyag-felhasználás kockázatának felmérése során többnyire általános kockázatfelmérési metodikát alkalmazunk érzékeny területhasználatokkal és receptorokkal (gyermek, óvoda, érzékeny ökoszisztéma). Készíthetnénk a konkrét felhasználási helyre helyszínspecifikus és használat-specifikus felmérést, ennek sem Magyarországon, sem más országokban sincsenek hagyományai, pl. családok speciális szokásait, lakókörményeit figyelembe vevő, vagy egyes agrár-gazdák munkamódszereit, hagyományait figyelembe vevő kockázatfelmérés. Valószínűsíthető, hogy a fejlődés, a kockázatfelmérési módszerek finomodása és az egyéni igények előtérbe kerülése előbb-utóbb az ilyen jellegű kockázatfelmérési és előrejelző rendszerek kifejlesztéséhez fog vezetni.

### Adatok pontos előrejelzésekhez

Az előrejelzések pontossága, jósága elsősorban a számításokhoz felhasznált adatok minőségétől függ. Az adatbázisok fejlesztése, az adatbázisok tartalmának minőségjavulása egyre megbízhatóbb adatok elérését teszi lehetővé, így előrejelzéseink pontossága, jósága is nőhet. Ha nincs az adatbázisban megfelelő adat, akkor felmérésre, saját adatgyűjtésre van szükség lokális, regionális vagy globális szinten.

Milyen adatokra van szükség? Gyártási adatok, elsősorban a mennyiség, felhasználási adatok, mennyiség és a felhasználás módja, a vegyi anyagra vonatkozó adatok, fizikai-kémiai tulajdonságok, biológiai hatások, környezetben viselkedés, bomlási tulajdonságok, reaktivitás, metabolitok, táplálékláncban való viselkedés. Ezek az adatok szükségesek a kockázatfelméréshez és ugyanezeket lehet mérni végpontként korai figyelmeztető rendszerekben is. Ma még rengeteg a hiány az adatbázisokban., de a létező adatok sem mindig jó minőségűek és nem terjednek ki mindenre, például egyes ismert anyagok ismét tulajdonságai és hatásai mellett, korábban ismeretlen hatások is felmerülnek (emerging chemicals, hormonhatású nem hormon-vegyületek, allergének).



2. ábra: Kibocsátás és korai figyelmeztető rendszer lokális, regionális és globális szinteken  
(K = Környezet, KFR=Korai Figyelmeztető rendszer, No Risk = nincs kockázat)

## **Módszerek, végpontok, indikátorok a korai figyelmeztető rendszerekben**

A korai figyelmeztető rendszerünk koncepcióját nagyban befolyásolja a méret, a források és az érintett vagy vizsgált terület kiterjedése, a válasz és a beavatkozás időbeli igényei, mennyire gyors reakciót várunk a menedzsmenttől.

Más indikátorokat és módszereket alkalmazunk globális, regionális és lokális szinteken.

Globális szinten a globális környezeti, ökológiai trendek értelmezéséhez nyilván elsősorban a teljes Földet átfogni képes távérzékelési módszereket, műholdas felvételeket fogjuk használni, és az idősorokból megállapítani a globális trendeket, a területhasználatok változását, a népesség-sűrűséget, az erdők, az óceánok kiterjedtségét, területi részarányát, a sivatagosodást, a szárazsággal jellemezhető területeket, a savas esők miatti erdőpusztulást, a talajpusztulást, a légköri kockázatokat, a növényzet beltartalmi értékét, stb. Globális szinten elsősorban ezeknek a nagyterjedésű funkcióknak a veszélyeztetettség, a határok elmozdulásának érzékelése lehet a cél. Az itt alkalmazott indikátorok elsősorban a kiterjedés, az egyes funkcióknak eleget tevő területek nagysága (erdő, művelt terület, szárazság sújtotta terület, stb.) és a funkciókhoz kötött, távérzékeléssel érzékelhető minőség (a növényzet sűrűsége, a talaj nedvességtartalma, a növényzet klorofill-tartalma, stb.).

A regionális szintű korai figyelmeztető rendszerek és indikátorok elsősorban a vízgyűjtőszinten információt adó és releváns indikátorokat fogják választani felméréshez vagy még inkább a monitoringhoz. Itt is prioritásuk van a távérzékelési módszereknek, a vízgyűjtőszintű modelleknek, a források, a transzportútvonalak azonosítását és követését célzó módszereknek, ugyanakkor a környezeti elemek, pl. a felszíni vízhálózat, a vízgyűjtők vízminőségének nagyérzékenységgű módszerekkel történő megfigyelése is azonos értékű metodika. A használható indikátorok közül a fizikai-kémiai, pl. a vegyi anyag jelenlétét mutató indikátorok azonos jelentőségűek az ökoszisztémára, egyes ökoszisztématagokra vagy az emberre gyakorolt káros hatások mérésével.

Lokális szintű korai figyelmeztető rendszerek a források, elsősorban a pontforrások és az azokból történő kibocsátás megfigyelésén alapulnak, ezért az itt használatos indikátorok elsősorban szelektív fizikai-kémiai mérési végpontokkal azonosak.

A korai figyelmeztető rendszerek koncepciójának kialakításához elsősorban megfelelő kockázati modellre van szükségünk, releváns indikátorokra, ezek méréséhez megfelelő technikákra, és olyan adatértékelési, és interpretációs módszerekre, melyek a mért adatok döntésekhez való felhasználását teszik lehetővé. Mivel általában többféle adat is rendelkezésre áll egy-egy probléma avagy terület monitoringja során, az adatok összességét kezelő értékelő és interpretációs metodikát kell választanunk, illetve kidolgoznunk.

A korai figyelmeztetés nagyon fontos eleme a modellezés, amivel ebben a fejezetben nem foglalkozunk külön, de belátható, hogy mérni még egy alkalommal sem szabad anélkül, hogy ne próbálnánk extrapolálni a mérési pontot hely és idő szerint megelőző és követő pontokkal, de környezetmonitoring, vagyis idősor szerinti adatok esetén, nyilván interpolálunk is és extrapolálunk is, tehát modelleket használunk.

Az emberi egészség indikátorai is felhasználhatóak, nem mindig korai, de mindenesetre figyelmeztető rendszerként. A nyilvántartások a betegségi és halálozási statisztikák, valamint a veleszületett rendellenességek nyilvántartása alapján a toxikus, mutagén és teratogén hatások elfogadhatatlan szintje érzékelhető. Ha ezek jó minőségű, megbízható, lakóhely (és nem kórház) szerinti adatok lennének, ha az adatszolgáltatási kötelezettséget mindenki komolyan venné és szigorúan betartaná, akkor ezekből a humán egészségi állapotot jellemző adatokból rengeteg figyelmeztetést kaphatnánk. Ezek mellett lehetne olyan indikátorokat kijelölni, amelyeket a rutin vér- és vizeletvizsgálattal együtt végeznének el, és statisztikailag értékelnének, pl. a toxikus fémek kiválasztásáért felelős metallotioneinek megnövekedett koncentrációját, vagy az emberi védekező

mechanizmus számtalan más indikátorát. Hasonlóan érzékeny indikátorok lehetnének a hormonháztartást felborító vegyi anyagok korai jelzésére emlősállatok és az ember hormon-aktivitásaiban bekövetkező kóros elváltozások földrajzi kiértékelése, stb.

A korai figyelmeztető rendszerek tervezésénél és helyes megválasztásánál egy sor körülményt kell figyelembe vennünk, így a vegyi anyag tulajdonságait, a transzportmodellt, a források és transzportútvonalak helyét, a receptor környezeti elemek és az azt használó emberek és ökoszisztémák jellemzőit, a mérési lehetőségeket. Ezek alapján határozhatjuk meg az elhelyezés helyét és módját, módszereit.

### ***Korai figyelmeztető rendszer elhelyezése***

A korai figyelmeztető rendszer konkrét (validáló, illetve helyszínspecifikus figyelmeztetésre alkalmas) indikátorait és mérőpontjait pontforrás esetén a potenciális kibocsátáshoz a lehető legközelebb, a munkahelyek légtere, a szennyvíz-gyűjtő és a szilárd hulladékgyűjtő rendszerek transzportútvonalainak legelején (X1) kell elhelyezni, diffúz források esetén a szennyezőanyag befogadó környezeti elem (felszíni víz, felszín alatti víz, ülepedési zóna, árterület, stb.) forrásközeli, kibocsátásközeli vagy befolyás-közeli pontjain kell elhelyezni (X2). Magában a veszélyeztetett környezeti elemekben (X3) csak akkor érdemes elhelyezni a megfigyelőpontot, ha a bemenő pontok (pl. befolyás) nem azonosíthatóak, vagy ha nagyon sok ilyen van, például vízgyűjtőszintű diffúz szennyezettség esetén.

Amennyiben diffúz vagy helyileg nem azonosított forrásokról van szó, akkor a mozgékony környezeti elemek összefolyásainál, transzportútvonalak kereszteződésénél kell a monitorpontokat elhelyezni (XF2, XT2, XV2, XÜ2, XL2). Ez a felszíni vízrendszer gyűjtőrendszereit, összefolyásokat jelent, az összefolyás előtti és utáni pontok összehasonlítása is sok információt ad. Talajvíz esetében a felszín alatti áramlásoknak megfelelő kulcspontokról van szó. Üledékeknél vagy a lebegőanyagot nézzük megfelelő befolyásoknál illetve összefolyásoknál, vagy pedig az ismert ülepedési zónák anyagát, rendszeresen elárasztott területek borítórétegét. Az atmoszféra vizsgálatához a meteorológusok előrejelzései alapján választhatjuk ki a forró pontokat. A talaj az egyik legbonyolultabb környezeti elem ilyen szempontból: támaszkodhatunk az eródált és másodlagosan lerakódott, kiülepedett talajra, felszíni vízi üledékekre, öntésterületekre.

Jó kilátásokkal kecsegtet a rohamosan fejlődő távérzékelés Felhasználása a környezetmonitoringban, a korai figyelmeztetésben a közeljövő modern technológiája lesz.

A következőkben a monitoring elhelyezkedésével foglalkozunk (a távérzékelést külön fejezetben találhatjuk), megkülönböztetve a pontforrásban vagy közelében, a szennyezettség terjedésének útvonalán vagy a receptorok élőhelyén való elhelyezés lehetőségeit, előnyeit, hátrányait.

### ***Pontforrás-közeli indikátorok és módszerek***

A forrásból kiinduló transzportútvonalakat elsősorban a vegyi anyag tulajdonságai határozzák meg, de befolyásolja a kibocsátás módja és a környezet fő jellemzői (hőmérséklet, széljárás, felszíni víz közelsége, talajtípus, stb.). A korai figyelmeztető rendszer elhelyezése az X0, X1, XL1, XF1, XV1 XÜ1, XT1 pontokon célszerű, az anyag domináns terjedési útvonalának függvényében. A prioritást élvező indikátor maga a vegyi anyag vagy annak közvetlen hatása. Illékony anyag esetében a gőzteret vagy a forráshoz minél közelebb eső tér levegőjét kell monitorozni, a levegőtisztaság-védelem eszköztárával. A mintagyűjtő és a szenzor elhelyezhető magában a potenciálisan szennyezett lég/gőzterben, de a kimutathatósági értékhez közeli koncentrációknál célszerű elnyelető/szorbeáló egységek bevetése, melyek időegység alatt megkötött szennyezőanyag koncentrációját mérik és regisztrálják. Vizoldható, vagy megoszlással vízbe kerülő anyagok esetében a forráshoz legközelebbi szennyvíz-kibocsátó pontot kell vizsgálni (XV1), de ha erre nincs mód, vagy nem határolható le a forrás, akkor a szennyvíztisztító befolyásánál elhelyezett

mérőberendezés adataira kell támaszkodnunk. A szennyvíztisztítóból kikerülő víz monitorozása akkor vezet eredményre, ha a szennyezőanyag terhelése állandó és a tisztítóberendezés normális körülmények között biztosítani képes a kockázat kívánt szintre csökkentését. A felszín alatti vizekbe kerülést megelőző monitoringra lenne szükség, ami ismert potenciális források esetén megoldható, de diffúz forrásoknál nem. Ha a kibocsátás nem kontrollálható lokálisan, akkor a felszín alatti vízben potenciálisan kialakuló csóva (talajvíz áramlási irány, sebesség, stb. alapján határozható meg) ismeretében kell elhelyezni a monitoring-kutat, illetve a kút működtetésével (depresszió) úgy irányítani a felszín alatti áramlást, hogy a vizsgálandó víz ne kerülhesse el a mintavevőt, mintagyűjtőt vagy közvetlen mérő/érzékelő berendezést. Szorbeálódó típusú anyagoknál szintén két módon járhatunk el: ha ismert a potenciális kibocsátó pont, akkor annak közvetlen közelében helyezzük el az érzékelő/mérő berendezést. Ilyenkor akár a szorbeáló fázist, akár a megoszlás miatt érintett fázist vizsgálhatjuk. Ha a forrás diffúz vagy nem azonosítható, akkor nincs más lehetőségünk, mint a megoszláson keresztül következtetni a szilárd fázis szennyezettségére a könnyebben gyűjthető, irányítható (spontán vagy manipulált módon) víz- vagy gázfázis vizsgálati eredménye alapján.

A klórozott szénhidrogén gyártásának/felhasználásának példájánál maradva a kibocsátási pontokon megfelelő érzékenységű fizikai-kémiai vagy biológiai indikátorok felhasználásával folyamatos jelet produkáló szenzorokat helyezhetünk el, ha a kibocsátott mennyiség viszonylag nagy koncentrációt okoz a levegőben vagy a vízben. Ha a kibocsátás nem okoz kimutathatósági határ feletti koncentrációt, akkor a szennyezőanyagot dúsítani kell a vizsgált környezeti fázisban (levegő, víz). A kontrolláltan koncentrált szennyezőanyag célszerűen elhelyezett fizikai-kémiai szenzorok segítségével folyamatos jeleket ad a kibocsátásról. Természetesen a folyamatos jelképzés mellett mindig nyitva áll a szakaszos mérési lehetőség, a laboratóriumba szállított elnyelető/szorbeáló anyag (dúsító közeg) hagyományos kémiai analízisével. Gyógyszergyár klórozott szénhidrogén-kibocsátásának (diklóretán, kloroform, szén-tetraklorid) monitorozására, például, a kéménybe helyezett aktív szén tartalmazó adszorpciós csöveket használnak (Balla, 1997). Egy-egy mintavétel ideje 2 óra 5 l/h áramlási sebességnél. A mintavételt követően a gondosan lezárt mintavevő csövek a laboratóriumba kerülnek, ahol a csövek tartalmát megfelelő oldószerrel deszorbeálják, és ebből az oldatból injektálnak a gázkromatográfbba. A kromatogramokat belső standard (klórbenzol) alkalmazásával kiértékelve számítják az emittált klórozott szénhidrogének mennyiségét.

A dúsításhoz felhasználható módszerek a szelektív elnyelető vagy szorbeáló anyag (pl. vízdoldható anyag feloldása vízben, párolgó anyag lecsapása, lúgos termék elnyeletése savas közegben vagy fordítva), az elektrokinetika módszerek, melyek a töltéssel rendelkező szennyezőanyag elektródákra koncentrációját eredményezi vagy szelektív kémiai reakciókon alapuló csapdázás (minden reaktív vegyület átalakítása oldható, oldhatatlan, kicsapódó, oxidált, redukált, kondenzált, polimerizálódott, stb.) terméké. A mérést megelőző kémiai átalakítás nem csak a dúsítást, koncentrációt szolgálhatja, hanem a kimutatási reakció érzékenységét növelő formák létrehozását is.

Tipikus dúsító segédanyag a ciklodextrin, bizonyos mértékű specificitással. Ciklodextrin alapú kémiai csapdákat terveztünk korai figyelmeztető rendszerek céljából a MOKKA projektben. A MOKKA konzorcium egyik tagja, a CycloLab Kft szabadalmaztatott eljárása szerint ciklodextrin-polimereket tartalmazó csapdákat alkalmazunk radioaktív jód megkötésére nukleáris erőművek kibocsátásának csökkentésére (Fenyvesi és mtsai, 1999). Hasonló, kisebb méretű csapdák használhatók az emisszió mérésére korai figyelmeztető rendszerként. Más kutatók ciklodextrin alapú csapdákat írtak le poliklórozott dioxinok és dibenzofuránok megkötésére talajból (Cathum és mtsai, 2007), illékony szerves anyagok (VOC, pl. széntetraklorid) megkötésére levegőből (Fourmentin, 2007), PAH-vegyületek, gyógyszermaradványok, növényvédőszer megkötésére vízből (Opreció és Evans, 2003). A megkötött anyagokat a csapdából megfelelő oldószerrel

kiextrahálva kromatográfiával elemezhetjük vagy ha illékonyak, gőztéranalízissel közvetlenül vizsgálhatjuk.

A talajba kerülő vegyi anyagok, hacsak nem ismerjük nagy pontossággal a forrást, a talaj heterogenitása miatt nehezen mérhetőek, koncentrációjuknak folyamatos követése a szilárd fázis direkt analízisének keresztül szinte lehetetlen. Ugyanakkor a talajvíz és a talajlevegő, mint mozgékony fázisok képesek átlagolni a szilárd fázisból megoszlással bekerülő szennyezőanyagot. A talajgáz és a talajnedvesség, illetve a talajvíz szennyezettségének vagy a szennyezőanyag hatásának mérése alapján következtethetünk a talaj szennyezettségére és a transzportmodell visszafelé alkalmazásával a források azonosítása is lehetségessé válhat. A talaj mozgékony fázisainak in situ mérése, belehelyezett szenzorokkal, vagy kiszivattyúzott hányad direkt (szívócellába helyezett) vagy indirekt (dúsító/gyűjtő anyagba helyezett) szenzoros vagy hagyományos fizikai-kémiai analitikai vizsgálatával, vagy bioszenzorok, illetve laboratóriumi biotesztek alkalmazásával egyaránt megvalósítható.

A szennyezőanyag nem csak a talajlevegőbe és a talajvízbe kerülhet át megoszlással, de a talaj ökoszisztémájába, a talajmikroorganizmusokba és a talajon növekvő növényekbe is, amely újabb lehetőséget biztosít kora figyelmeztető rendszerek forrásközei alkalmazásához. A talajmikroflóra azonnal reagál minden szennyezettségre: vagy diverzítésének megváltoztatásával, vagy speciális gének elterjedésével a metagenomban (pl. szennyezőanyag tűréséért, bontásáért felelős gének). Ilyen genetikai markerek találhatóak, azonosíthatóak és DNS technikákkal nyomonkövethetőek. Géntechnikán alapuló in situ szenzorok is kreálhatóak, erre több kutatási eredmény van, de ma még kevés, gyakorlati megvalósulás. A talajvízzel és gázzal átlagoló szennyezőanyag káros hatásának mérésére is sok lehetőségünk van: toxicitási tesztek, mutagenitási tesztek: hagyományos megoldásban a laboratóriumba szállított minták tesztelése alapján vagy olyan mikrobiológiai szenzorba építve, ahol a toxikus hatásnak megfelelő biológiai jel azonnal elektromos jellel konvertálódik és akár távjeladóval kerülhet a monitoringért felelős komputerbe.

Valamivel könnyebb feladatunk van, ha a potenciális szennyezőforrás környezetében a talajon növekvő növényzet vizuális megfigyelése szolgáltat információt, mérési végpontot. A vizuális megfigyelés is lehet objektív módszer, műszerek segítségével, pl. a növényzet színe, mérete, denzitása, stb. Itt hatalmas lehetőségei vannak a távérzékelésnek, elsősorban a hiperspektrális kiértékelésnek. A hiperspektrális jeleken alapuló monitoringrendszerek akár közvetlenül a szennyezőanyagot vagy annak bármilyen következményét képesek indikálni: megváltozott fajeloszlás, méret, sűrűség, látható színek és egyéb nem látható spektrumok alapján.

A pontszerű és diffúz szennyezőforrások azonosítására és monitorozására az egyik legkézenfekvőbb módszer a légifelvételek, lehetőleg idősorának értékelése. A légifotók alapján azonosítható a forrás nagysága, mérete, hiperspektrális kiértékelés esetén, anyaga is. A felvételek idősora alapján modellezhető a transzport és mennyiségileg is felmérhető a kockázat. Az így kapott információk alapján meghatározható a beavatkozás sürgőssége, kiszámítható a forrásból való kibocsátás. A magárahagyott hulladéklerakatok, ipari- és bányászati hulladékok, meddőhányók, illegális hulladékkupacok szétszóródása, eróziója jól követhető a légifelvételek idősorán. A korai figyelmeztető rendszerek alkalmazásának csak akkor van értelme a környezetmenedzsment szempontjából, ha a korai észleléshez, korai intézkedés is tartozik.

### ***Transzportútvonalon alkalmazható indikátorok és módszerek***

A transzportútvonalakon elhelyezendő korai figyelmeztető rendszerek hasonlóak lehetnek a forrásoknál alkalmazottakhoz, de a módszernek egyre szelektívebbnek és érzékenyebbnek kell lennie, minél messzebb kerülünk a forrástól.

Az indikátorok közül még mindig fontos a szennyezőanyag vagy ágens, de ugyanilyen fontosságú annak közvetlen vagy közvetett hatása a környezet fizikai-kémiai paramétereire vagy az ökoszisztémára.

Különösen fontos szerepe van az integrált kockázati modellnek, hiszen a transzportútvonalon elhelyezett korai figyelmeztető rendszernek a domináns kockázatokra és a domináns transzportútvonalakra kell koncentrálnia. A jól megválasztott hely már fél siker és hatékonyan alkalmazható megelőzésre és a transzportmodellünk, illetve a kockázati modellünk validálására is.

A transzportútvonalakon is megvannak a már ismertetett lehetőségek: a környezeti elemekben történő direkt mérés fizikai-kémiai vagy biológiai, molekuláris biológiai, pl. DNS-technikák vagy toxikológiai módszerekkel. Itt is támaszkodhatunk a megoszlás (szilárd-folyadék és folyadék-gőz, esetleg szilárd-gőz) alapján történő becslésekre, következtetésekre.

Érdeemes megkülönböztetni a transzportútvonal elején, a forráshoz közeli pontot a befogadóközeli ponttól. Amíg a forrásközeli elsősorban a forrást jellemzi és a receptor kockázatára további becslésekkel tudunk következtetni, addig a befogadóközeli már a szennyezett, élőhelyül szolgáló, vagy emberi használatban lévő környezeti elemre vonatkozik, melynek kockázatfelmérése transzportmodell alkalmazása nélkül történhet az előrejelzés szerint károsan még nem ható koncentrációkkal (PNEC) való összehasonlítás alapján. Ugyanakkor számolnunk kell a transzportútvonal hosszában bekövetkező hígulással, retenciókkal, vagyis koncentráció-csökkenésekkel és a zavaró jelek, hasonló vagy ellentétes hatások megjelenésével. A transzportútvonal mentén megjelenő gradiensről tudnunk kell, hogy hol éri el a fizikai-kémiai kimutathatóság határát, hol éri el a biológiai hatások mérhetetlenné hígulását, az adaptációs folyamatok alakulását és mindezen folyamatok időfüggését, az időbeli kumulációk mértékét, a primer hatásokon kívül jelentkező másodlagos hatásokat és az azokhoz tartozó még nem ható koncentrációkat, a krónikusan jelentkező hatásokat, a kihíguló hatások mellett jelentkező és korai figyelmeztető rendszer alapját képező kumulatív hatásokat, például a bioakkumulációt és biomagnifikációt, stb.

A transzportútvonalon elhelyezett megfigyelőpontok előnye, hogy egy természetes gradiens várható az útvonal mentén (csökkenő és növekvő gradiens), tehát az útvonalon elhelyezett mérőpontok egymáshoz viszonyított eredménye, a gradiens alakulásának foka sokat javíthat a mérés statisztikáján. Olyan kétdimenziós, alkalmasint többdimenziós mátrix-kísérlethez hasonlítható monitoring-rendszert állíthatunk fel, mely sokszorosan megnöveli a szignifikáns és korreláló eredmények kiszűrésének eshetőségét.

A transzportútvonal mentén elhelyezett megfigyelő rendszerek alapulhatnak kémiai analitikai végpontokon vagy biológiai végpontokon. Egy-egy gén megjelenése, koncentrációváltozásai, a fajeloszlások, a mérhető hatások követése lehetővé teszi a már el nem fogadható kockázatok elérésnek indikálását, ugyanakkor az ok, és megfelelő kockázati modell birtokában forrás azonosítását is. Az érzékenység növelését a transzportútvonalon fennálló, előrejelezhető gradiens teszti lehetővé. A szelektivitás növelésére nagy szükség van, hiszen hosszú útvonalakon nem alapozhatunk az ökoszisztéma viszonylagos állandóságára, tehát az ökoszisztéma-jellemzők mérését a nagy szórás miatt valószínűleg mellőznünk kell.

Az ökoszisztéma jellemzők mérésére a környezeti elemekbe helyezett korai figyelmeztető rendszerek esetében fogunk támaszkodni egy-egy befogadóra jellemző viszonylagos állandóság miatt (pl. Balaton). Ezeknek az ökoszisztéma jellemzőknek az interpretációjával van problémánk: a diverzitás, fajeloszlás jellemzését szolgáló relatív számok, indexek nem integrálhatóak a mennyiségi kockázatfelmérés PEC/PNEC alapú koncepciójába. Ezt a környezeti elemekre, illetve ökoszisztémákra alkalmazott korai figyelmeztető rendszereknél részletesebben is tárgyaljuk.

A környezeti elemekbe helyezett korai figyelmeztető rendszer lehet a folyóvizekbe a folyás mentén különböző pontokon, főleg a csatornabefolyásoknál, mint forró pontokon elhelyezett fémmérő monitor, melynek érzékenysége (Zn 0,1, Cd 0,05, Cu 0,2, Pb 0,2, Cr 1 mg/l) lehetővé teszi (Mezei és Cserfalvi, 2007), hogy akár 10–15 perces mérési sűrűséggel detektáljon és riasztó jelzést adjon a határértékhez közeli fémkoncentrációknál.

A kockázati modell és a belső összefüggések megértése azt is lehetővé teszi, hogy az egymással összefüggő paraméterek közül a legkönnyebben és legolcsóbban mérhetőt válasszuk ki. Ilyen esetet példáz a Gyöngyösoroszi Toka-patak völgye, ahol a szulfidos bányászati hulladékból származó nehézfém-szennyezettség (Cd, Cu, Zn, Pb) a savas pH-val függ össze, hiszen a kemolitotróf aerob baktériumok szulfidból nyerik az energiát, miközben szulfáttá oxidálják a kenet. Ez a kénsavoldat oldja ki a hulladék fémtartalmát. A felszíni vízfolyások és a patak pH-értéke egyértelmű összefüggést mutat a toxikus fémtartalommal, tehát a pH az esetek nagy részében megfelelő szennyezettség-jelző indikátor. Jól illeszkedik a pesszimista becslésen alapuló kockázati modellbe, hiszen tágabb körben mérhető alacsony pH, mint toxikus fémtartalom, mert nem minden szulfidos kőzetnek van nagy fémtartalma. Ha ismerjük az összefüggést a szennyezettség és a pH között, akkor a felszíni lefolyások transzportútvonalának azonosítását is lehetővé teszi a pH-mérés, hiszen a lefolyások mentén két okból is csökkent a pH: a talajba szivárgó savas víz miatt és a felszíni víz útvonalán terjedő kénsavtermelő mikroorganizmusok tevékenysége miatt. A pontszerű és diffúz forrásokból szennyezett vízgyűjtő terület pH-térképe alapján lehet következtetni a vízzel történő szennyeződésterjedés útvonalára.

A vízi ökoszisztéma diverzitása, annak negatív irányú eltérése a normális értéktől jól jelezhetné egy felszíni vízi ökoszisztéma károsodását, amennyiben ismernénk a nem szennyezett, egészséges ökoszisztémára jellemző állapotot és értékeket. Ez a feltétel szinte sosem teljesül szennyezett területek esetében, ahol a szennyeződést megelőzően nem volt részletes környezetmonitoring. Ezen a helyzeten is segíthet némiképpen a felszíni vizek terjedési útvonala mentén történő mérés, bizonyos gradiensek azonosítása. A Toka-patak mentén végzett makrozoobenthosz (üledéklakó közösség) diverzitás-vizsgálat érdekes végeredményt adott: a makrozoobenthosz diverzitás-indexe nem a forrásterület felől a településeken át a befogadó fele mutatott minőségi romlást, ahogy az várható egy normális pataknál, hanem fordítva. A diverzitás egészségesebb közösséget mutatott a forrásterülettől távolabbi szakaszokon, melynek oka egyértelműen a forrásterületen található nagymennyiségű pontszerű és diffúz szennyezőanyagforrás, a bányameddő anyagok, hulladék kőzetek, kiömlött, feldolgozatlan érc. A diverzitás index tehát jobban korrelált a toxikus fémszennyezettséggel, mint a kommunális eredetű szennyezettséggel.

Még egy példát hoznék a Toka-patak vízgyűjtőterületéről. A Toka patak a bányászati hulladékkal diffúzan szennyezett terület felszíni vízgyűjtője, ahol a szennyezettség egy része a vízben oldva terjed, de egy másik tetemes része az erózióval lemosott szilárd fázis. A bányászati hulladék szilárd anyagát szállítja a víz, a patak folyásával terjed mint felszíni vízi üledék és rakódik le az ülepedési zónákban és az öntésterületeken. Az üledék hagyományos kémiai analízise (teljes feltárás utáni AAS vagy IPC-AES) nem vezetett eredményre, az üledékminták teljesen rendszertelen eloszlásban tartalmazták a toxikus fémeket, melyek nem függtek össze a patak ökoszisztémájának károsodottságával és az üledék toxicitásával. Körültekintő vizsgálódás után kiderült, hogy az eredeti helyszínről elszállított szilárd hulladék az üledék körülményeitől függően (redoxpotenciál, pH, szemcseméret, stb.) a legkülönbözőbb mértékben voltak biológiailag hozzáférhetőek. Szekvenciális extrakciót végezve sem tisztult ki a kép, nem találtunk gradienseket a patak mentén, nem lehetett előrejelezni a kockázatokat. Végül a legegyszerűbb és legolcsóbb laboratóriumi toxicitási teszt adta a legtöbb információt. A direkt érintkeztetési bakteriális teszt egyértelműen megadta, hogy mely üledékeknek van akut toxicitása. A pataküledék toxicitás-térképe alapján találtuk meg a forró pontokat, azonosítottuk a legszennyezettebb bányászati hulladéklerakatokat (Gruiz, 1995)

A légifotók, a távérzékelés, a hiperspektrális kiértékelés lehetővé teszi, hogy nagy területeken, teljes vízgyűjtőkön, kövessük a szennyezőanyag transzportját. A hiperspektrális kiértékelés képes azonosítani a növényzetben bekövetkezett anomáliákat (sűrűség, fajeloszlás, színanyag-termelés, illetve tartalom), a talaj, illetve a borítatlan felszín ásványi összetételében jelentkező eltéréseket és a hőmérsékletben jelentkező különbségeket, illetve ezeket együttesen. A növényekben és a felszínen mérhető geokémiai spektrális anomáliák korai figyelmeztető rendszerként hívják fel a figyelmet a szennyezettségre és annak terjedésére. Az idősorokból a terjedés sebességét, illetve mértékét is megbecsülhetjük.

Távérzékeléshez felhasználhatjuk a repülőgépről, a műholdról vagy űrhajóról készült képeket. A látható fényen kívül más nem látható frekvenciákat is érzékelhetünk, így hősugarakat és mikrohullámot is. A legismertebb távérzékeléssel fogott jelek biológiai és biofizikai jelek valamint a felszín borítottságával függenek össze. Bármilyen gyakran ismételtető, környezetmonitoringra ideális eszköz, annak ellenére, hogy vannak korlátai: felhős idő, szükséges korrekciók a távolság és a Föld alakja miatt, felbontás, interpretációs problémák, stb.

Tehát a hiperspektrális távérzékelés lényege, hogy egy hiperspektrális képből ki tudja válogatni a keresett, ismert spektrumú anyagot, térképszerűen megmutatni annak jelenlétét, pl. bizonyos növényfajtaikat, kőzeteket, ásványokat, hulladéklerakatokat, szennyezőanyagokat, toxikus fémeket, stb.

### ***Receptor környezeti elemekben (befogadó) alkalmazható indikátorok és módszerek***

Ha nem ismerjük a forrást, illegális lerakat, régi elhagyott terület, diffúz források ismeretlen transzportútvonalakkal, stb. nincs is más lehetőségünk, mint a receptor környezeti elem vizsgálata. Még ha ismert is a vegyi anyag és bizonyos mértékig a terjedés útvonala, akkor is nehézségeket okozhat a hígulás, az igen kis koncentrációk a vegyi anyag direkt analizálásában. Ebből következik, hogy itt már kisebb jelentősége van a vegyi-anyag fizikai-kémiai analitikai kimutatásának, viszont nagy a biológiai és ökoszisztéma jellemzők szerepe.

A felszíni és a felszín alatti vizek, mint befogadók olyan esetekben megfelelő megfigyelőpontjai a vízgyűjtőszintű környezeti problémáknak, ha sem a forrás (pl. diffúz), sem a transzportútvonalak nem azonosíthatóak, nem használhatóak korai figyelmeztetőrendszerek monitoringpontjaként.

A szilárd fázison alapuló környezeti elemek, így a talaj és az üledék heterogenitása miatt közvetlenül kevésbé alkalmas transzportútvonalak végállomásaként korai figyelmeztetésre, de közvetett módon, a talaj szilárd fázisával egyensúlyt tartó talajnedvesség pórusvíz vagy talajvíz, valamint a talajlevegő vizsgálatából lehet következtetni. Hasonlóképpen fontos közvetett rendszer a növények, azok kémiai jellemzői (bioakkumuláció és annak genetikai biokémiai alapjai), a tűrőképesség, biológiai lebontóképesség (rizoszféra) valamint a bioakkumuláció megjelenése. Hasonlóképpen fontos szerepet játszik a növényi fajeloszlás, mely főként a talaj állapotára (de tulajdonképpen a levegő és a csapadék minőségére is) felvilágosítást ad és korai figyelmeztető rendszerként is alkalmazható.

A környezeti elemek minőségének, illetve kockázatának mérése, előrejelzése a környezeti elem ökoszisztémájának állapotán, reakcióin keresztül történhet. Amint azt már korábban tárgyaltuk, a bioindikátorokkal végzett felmérés vagy monitoring alkalmazhat passzív vagy aktív biomonitort, vagyis a biomonitort folyhat öshonos egyedek segítségével vagy mesterségesen, kontrollált körülmények között létrehozott szinkronizált rendszerekkel.

Mikroorganizmusok esetében vagy a fajeloszlást vizsgáljuk vagy a hagyományos aktivitási és biokémiai markereket, lehetőleg elektromos jellel alakítva, jellemző módon egy elektróda jellegű bioszenzorba épített rendszer segítségével.



### ***Környezeti elemekben elhelyezett szenzorok***

Gyakran a végbefogadók (Balaton, nagyobb patakok, stb.), tehát érzékeny felszíni vizek monitorozására kényszerülünk, vagyis a transzportmodellünk végpontjában (X3) történő monitorozásra, vagyis a forrástól messzi ponton történő megfigyelésre. Ha a korai figyelmeztető rendszert a receptor környezeti elembe kell helyezni, a forrástól távoli helyen, azzal rontjuk a figyelmeztető rendszer érzékenységét és hatékonyságát, a szennyezőforrásból eredő kockázathoz egy sor más, földrajzi, klimatikus, ökoszisztéma hatás és heterogenitás adódik, vagyis nagy lesz a zavaró jelek mérete, a zaj szintje, tehát egyre nehezebb lesz olyan szelektív indikátort találni, mely a kockázatos vegyi anyag koncentrációját vagy káros következményeit jelzi. A kémiai indikátorok alkalmazása gyakran nem vezet sikerre a szennyeződés periodikus, alkalmi megjelenése és a nem folytonos mérési metodika miatt. Természetesen ezen is lehetne javítani folyamatosan működő szenzorok beépítésével és távjelek regisztrálásával. Az Aqua-Concorde által kifejlesztett és a MOKKA projektben értékelt **nehézfém mérő monitorral (ELCAD) megoldható a folyamatos mérés**, ezzel sokszorosára lehet növelni az érzékenységet, hiszen minimális időtartam erejéig megjelenő jelet (fémkoncentrációt) is képes venni, sőt integrált kibocsátások mérésére is alkalmas. Az integrált kibocsátási jelek a koncentráció mérése helyett az összes kibocsátott anyagmennyiség meghatározását teszik lehetővé, ami közvetlen kockázatfelmérést és a terület távolabbi pontjaira is pontos modellezést tesz lehetővé.

Az eredetileg szennyvizek monitorozására fejlesztett készülék, melynek mérési elve elektrolit-katódos, atmoszférikus nyomású ködfénykislülés (ELCAD) spektrometria, mérési paramétereit alapján alkalmas arra, hogy a csatornabefolyások közelében telepítve a felszíni vizek elszennyeződésére figyelmeztessen (Mezei és Cserfalvi 2007). A toxikus fémek, melyekre érzékeny: Zn, Cd, Cu, Ni, Pb és Cr tipikus szennyezőanyagok az ipari kibocsátásokban, ezek monitorozása a korai figyelmeztető rendszerek alapvető feladata. A mérési gyakoriság beállítása a várható veszély nagyságától függő mértékben lehet akár 10 perc, célszerűen 1-2 óra. Az eredményeket egy központi adatgyűjtő állomáson folyamatosan értékelve meghozhatók a szükséges intézkedések (kimagasló szennyeződés esetén a csatornabefolyás lezárása).

Tudjuk, hogy Magyarországon a szennyvizek jelentős része legfeljebb mechanikai tisztításon esik át, gyakorlatilag kezeletlenül kerül vissza a felszíni vizekbe. A megfelelően kihelyezett ELCAD monitorok, mint korai figyelmeztető rendszerek adatai alapján megakadályozhatók az ellenőrzés lazaságát (mintavétel a laboratóriumi mérések számára kizárólag munkaidőben) kihasználó ipari kibocsátások okozta környezeti károk.

### **Biológiai indikátorok**

Nagyobb esélyük van a kockázat korai jelzésére a szagot behatásra is folyamatos választ adó biológiai rendszereknek. Természetesen, elsősorban az érzékeny és szelektív rendszerek jönnek szóba. Sajnos az érzékeny jelzés ellenére a zaj, az additív hatások rontják az ok azonosításának biztonságát és a környezetmenedzsment beavatkozási lehetőségeit. Ha nagyon sok kis forrásból (műtrágyázás, peszticidek alkalmazása), diffúz (kémény, pernye, kipufogógáz) forrásból vagy azonosítatlan forrásokból származik a szennyezőanyag, akkor a korai figyelmeztető rendszer eredménye csak azt mutatja, hogy baj van, de nem ad felvilágosítást a teendőkre, tehát nem hatékony, főként nem költséghatékony, hiszen a baj okát még ezután kell majd azonosítani és az intézkedés nem képes céltudatos lenni. Ha nem tudjuk azonosítani az okot (forrást), akkor feleslegesen korlátozzuk pl. az egész vízgyűjtő területen a növényvédőszer, a műtrágya vagy más létfontosságú vegyi anyagok alkalmazását.

Fenti példából látható, hogy a megfelelő korai figyelmeztető rendszer tervezése egy olyan optimálási feladat, ahol az érzékenység és a szelektivitás optimumán kell dolgoznunk. A

tervezéshez jó minőségű statisztikai adatok és multiparaméteres statisztikai módszerekkel kapott valószínűségi sávok ismerete szükséges.

Tehát nem elég megmondani, érzékelni, kimutatni, hogy baj van, (bár ez is előrelépés), pusztul egy-egy érzékeny faj, megváltozik a fajeloszlás, romlik az anyagcsere, a hozam az ökoszisztémában, stb. de a mért jelnek azt is meg kéne mondania, hogy mi a baj oka. Ok-szelektív szenzorok kellene, ezzel javítható a megfeleltetés, a metodika statisztikája és a beavatkozás céltudatossága. Ez az ok-szelektivitás jelentheti magának a vegyi anyagnak a szelektív kimutatását vagy a vegyi anyag közvetett hatásainak, következményeinek a kimutatását. A biológiai válaszok között is több szelektív válasz ismert, hiszen a sejtek és a szervezetek anyagcseréjükkel sok esetben teljesen szelektíven válaszolnak, pl. egyes fémekkel szembeni rezisztencia, vagy speciális biodegradációs vagy kometabolikus képesség.

Sokat javíthatnak a helyzeten a kumuláló típusú bioindikátorok, például a bioakkumulációra vagy biokoncentrációra képes indikátorfajok, akár passzív, akár aktív monitoring formájában. A folyóvizek és tavak toxikus fémszennyezettségének felmérésére a helyhez kötött növények a legalkalmasabbak. Azok, amelyek gyökerekkel az üledékhez rögzülnek még több esélyük van a bioakkumulációra, és az üledék fémtartalmának jelzésére. Ilyen vízinövény a *Potamogeton pectinatus*, vagyis a fésűs békaszőlő. Több kutató, pl. [Whitton és mtsai \(1981\)](#) vagy a magyar Kovács és Podani (1986) kutatásai bizonyították ezeknek a vízi növényeknek korai figyelemető indikátorként való hasznosíthatóságát Angliában és Magyarországon. A toxikus fémek közül kiemelkedően akkumulálja az ólmot, a krómot, a nikkelt, az ezüstöt, a kobaltot és a kadmiumot.

Felszíni vizek korai figyelmeztetői lehetnek a nagy érzékenységet mutató kagylók. A kagylók felhasználásával két technikát említünk meg. Az egyik [Oertel Nándor \(2000\)](#) által kifejlesztett, és kutatócsoportunk egyik kutatási projektjében Duna üledékmonitoringjára alkalmazott ketreces technika, tulajdonképpen egy aktív biomonitoring módszer ([Grúiz és mtsai, Duna cikk](#)), melynek lényege az, hogy kontrollált körülmények között felnevelt *Dreissena polymorpha* szinkron-tenyészetet átfolyósos ketrecekbe zárva helyezük az üledékes zónákba és egyéb, szennyezettség szempontjából forró pontokba. A kagylókat bizonyos idő után visszagyűjtjük és vizsgáljuk az állatok állapotát, növekedését és az akkumulált fémmennyiséget.

### ***Biomonitorok elhelyezése és a korai figyelmeztetés koncepciója***

A vízi élőlényekkel kialakított korai figyelmeztető rendszerek esetében különösen fontos a mérőállomás elhelyezkedése. Mivel a vett jel fizikai-kémiai ételemben nem feleltethető meg direkt módon a feltételezett forrásnak, a megfelelő elhelyezéssel javíthatunk a helyzeten, érhetünk el földrajzi, terjedési útvonalnak köszönhető szelektivitást, például ipari kibocsátók, ipari szennyvizek csatornába vagy felszíni vízbe való befolyásánál, kezelt szennyvizek ellenőrzésére felszíni vízbe engedés előtt. Más koncepciót tükröz a vízkivételeknél elhelyezett jelzőrendszer, amely a kivett víz minőségének biztosítását, a vízfogyasztók védelmét célozza. Itt nem okvetlen a forrásra való visszavezetés a fő cél, hanem inkább a nem megfelelő vizek kivételének leállítása.

A mikroorganizmusok igen gyorsan és gyakran szelektíven reagálnak a vizek összetételére, szennyezőanyagaira. A végpontok is igen nagy változatosságot mutatnak, a légzéstől, a redoxpotenciál és a pH megváltoztatásán keresztül enzimek vagy anyagcseretermékek megjelenéséig, melyeket vagy direkte egy cellában lehet mérni vagy a mikroorganizmusokat olyan elektródába lehet beépíteni, amelynek egyik oldala a biológiai jelet szolgáltatja, a másik pedig ezt a jelet elektronikus jellé alakítja. A két oldal együtt alkot egy bioszerzort, vagyis elektromos jelet adó biológiai indikátort. Baktériumokkal és más mikroorganizmusokkal lehet szennyezőanyag-szelektív bioszenzorokat készíteni, ezek hely szerinti elhelyezésekor nem csak a forrásközeleli forró pontokat célozhatjuk meg, hanem inkább a védendő receptorokat. ([hivatkozni a későbbi fejezetre](#)).

A **felszín alatti vizek** korai figyelmeztetés céljából történő monitorozása esetében még nehezebb a helyzet, mert a pontos transzportútvonalak azonosítása nem lehetséges mindig nagy pontossággal. Ha már van korábbi tapasztalat, pl. jellemző módon bizonyos megfigyelőkutakban jelenhet meg a szennyeződés, akkor ezekre támaszkodva lehet KFR-t tervezni.

A **diffúz szennyezettség** káros hatásának indikálására és azt követő intézkedésekre (kockázat csökkentése) más menedzsment eszközök kellenek, ezek eszköztárunkban, az általános, a regionális és a vízgyűjtőszintű környezetmenedzsmenthez állnak közel (3. ábra).

### ***A kagylómonitor és más vízi állatok***

Egy igen ötletes kagylóteszt, a „Kagylómonitor” nevű korai figyelmeztető rendszer azon a megfigyelésen alapul, hogy a kagylók szennyezett vízzel találkozáskor a normálisan nyitott állapothoz képest összezárják kagylóhéjukat, hogy megvédjék magukat a szennyezőanyaggal való találkozástól, illetve, hogy lerövidítsék az érintkezési időt. **Kramer és Foekema (2000)** a kagylóhéj nyitását és zárását a kagylóhéjra illesztett indukciós elektromágneses egységekkel érzékelik és továbbítják a jelet az adatfeldolgozó egységhez, amely akár több kilométer távolságban is lehet. A kagylóhéj normális mozgásához képest megnövekedett frekvenciájú mozgást – megfelelő statisztikai értékelő rendszeren áteresztve a jelet – kapjuk a figyelmeztető jelet: valami probléma van! Természetesen ebből a jelből nem tudjuk még, hogy mi okozza a problémát, mi váltotta ki a kagylók védekező reakcióját. A korai figyelmeztetés megjelenése olyan intézkedés-sorozatot indít, mely a monitorhelyről vett minták toxikológiai tesztelését és/vagy kémiai analízisét, valamint a forrás azonosítását követően jut el a kockázatcsökkentő beavatkozásig.

A Kagylómonitorban az érzékelő maga a kagyló. A kagyló észleli a szennyeződést és jelenlétére normál viselkedésének megváltozásával reagál. Normál körülmények között a kagyló héja körülbelül 70–80%-ban nyitva van légzés és táplálkozás céljából. A héjak csak alkalmasszerűen záródnak, és rövid idő után ismét kinyílnak. A kagylóhéj különféle mozgásmintázatokat mutat, amely a szennyezettség típusára jellemző és a szennyező anyag koncentrációjával arányos. Ezek a mozgások lehetnek:

- Kagylóhéj-zárás (rövidebb-hosszabb ideig tartó zárt állapot)
- Aktivitás növekedés (az időegységre eső kagylóhéj nyitások-zárások gyakorisága nő meg)
- Csökkent átlagos aktivitás (a normál nyitottsági állapothoz képest)
- A kagylóhéj teljes és végleges nyitott állapota (a kagyló pusztulása esetén)

A kagylók viselkedésének mérése, illetve kiértékelése egyénileg történik, ami azt jelenti, hogy minden kagyló viselkedését a saját korábbi viselkedéséhez hasonlítja a rendszer. Mind édesvízi, illetve tengeri kagyló alkalmazható a rendszerben, a legelterjedtebb a vándorkagyló (*Dreissena polymorpha*) illetve az ehető kék kagyló (*Mytilus edulis*). A kagylómonitorban alkalmazott kagylófajok érzékenysége 25–30 gyakori vízszennyező anyagra megtalálható a szakirodalomban és az interneten is (<http://www.mosselfmonitor.nl>).

Mivel a szennyezőanyagokon kívül más is befolyásolhatja a kagylók viselkedését – például a víz hőmérséklete, vagy a pH-érték – így ezeket is számításba kell venni a méréseknél. Ezért a Kagylómonitor hőmérsékleti mérést is végez (<http://www.mosselfmonitor.nl>).

A kagylókon kívül, élő indikátorokként használhatók a halak és a *Daphnia*. A kagyló-ketrecekhez hasonló elvi megoldás azt jelenti, hogy a kontrolláltan felnevelt tenyészetet egy átfolyósos cellában kihelyezik a folyó vagy tó vizébe. A vizsgálandó víztest vize átfolyik a cellán, és folyamatosan érintkezik az állatokkal. Az állatok bármely alkalmas mérési végpontja használható indikátorként: élő egyedszám, mozgásképeség, viselkedés, szaporodás, utódok száma és minősége, stb. A végpontok egy része vizuálisan, például kamerákkal folyamatosan megfigyelhető és automata

értékelő rendszerrel értékelhető. Megfelelő statisztikai analízis után automatikus figyelmeztető jelet kapunk, ha a szórás mértékét meghaladó rendellenességet észlel a rendszer. A halak kopolyúmozgásának frekvenciája és a kagylók héj-nyitvatartása, illetve becsukása ilyen, viszonylag könnyen értékelhető végpontok.

A *Tubificidae* család tagjai olyan vízi élőlények, melyek előfordulása elsősorban szerves szennyezőanyagokkal szennyezett vizekben jellemző. Testük egyik fele mindig az üledékbe fúródik, míg a másik végük a vízben úszik. Bizonyos szennyezőanyagok jelenlétében testük nagy részét visszahúzzák, belefúrják az üledékbe. Ez a menekülő viselkedés a szennyezőanyag koncentrációjával arányos. A visszahúzódás vizuálisan követhető és videokamerával is megfigyelhető. Digitális képanalízáló rendszerekkel mennyiségileg is elemezhető és értékelhető. Az első mérések alapján Leynena és mtsai. (1999) arra a következtetésre jutottak, hogy a Tubifex mozgás/viselkedése reprodukálható és mozgásának követése és értékelése alapján korai figyelmeztető rendszer fejleszthető ki.

### **Fizikai-kémiai módszerek korai figyelmeztető rendszerként**

Vízben és nedves közegben pH és redox-érzékelők, vezetőképesség-mérők, vegyianyag-szelektív, nagy érzékenységű szenzorok és ezek kombinálása *in situ* szennyezőanyag-specifikus dúsítással, koncentrációnöveléssel, pl. oldhatóságon, szorbeálódóképességen, emulzióképződésen, mikrokapszuláláson, kémiai reakciókon vagy nanotechnológián alapuló módszerekkel. Saját fejlesztéseink, a fém-koncentráció mérő szenzor, a pH és redoxszenzor valamint a ciklodextrin alapú környezetanalitikai technikák megfelelő elhelyezés és kiértékelés esetén korai figyelmeztető rendszerként használhatóak.

A távérzékelés és a hiperspektrális képek képzése és értékelése az egyik legígéretesebb technika ezen a területen. A képek felbontásától függően a távérzékelő rendszer korai figyelmeztető rendszerként használható.

Említésre méltóak a mikroelektródok vagy mikroszenzorok, melyek például a talaj mikroszerkezetében bekövetkező változásokat képesek mérni, akár fizikai-kémiai akár biológiai jelek elektromos jellé alakítása révén. Például talajba, a túrhetőség határára (ahol még  $RQ < 1$  érték a kockázat: például egy gyárterület határán) elhelyezett mikroszenzorral akár mm felbontással érzékelhető a szennyezettség.

### **Biológiai és környezetttoxikológiai módszerek szennyezőanyagok hatásának kimutatására**

A korábbi osztályozásból kiderült, hogy bizonyos esetekben a szennyezőanyag kimutatása nem a direkt jelenlétén, hanem a hatásán alapul. Ezeknek a hatásoknak nagyobb az információtartalmuk, például olyan esetekben, amikor igen kis koncentrációban is nagyon hatásos a szennyezőanyag, tehát analitikai kimutatása nem lehetséges, hatása, viszont igen. Ennek szélsőséges esete, az akut hatást nem mutató szennyezőanyag hosszú idő alatti, vagyis krónikus káros hatása. A hatás mérésére vagyunk utalva kor is, ha a szennyezőanyag szinergista, egymagában nem hat, de más anyagokkal, körülményekkel együtt megjelenik a káros hatása. Több szennyezőanyag együttes hatása, a környezetben való aktiválódása szintén gyakori és kockázatos esetek, ahol a kémiai analitikával nem sokra megyünk egymagában.

Az ideális megoldás az, amikor integráltan alkalmazzuk a fizikai-kémiai és a biológiai valamint a környezetttoxikológiai módszereket, mert a párhuzamos adatsorok megkönnyítik az interpretációt.

A környezetttoxikológiai módszerek sokfélék lehetnek, az ökoszisztéma károsodásának direkt mérésétől a un. biológiai modellek alkalmazásáig, amikor is az ökoszisztémát reprezentáló fajokkal végezzük el a káros hatás mérését és azokból az eredményekből extrapolálunk a teljes ökoszisztémára. Ha standard reprezentánsokat alkalmazunk, akkor összehasonlítható eredményeket

kapunk eltérő területekre is. Ugyanakkor nem biztos, hogy ezek a tesztorganizmusok egyformán reprezentálják a különböző területek ökoszisztémáját (egyedi érzékenység, adaptáció, stb.). A MOKKA Projektben kifejlesztett módszereket az utolsó fejezetben értékeljük aszerint, hogy lehet-e őket korai figyelmeztető rendszerként alkalmazni.

Az in situ biomonitoringhoz felhasznált élőlényeket zárt ketrecbe (levegő monitorozás), átfolyós cellákba, kosarakba, ketrecekbe (víz esetében), vagy a tesztorganizmus számára minden oldalról átjárhatatlan talajszelvénybe tesszük és a rajtuk végbemenő változásokat figyeljük meg, vagy hagyjuk őket nyitott rendszerben és olyankor a menekülésük sebességét figyeljük vagy mérjük, esetleg a kettőt kombinálhatjuk is.

A biomonitoring másik fajtája, hogy a megfelelő ponton vett mintát vetjük alá környezettoxikológiai tesztelésnek, laboratóriumi tesztek segítségével. Míg az in situ biomonitoring nagyobb környezeti realitással bír, addig a laboratóriumi biotesztek reprodukálhatósága jobb, a döntést egyik vagy másik mellett mindig a konkrét probléma mérlegelése hozza meg.

### ***Bioindikátorok, bioszenzorok, mikropróbák***

Fejlődésben lévő mikrobiológiai módszerek ezek, amelyek a mikrobiológiai közösségek és a közösség egyes tagjainak vizsgálatára alkalmasak egy komplex mátrixban. Az új technikák közül említésre méltóak a DNS technikák, a PCR, a DNS hibridizáció, pl. fluoreszcens in situ hibridizáció (FISH). Ezeknek a módszereknek jelentős hátrányai vannak, például, hogy a DNS-t ki kell nyerni mindenféle bonyolult mátrixból, hogy a módszer időigényes, eltelik jó néhány óra, mire eredmény születik és ma még a költsége is meghaladja a hagyományos analitikai módszerek költségét.

A nem-destruktív, in situ, real-time mérési módszerek alkalmazásával a mikrobaközösség működésének részleteit figyelhetjük meg, munka közben. A mérés milliméter alatti dimenziókban történik.

A bioszenzorok az elektronika és a biológiai rendszerek ötvözéséből született analitikai eszközök: a vízben vagy a talajban mért biológiai jeleket elektromos jellé alakítják. A genetikai bioindikátorok (bioreporter gének) olyan gének, amelyek könnyen kimutatható termékeket hoznak létre, vagyis feltételes működésükkel növelik a szelektivitást és felnagyítják a jelet. A mikropróbák és mikroelektrodák elsősorban a talaj és más szilárd fázisú minták milliméter alatti tereiben képesek az élőhely vagy az ökoszisztéma jellemzőit mérni, például a pH-t, hőmérsékletet, a kloridion-koncentrációt, az oldott oxigénkoncentrációt. Leírtak mikropróbákat a talaj redoxrendszerének jellemzésére, így ammónium, nitrát, oxigén, denitrifikáció nitrogénoxidok mérésén keresztül, szulfát-redukció detektálására.

Az egyik legjobban mérhető végpont a fény, a látható vagy fluoreszcens fény, ezért a legelterjedtebb bioreporter gének a fénykibocsátásért felelős gének, illetve a GFP, a zöld fluoreszcenciáért felelős gén, melyek szelektíven érzékeny mikroorganizmusokba építve, fényérzékelő bioszenzor részeként real-time módon jelzik a mikroorganizmus károsodását a csökkent fénykibocsátás alapján.

A *Vibrio fischeri* vagy a *Vibrio harveyi* lux génjét, mely egy mindössze 7 kb (kilobázis) nagyságú gén, bármilyen szelektív érzékenységű mikroorganizmusba beépíthetik. Az intakt luxCDABE gén a jól ismert pUCD615-ös klónozó vektorra építve kapható, melynek segítségével bármilyen gazda promotere után beépíthető. A tesztorganizmus által kibocsátott fény ismert mérési elveken alapuló ismert mérőműszerekkel mérhető, így luminométerrel, folyadékszintillációs detektorral, fotoelektronsokszorozó alkalmazásával, akár száloptikával.

Az *Aequorea victoria* medúzafajból kinyert GFP (green fluorescent protein) gén akár prokariótába, akár eukariótába beépíthető és a gazda könnyen detektálható, erős zöld fény kibocsátását

eredményezi. Bizonyos korallokból is izoláltak, specifikus hullámhossz kibocsátásáért felelős géneket, melyekkel még a GFP-nél intenzívebb fénykibocsátást remélnek.

A lux génen és a GFP-n kívül még egy sor reporter gén környezetvédelmi felhasználásáról tesz említést a szakirodalom, itt csak felsorolom ezeket: lacZ (béta-galaktózidáz), gusA (béta-glükuronidáz), xylE (catechol-2,3-oxigenáz), inaZ (*Pseudomonas syringae* membrán-fehérje INA aktivitással = ice nucleation activity, ami azt jelenti, hogy a túlűtött vizet kristályosodásra készíti).

Az INA-gén kifejeződését a vízcsepp-megfagyási teszttel lehet egyszerűen kimutatni.

### ***Biológiai és géntechnikai módszerek a faji diverzitás jellemzésére és fajok kimutatására***

A vízi és a szárazföldi ökoszisztémák nagy flexibilitással igyekeznek alkalmazkodni a környezet adottságaihoz, a klimatikus viszonyokhoz, az évszakokhoz, a szennyezőanyagokhoz. A fajeloszlás változásait az okozza, hogy a szennyezőanyagra érzékeny fajok visszaszorulnak, elpusztulnak, kihalnak, míg a szennyezőanyagot tűró vagy hasznosítani képes fajok előnybe kerülnek, elszaporodnak, relatív mennyiségük megnő a közösségben. Mivel egyes fajok a szennyezőanyaggal való együttélésért felelős hasznos géneket tartalmaznak, ezek a gének a szennyezett terület közösségében értelemszerűen elszaporodnak, nemcsak a faj egyedszámának relatív növekedése által, de más mechanizmusok, például a horizontális géntranszfer által is. A víz és a talaj mikroflórájának diverzitása földi ökológiai trendként is folyamatosan nő, a szennyezőanyagok ha helyileg pusztítanak is, de összességében provokálják újabb gének kialakulását és addig szükségtelen gének elszaporodását a metagenomban (gének összessége egy közösségben), a gének mennyisége és információtartalma tehát fokozatosan növekszik.

Alapvetően kétféle koncepció használható egy környezeti elem, egy bonyolult élőhely ökoszisztémájának vizsgálatára.

Az egyik koncepció szerint a teljes közösséghez, pl. a talajmikroflórához tartozó összes gént, génterméket vagy génaktivitást vizsgáljuk, tekintet nélkül arra, hogy melyik faj genomjának része. Ez a vizsgálat történhet a DNS szintjén DNS-chipek, real-time PCR segítségével, vagy géntermékek (általában enzimek), illetve azok metabolikus aktivitásának mérésén keresztül (a közösség tápanyaghasznosítási patternjei), például cukorhasznosítási pattern BIOLOG módszerrel, stb. Mindkét esetben a közösség jellemzése a cél és statisztikai kiértékelés szükséges az eredmények helyes interpretációjához. Korai figyelmeztetőrendszerként akkor alkalmazható, ha a káros hatások statisztikailag elkülöníthetőek a szezonális és klimatikus eltérésektől.

A másik koncepció azon alapul, hogy a várható vagy megfigyelni kívánt káros hatás következményeképpen szelektíve megjelenő egyetlen gént, ennek a génnek a termékét, vagy a géntermék következtében előálló anyagcsereterméket, esetleg a gén tulajdonosát mutatjuk ki. Ilyenkor minél szelektívebb módszert alkalmazunk, például DNS hibridizációt, fluoreszcens in situ hibridizációt, vagy PCR-t. Ha kimutatható a keresett gén, feltételezhető a hatás vagyis a káros anyag/ágens jelenléte.

### ***Molekuláris módszerek a diverzitás jellemzésére és egyes fajok kimutatására***

A molekuláris módszerek önmagukban is szelektívek és érzékenyek, a kimutathatóság érzékenységnövelő, detektálást könnyítő jelzések alkalmazásával még tovább növelhető. Az egyik legelterjedtebb technika, a PCR (polimeráz-láncreakció) maga is sokszorozás utáni kimutatáson alapul. Újabb fejlesztések még tovább növelhetik az érzékenységet és lehetőség van kvantitatív géntechnikai módszereken alapuló mérésekre is, amik további előrelépést jelenthetnek a korai figyelmeztető rendszerek kidolgozásában. A veszélyes algavirágzás példáján szeretném bemutatni, hogy a molekuláris módszerek milyen széles választéka áll ma már rendelkezésünkre egy ismert

veszélyes faj, vagy egyáltalán egy élőlényközösség fajeloszlásának vizsgálatára. Mindazonáltal hangsúlyozni kívánom, hogy ezek alkalmazása drága és nem is túl gyors, és mivel a receptor szinten, tehát a forrástól távoli helyen helyezzük el a korai figyelmeztető rendszert, alkalmazásuk csak akkor indokolt, ha a forráshoz közelebbi monitoring-pontot nem tudunk kijelölni vagy ha a káros faj megjelenése a prioritást élvező káros hatás.

### ***HAB (Harmful Algal Blooms = veszélyes algavirágzás) korai kimutatása***

A felszíni vizek, tavak, tengerek egyik tipikus környezeti problémája az algavirágzás. Ennek oka a vízgyűjtőterületen felhasznált és az esővíz által a felszíni állóvizekbe mosott oldott és erózióval odaszállított, szilárd fázishoz kötött tápanyagfelesleg (elsősorban P és N). Azon felül, hogy algavirágzáskor elfogy a felszíni vizek oxigéntartaléka és a vizek anoxikusak lesznek és ezzel a vízi ökoszisztéma aerob tagjai veszélybe kerülnek, a fitoplankton fajeloszlásának káros megváltozásához is vezetnek. A káros algák között vannak olyanok, amelyek a halakra veszélyes toxinokat termelnek, ezzel veszélyeztetik a halállomány és gyakran más vízi állatok egészségét. Az állóvizek káros fitoplanktonjának korai detektálását újabban molekuláris módszerekkel oldják meg, mert a hagyományos izolálás utáni tenyésztés nem alkalmas technika, hiszen morfológiai és tenyésztésbeli eltérések nem elegendőek a hasznos és káros fajok megkülönböztetésére. Halgazdaságok, halastavak és haltenyésztésre használt természetes vizek esetében is használható technikák ezek (Litaker és Tester, 2002)

A káros algák vizsgálatánál szinte minden molekuláris módszert bevetettek már, és szép példákat találunk valamennyi géntechnikára, ezért ezzel demonstráljuk a géntechnikák bevonulását a korai figyelmeztető rendszerek sorába.

***FISH:*** in situ hibridizáció fluoreszcens jelzéssel a káros mikroorganizmusok, pl. algák specifikus génjeinek kimutatására és fluoreszcens mikroszkópon láthatóvá tételére szolgál. A fluoreszcencia-mérést kombinálják sejtszám-méréssel (átfolyós sejtszám-mérés), így a káros fajok egyedszámát, illetve arányát is meg tudják határozni.

***Szendvics hibridizáció:*** a FISH olyan változata, ahol a sejtek helyett közvetlenül a vízből izolált RNS-t vagy DNS-t vizsgálják. Szilárd hordozóhoz kötik a nukleinsav-próbát, mely megköti a kimutatandó mikroorganizmus csak rá jellemző nukleinsavát. Ezután a szilárd hordozót a megkötött célnukleotiddal együtt összehozzák a jelzett próbával, amely a kimutatandó génnel hozzáköt a komplexhez. A jelzett próba felesleget lemoszák. A maradék, vagyis a szendvics, mely áll a hordozóból, a kimutatandó nukleinsav és jelzett próba komplexből, mennyiségarányosan fluoreszkál. Fluoreszcens jelölés helyett használhatnak biotint, avidint vagy aktív enzimet (ELISA) is. Egy másik eljárásban a szendvics hibridizáció egy mérgező alga (*Pseudo-Nitzschia*) által termelt halméreg (domoic acid = domoinsav) génjének kimutatását szolgálja. Ennek rokona emberre és fókákra is veszélyes toxint termel. A biotoxin monitoring program ezeknek a veszélyes algáknak a megjelenését igyekszik érzékeny géntechnikákkal a lehető legkorábban kimutatni.

***Antitestet és lektint alkalmazó bioteszt:*** jelzett monoklonális és poliklonális antitesteket kiterjedten alkalmaznak egyedi fehérjék immunfluoreszcenciás kimutatására. Fitoplankton immunfluoreszcenciás festésére is használhatóak a jelzett antitesteket. Az egyik probléma, hogy az intenzíven növekvő sejtek felületén sokkal több az antitesttel reagáló aktív hely, mint a nyugvó sejtek esetében, ezért a nyugvó sejtek kimutatása nem mindig sikeres. Lektinokkal sikeresen mutatták ki a toxint termelő fajokat, mert egyes sejtfalkomponensek jobban kötik a lektineket és a szénhidrátokat, mint az antitesteket. A lektinek jól jelölhetőek és segítségükkel könnyen kimutathatóak a toxikus algafajok.

***PCR:*** egyes létfenntartáshoz alapvető („housekeeping”) gének szintén faj-specifikusak a mikroorganizmusok, így az algák körében is. Ezeket PCR-rel (polimeráz-lánreakció) meg lehet találni és kimutatni. Nem csak a fajokat, de a veszélyes toxinok termeléséért felelős géneket is ki

lehet mutatni mikroorganizmusok keverékéből. Mennyiségi meghatározáshoz szpájkolást (belső standard addíciót) alkalmaznak. Ez valódi korai figyelmeztető rendszer, hiszen már néhány káros sejt is kimutatható a fitoplankton közösségben.

**Kvantitatív PCR:** a relatív gyakoriságot méri, mely egy toxint termelő faj vagy törzs jelenléte esetében alapvető információ lehet, gyakorlatilag korai figyelmeztető rendszerként funkcionál és segít megérteni az algavirágzás mechanizmusát és dinamikáját.

**Kvantitatív kompetitív PCR:** a vizsgálandó DNS-t öt részre osztják és ezekhez növekvő koncentrációjú módosított templátot adnak referenciaként. Ez a módosított referencia-templát rövidebb vagy hosszabb, mint a keresett szekvencia, tehát egy második sávként jelenik meg a gélen. Ennek intenzitását hasonlítják a megsokszorozott keresett gén intenzitásához, így válik a módszer kvantitatívvá.

**Kvantitatív RT-PCR:** a káros gének, így az algák toxin-génjének kimutatására aktív átírással bíró sejteken keresztül kerül sor. Ehhez az m-RNS-t kell kvantitatíve kimutatni. Ehhez reverz-transzkriptázt alkalmazó PCR-t használnak. A reverz transzkriptáz által átírt DNS-t használják a kvantitatív PCR-hez templátként. Vagyis ennek a mennyiségétől, vagyis az átírás mértékétől fog függeni a PCR termék mennyisége.

**RFLP:** speciális DNS szekvenciák meglétét vagy hiányát lehet kimutatni restrikciós endonukleázos emésztés után kapott fragmentek hosszúságának összehasonlításával. Egy mutáció által tönkrített restrikciós endonukleázos felismerési hely hosszabb (enzim által elvágatlan) fragmentet eredményez. Toxikus és nem toxikus fajok megkülönböztetésére alkalmazták ezt a módszert.

**Elektrokémiai detektálás:** A szendvics hibridizációt tovább fejlesztették úgy, hogy a hibridizált szendvicset egy speciális NeutrAvidinnel bevont elektródára helyezik. Antifluoreszcens antitesttel konjugált tormaperoxidázt kapcsolnak a reporter génhez, majd az egészet leöntik hidrogén-peroxiddal. Ezzel megindul egy többlépcsős elektronlanc transzport-folyamat: a tormaperoxidáz oxidálódik, ez elektronokat vesz fel a szendvicshez felhasznált elektron-transzfer-közvetítőből, mely oxidálódik és elektronokat vesz fel az elektródból, mely áramot hoz létre. Ezt mérik.

**DNS array és DNS chip:** A DNS-array célszerűen összeválogatott egyszálú DNS molekulák keveréke, precízen, egy üveg vagy hibridizációs membrán felületére kötve. Több tízezer DNS molekulát is képesek az erre a célra kifejlesztett speciális automaták egy hüvelykujnyi felületre felrakni. Egy-egy pici pont több millió molekulát is tartalmazhat egy-egy DNS-ből. A DNS-chipeket közvetlenül a chip felszínén szintetizálják, így akár egymillió különféle DNS is megszintetizálható egyetlen chip felületén ún. fotolitográfias módszerrel. Megfelelő pufferoldatban a DNS array és chip foltocskái hibridizálnak a vizsgálandó mintában lévő keresett RNS szekvenciával. A hibridizáció eredménye egy erre a célra kifejlesztett leolvasóba helyezés után értékelhető. A fluoreszcenciásan jelzett RNS hibridizációja lézersugaras kezelés után fotodetektor segítségével mutatható ki a chip felületén. A fényintenzitás az RNS mennyiségével, tehát a vizsgálandó mintában történt génátírás sebességével/intenzitásával arányos.

**RAPD:** A rövidítés az angol Random Amplified Polymorphic DNA kifejezést takarja, ami egy olyan PCR fajta, amely nem igényel előzetes információt egy keresett DNS nukleinsav-szekvenciájáról. Rövid, 8–14 bázispárból álló primereket használnak, melyek random találnak komplementert a vizsgált genomban. Ha a két random talált kapcsolódási hely elég közel van egymáshoz, akkor a köztük lévő teljes DNS szekvencia megszintetizálódik. Átlagban 20–40 különböző random primer eredményez legalább egy olyan PCR terméket, mely egyedeket vagy populációkat összehasonlítva eltérést mutat. Környezeti mintákból kinyert vegyes eredetű DNS-nél nehéz interpretálni az eredményt, tehát inkább csak tiszta fajok vagy egyedek esetében használható összehasonlításra, azonosításra.



**Mikroszatelliták és VNTR lókuszokra alapuló bioteszt:** A populáció-dinamika vizsgálatára alkalmas eszköz. A VNTR (Variable Number of Tandem Repeats) lókuszok olyan rövid DNS-szekvenciák a HAB genomban, melyek többször ismétlődnek, akár 2-től 750-ig is. A VNTR szekvenciák egyedi eltéréseket mutatnak hosszban, így egyedek vagy fajok azonosítására alkalmasak. Restrikciós endonukleázzal kivághatóak a genomból, méret szerint frakcionálhatóak és VNTR-specifikus hibridizációs próbákkal vizsgálhatóak. A mikroszatelliták is ismétlődő kisméretű (100 bázispár alatti) DNS szakaszok. Általában PCR-rel szokták amplifikálni és a fajspecifikus termék alapján azonosítani az ismeretlent.

**AFLP-bioteszt:** Az angol név: Amplified Fragment Length Polymorphism, vagyis ami az AFLP és a PCR kombinációja.

**DGGE-bioteszt:** Denaturing Gradient Gel Electrophoresis= Gradiens denaturáló gélelektroforézisen alapuló tesztet általában komplex ökoszisztémák diverzitásának vizsgálatára alkalmazzák. A technika alapja a vándorlási sebességben észlelhető különbség a lineáris kétszálú DNS, a részlegesen denaturált kétszálú DNS és a teljesen denaturált kétszálú DNS között, ha denaturáló poliakrilamid gélen futtatjuk a DNS-t. Mivel a genom egyes részletei eltérően denaturálódnak, az eltérések jellemző ujjlenyomatokat eredményeznek eltérő fajokból származó genomok futtatása során. A csíkok összehasonlításával azonosíthatóak a konzervatív régiók és a változékonyak, és egy közösség mindössze 1%-ot kitevő tagjára jellemző sávok is megtalálhatóak.

**Heteroduplex módszer:** A DGGE egyfajta kiértékeléséről van szó. Egyes DNS részletek heteroduplexet képesek képezni, melyek gélelektroforéziskor sokkal lassabban futnak a gélen, mint a normális DNS-ek. Ezeknek a lassan futó DNS-eknek megfelelő sávokat értékelik a diverzitás vizsgálatokhoz vagy egyes fajok összehasonlító vizsgálatokhoz.

### **A MOKKA Projektben fejlesztett innovatív módszerek alkalmazása korai figyelmeztetésre**

Ebben a fejezetben a MOKKA Projektben prioritást élvező fizikai-kémiai és biológiai, valamint környezettoxikológiai módszerek alkalmazhatóságát tárgyalom, megadva a korai figyelmeztető rendszerként alkalmazás feltételeit, elhelyezését a kockázati modellben, az érzékenységnövelési és egyéb technikai lehetőségeket.

### **Modellezés**

A modellezés kiemelt fontossággal bír a korai figyelmeztetésben. Már a monitoringpontok és a korai figyelmeztető rendszer tervezése során, később a validálásban és értékelésben. A terjedési modellek a MOKKA projektben egy külön adatbázist tesznek ki. Összegyűjtöttük a legkülönbözőbb scenáriókra alkalmas modelleket. Ezek a modellek a kockázatfelmérés, tehát a kár előrejelzésének a korai figyelmeztetés eszköztárába tartoznak. Természetesen, ahhoz, hogy ezt az eszközt bevehessük, azonosítanunk kell a veszélyt, és el kell döntenünk előzetes kockázatfelmérés alapján, hogy az eszközt bevetjük-e? A modellek között megkülönböztetünk pontforrásból kiinduló terjedés modellezésére alkalmasakat, és a diffúz szennyezettség terjedésének modellezésére alkalmasakat. Pontforrások esetén egyszerűbb a dolgunk, a szennyezőforrás mennyiségi és minőségi jellemzőin, valamint a környezetében megtalálható, vele érintkező környezet jellemzői alapján pontos képet tudunk rajzolni a szennyezőanyag jövőjéről. Diffúz források esetén GIS alapú, vízgyűjtőszintű modellekre kell támaszkodnunk. Ilyenek is léteznek, egyik alkalmazási példánk pontosan a GIS-alapú lefolyási és eróziós modellek alkalmazása előrejelzésre és kockázatcsökkentés tervezésére

### **QSAR (= Quantitative Structure Activity relationship)**

A QSAR a modellezés egy speciális formája, a vegyi anyagok molekulajellemzői alapján jelezzük előre viselkedésüket a környezetben és a hatásukat az ökoszisztéma tagokra, teljes ökoszisztémákra és/vagy az emberre. A QSAR előrejelzésre alkalmas eszköz, a hatások, a környezeti viselkedés

mérésének bizonytalanságát, az egységes, szabványos módszerek hiányát nagymértékben kompenzálhatjuk alkalmazásával.

### ***Távérzékelés***

A távérzékelés a jövő eszköze. Vizuális megfigyelésen alapuló, digitális eszközöket, értékelést, interpretációt alkalmazó módszer. Használhatjuk a Föld egészére, például műholdas megfigyelő rendszerek formájában vagy mikrokörnyezetben, például víz alatti ökoszisztémák mozgásának, morfológiai jellemzőinek megfigyelésér vagy akár mikrokörnyezetben, például a talaj mm alatti biofilmjeinek optikai szálon bevezetett szondái formájában. A hiperspektrális kiértékelés lehetővé teszi, hogy célvegyületek spektrumát azonosítsuk bármilyen digitalizált képben, vagy hogy közösségeknek, ökoszisztémáknak, klimatikus egységeknek megfelelő ujjlenyomatokat azonosítsuk a kép alapján, és a problémától függően a specifikus spektrum meglétét, a jel intenzitását, a határok elmozdulását regisztráljuk. Statisztikai módszerek beiktatásával lehetővé válik a zaj és a korai figyelmeztető jel szétválasztása. A probléma ismeretében kell a figyelmeztető jelzésre beinduló intézkedéssorozatot meghatározni.

Vízi ökoszisztémák megfigyelésére kifejlesztett és szabadalmaztatott eljárások közül kettőt emelnék ki, az egyik a „kagylómonitor”, a másik egy összetettebb elképzelés a vizek össze-organizmusának megfigyelése egy jól körülhatárolt ponton. (Water quality early warning system: United States Patent 4626992, <http://www.freepatentsonline.com/4626992.html>, és a már korábban is említett „Mosselmonitor”, szintén szabadalmaztatott eljárás, <http://www.mosselmonitor.nl/>.

### ***In situ szenzorok***

A környezet folyamatos megfigyelése ad módot arra, hogy a folyamatos érkező jeleket megfelelő érzékelésnek vethessük alá. Az idősorban megjelenő tendenciózus változások, szórás meghaladó kilengések, hirtelen ugrások, illetve ezek mértéke lehet a figyelmeztető jel. A MOKKA Projektben olyan összetett talajszenzort fejlesztettünk, amely **monitormérésre** alkalmas, helyszínre telepíthető, képes a pH, a vezetőképesség, a hőmérséklet és a redox-potenciál egyidejű mérésére. Méréstechnikai megoldása új kontaktus-eljárást alkalmaz a szenzorok és a talaj közötti kapcsolat reprodukálható előállítására, melynek alapelve hidrofíl nem-ionos közvetítőgél alkalmazása a talajfázis és a szenzorfelületek között. Ez a megoldás kedvező a monitor-rendszerű működéshez, amikor a talajba süllyesztett szonda segítségével a talaj állapotában (pl. kibocsátás következtében) beállt változásokat követjük az adott ponton. Megfelelően elhelyezett szenzor tehát korai figyelmeztető rendszer részeként alkalmazható.

### ***Innovatív mintavétel***

A helyi paraméterek, a talaj mélyebb rétegeiben elhelyezkedő, terjedő, átalakuló szennyezettség, a talajban lévő szennyezőanyag megoszlása és annak változása igen fontos korai figyelmeztető jelek lehetnek, mérésük ugyanakkor szinte lehetetlen, mert a fejlődés ebbe az irányba kevéssé haladt előre. A talajnál a legrosszabb a helyzet, hiszen az a legbonyolultabb környezeti elem. A GEOPROBE típusú feltáró eszközök Európában egyáltalán nem terjedtek el, a fázisok közötti megoszlás in situ megfigyelésére egyáltalán nincsenek eszközeink, szinte kizárólag kémiai modellek alapján ítéljük meg a helyzetet, a biodegradációt is csak laboratóriumba szállítás után tudjuk mérni, vizsgálni.

A GEOPROBE megoldása az, hogy egy vékony furaton szondát küld a talaj mélyébe, akár 30 méter mélységig. (Lehet, hogy 150 m) A szonda a talaj mélyéből víz, talaj vagy gázmintát tud venni, és a mintavevő szonda kimenetelére kapcsolt analitikai eszközzel mindjártanalízist is végez. Természetesen tudnunk kell, hogy mit szeretnénk analizálni: pl. klórozott szénhidrogéneket, stb.

Akár a GEOPROBE ellenpólusának is tekinthető a MOKKA projektben kifejlesztés alatt álló egyszerű talaj pórusvíz mintavevő, melynek lényege, hogy nedvszívó, de nem molekulaszűrő anyagot helyezünk a talajba, mely megfelelő talajnedvesség-tartalom esetén magába szívja a pórusvizet annak minden oldott alkotójával. A mintavevő eszköz extrakció nélkül kerül analízisre a beszívott pórusvíz mennyiségének meghatározása után. Ilyen mintavevővel gyorsan és helyspecifikusan határozhatjuk meg a pórusvíz által történő szállítást, a talajvíz, felszín alatti vizek vagy a növények és ezzel a tápláléklánc veszélyeztetettségét, elsősorban szerves szennyezőanyagok, toxikus fémek megoszlását a talaj szilárd fázisa és a pórusvíz között. A nedvszívó mintavevőt akár in situ elhelyezett érzékelővel, például a MOKKA projektben kifejlesztett multiparaméteres pH-, vezetőképesség- és redox-mérővel is össze lehet kapcsolni és az összeállítás segítségével távérzékeltető jelet produkálni. Ezen jelenleg dolgozunk.

### ***In situ mérések***

Az in situ mérések szorosan kapcsolódnak az innovatív mintavételhez. A MOKKA Projekt a toxikus fémek talajban, in situ történő mérését helyezte érdeklődése középpontjába, a hordozható multieleemes XRF-készülék képességeinek, alkalmazási lehetőségeinek bemutatásával. Korai figyelmeztetésben betöltött szerepe a szennyezettség-térképezésben a legnagyobb, de a forró pontok rendszeres monitoringja, az eróziós modell által megmutatott felhalmozódások folyamatos monitoringja is lehetővé válik segítségével. Korainak azért is tekinthető, mert a mérés pillanatában, azonnal eredményt kapunk, nem kell a laboratóriumba szállításra és az analízis elkészültére várunk.

### ***On site mérések***

Az on site mérések az in situ és laboratóriumi mérések kombinációjából jöttek létre, tulajdonképpen leegyszerűsített laboratóriumi mérések helyszínre telepítését jelenti. Hordozható analizátorok, a kivett víz vagy talajminta helyben történő megmérését teszik lehetővé. Korai figyelmeztető rendszerként használható, hiszen a koncepcionális vázlat kockázatfelmérésen alapuló bármely pontján alkalmazhatóak, gyors eredményt adnak. Általában pontosságuk nem éri el a laboratóriumi analízis pontosságát: a tesztesikók, vizuálisan meghatározható színek, a zavaró hatások nem tökéletes kiküszöbölése rontja a mérés jóságát, de az azonnali eredmény kompenzálja, sőt túlkompensálhatja azt. Felszíni vizeknél a pH, vezetőképesség, oldott oxigéntartalom, redoxpotenciál, vizek iontartalma, beleértve a nitrit, nitrát, ammónia, szulfát, nátrium, klorid, toxikus fémek, szerves anyagok IR vagy GC detektálására, stb. mérésére van lehetőség. Talajoknál a talajgáz illóanyag-tartalmának, a talajvíz oldott és felúszó szervesanyag-tartalmának, pH, vezetőképesség, redoxviszonyok, oldott ionok, non-destruktív fémanalízis lehetséges. Újabban biológiai és környezettoxikológiai módszerek on site alkalmazása is terjed, például on site alkalmazható *Vibrio fischeri* lumineszcenciagátlási tesztek fejlesztettek ki spanyol kutatók, ToxScreen<sup>3</sup>-Test Kit néven.

### ***Push-pull technikák***

A push-pull technika provokált, dinamikus mérést lehetővé tevő talajvizsgálati módszer. Megfelelő szondákkal, vagy kommunikáló kutakkal kaphatunk információt a provokált hatásokról. Például egy kút megszívása milyen hidraulikai következményekkel jár a szomszédos kútban, vagy éppen fordítva egy kútba injektált anyag mennyi idő után éri el a szomszédos kút, vagy szondát. A push-pull technikát gyakran a talajremediáció előkészítésére használják. Azt vizsgálják, hogy szondán leküldött adalékanyag kiváltja-e a technológiai alkalmazásban tervezett hatást, például az ORC (oxigene Release Compound) aktiválja-e a mikroflórát, oxidálja-e a szennyezőanyagot, vagy a szondán leküldött koszolvens segíti-e a fekün elhelyezkedő klórozott szénhidrogén-lencse vízbe oldódását, vagy a szulfátredukciót aktiváló adalékanyag leviszi-e a redoxpotenciált a talaj mélyebb

rétegeiben és megindul-e a metanogén baktériumok működése, stb.. Tehát mind fizikai-kémiai, mind pedig biológiai hatásokat, változásokat dinamikus módon tudunk követni segítségével, tehát a hatások, folyamatok időbeli lefolyását, lecsengését is detektálhatjuk, ilyenformán ezek is beilleszthetőek a korai figyelmeztető rendszerek eszköztárába.

### ***Biodegradáció***

A biodegradáció a környezetben nagyon elterjedt képesség, a szennyvizek mikroflórája, talajban élő mikrobiális közösségek szinte minden anyagot megtanulnak hasznosítani, amelyből energia nyerhető. A szennyezőanyagokhoz szokott, adaptálódott mikroflóra szabadítja meg a környezetet a szennyezőanyagoktól, ugyanakkor az adaptációért és a biodegradációért felelős gének, anyagcsere-folyamatok, fajok és közösség-szintű indikátorok nagy része korai figyelmeztető rendszerként is alkalmazható biomarker. Ha a természetes gének és géntermékek nem elég szelektívek, akkor mesterségesen manipulált, riporter-géneket tartalmazó sejtek is segíthetnek egy korai figyelmeztető rendszer kifejlesztésében. Saját fejlesztésű mikrobiológiai eljárásaink az adaptálódott, szelektív bontóképességű mikroflóra tagjainak, enzimjeinek vagy génjeinek kimutatásán alapul: szennyezőanyag-bontó mikroorganizmusok számának meghatározása szelektív táptalajokon, a mikroorganizmus-közösség fiziológiai és anyagcsere-jellemzői alapján, a légzés mértéke, aktiválhatósága. A könnyen biodegradálható szennyezőanyagok hirtelen megjelenésére szinte azonnal reagálnak a mikroorganizmusok, pl. a légzés és a légzési enzimek szintézisének növekedésével, többlet energiatermeléssel és szaporodással.

### ***Bioakkumuláció***

A szennyezőanyagok bioakkumulációja az ökoszisztéma tagjainak védekező mechanizmusához köthető. Az élőlény sejtjeibe, szervezetébe került toxikus anyagot vagy igyekszik kiválasztani (ilyenkor mobilizálja a szennyezőanyagot), vagy oldhatatlan formában „kivonja a forgalomból”, ilyenkor kristályos formában vagy oldhatatlan fehérjékhez kötve vakuólumokban raktározza el (ezzel mentesíti magát a veszélyes anyag hatása alól, de a táplálékláncban felette állókat nem.) Az akkumulált mennyiség sokszorosa lehet élőhelye szennyezőanyag-koncentrációjának, vagyis egy biológiailag felerősített és szelektív jelet mérhetünk. A hiperakkumuláló fajok akár mesterségesen kihelyezett, ún. aktív biomonitorként is alkalmazhatóak. A vízi (algák, makrofiták) és szárazföldi növények fémakkumulációja jól használható szennyeződésterképezésre, szennyeződés lehatárolására, megjelenésének kimutatására, a fémformák (biológiailag hozzáférhető vagy sem) változásának követésére. In situ mérő műszerekkel és hiperspektrális kiértékeléssel modern korai figyelmeztető rendszer fejleszhető a természetes növényzet megfigyelése alapján.. A vízi és szárazföldi állatok között is sok az akkumuláló faj, kagylók, halak szervei vagy kopolyájuk, a földigiliszta, stb. Ezek a szerves és szervetlen szennyezőanyagokat egyaránt akkumulálhatják.

### ***Diverzitás***

A környezet, a vizek, talajok élőlényközösségei nagyfokú faji diverzitást mutatnak. Szinte minden külső változásra a közösséget alkotó fajok egymáshoz viszonyított arányának megváltozásával válaszol, ami a metagenomban is megmutatkozik. Ha ismerjük az összefüggést a várható szennyezettség és egy közösség metagenomjának alakulása között, akkor a diverzitásra vonatkozó genetikai információk és annak biokémiai aktivitás, anyagcsere, viselkedés, stb. következményei, akkor bármilyen végpont segítségével kidolgozhatunk korai figyelmeztető rendszert. Ha a környezetet fémterhelés éri, a felszíni víz vagy talaj közösségében elterjednek a fémtűrésért felelős fajok, illetve gének, ha egy biodegradálható szennyezőanyagnak van kitéve a közösség, elterjed a bontásra képes faj, illetve gén, stb. Természetesen ezek elterjedésével párhuzamosan mások háttérbe szorulnak, megváltozik a fajok egymáshoz viszonyított aránya, amit géntechnikai, biokémiai vagy akár fiziológiai módszerekkel is követhetünk. A MOKKA projekt egyik

alkalmazási példája a Duna üledékének ökoszisztémájában, a makrozoobenthoszban mérhető fajeloszlás-változások összefüggése a vízszennyezettséggel. Egy másik példában fémmel szennyezett és referencialalaj mikroflórájának biokémiai patternjét, tápanyag-hasznosítási újjlenyomatát hasonlítottuk össze és találtunk feltűnő különbségeket (Dobler, et al. 2001).

### ***Káros hatások mérése***

A szennyezőanyagok érzékeny fajokra gyakorolt káros hatása alapján érzékeny korai figyelmeztető rendszer fejleszthető. Forrásközelben, transzportútvonalon, receptor környezeti elemben egyaránt elhelyezhető. Az érzékeny fajok jelenléte genetikai, biokémiai és biológiai módszerekkel egyaránt követhető és a környezeti minták laboratóriumi vizsgálata is könnyen megoldható: laboratóriumi biotesztek. A tesztorganizmusok jó megválasztásával az érzékenységen kívül bizonyos szelektivitás is elérhető, de ha a célunk a kumulált hatások mérése, az is megoldható helyesen megválasztott tesztorganizmus csoporttal (pl. három trófikus szintről választott tesztorganizmus), több bioindikátor (biodegradálható, nem toxikus; biodegradálható, toxikus; adaptálódott: laboratóriumi tesztorganizmusra toxikus, de in situ nem, stb.) vagy mikrokozmosz alkalmazásával (biodegradálhatóság adaptáció előtt és után, stb.).

### ***Korai figyelmeztetésre alkalmas érzékeny fajok***

A biológiai korai figyelmeztető indikátorok helyes megválasztása alapvető a jó minőségű információ szempontjából. Az érzékenység, a szelektivitás, a hatás-integráló válasz, az organizmus és a közeg kölcsönhatása, a fajok egymás közötti munkamegosztása, mind-mind befolyásolja a választ. A korai figyelmeztető rendszerek jósága az irreális mértékben megnövelt mértékű és valószínűségű válaszon múlik. A biológiai alapú korai figyelmeztető rendszerünket tehát a legérzékenyebben reagáló fajokra kell alapoznunk, amelyek a környezetben reális válaszhoz képest sokkal nagyobb jelet adnak: hiperakkumulálnak, érzékenyek a toxicitásra, mutagenitásra, teratogén hatásokra. Fontos, hogy könnyen mérhető és szelektív végpontokat rendelhessünk a jól megválasztott élőlényekhez, pl. természetes lumineszcencia vagy mesterségesen beépített lumineszcencia, fluoreszcencia, stb. A környezetmonitoringhoz javasolt, az egyes ökoszisztémákat jól reprezentáló fajok alkalmazása helyett itt irreálisan nagy válasszal reagáló fajokat alkalmazunk. A MOKKA projektben kifejlesztett és továbbfejlesztett metodikákban a tesztorganizmus kiválasztása, direkt érintkeztetése a környezeti elemmel, a szennyezőanyag hozzáférhetőségét növelő adalékok (ciklodextrin, koszolvenssek, tenzidek, feltárószerek, emésztőnedvek, stb.) mind a hatás-jelé, a tesztorganizmus reakciójának megnövelését célozzák. Ha a teszteljárás során ilyesmit alkalmazunk, azzal veszítünk a környezeti realitásból, de nem lépünk ki a kockázatmenedzsment koncepciónk szerint kötelező pesszimista gondolkodásmódból.

### ***Integrált monitoring***

A környezetmonitoringhoz és a korai figyelmeztető rendszerekhez felhasznált fizikai-kémiai analitikai módszerek gyakran nem adnak reális képet a valódi veszélyről és kockázatról, tehát környezeti realitásuk nem mindig megfelelő. Korai figyelmeztető indikátorként a mérhető koncentráció – főleg konkrét anyag kibocsátásakor a pontforrásban vagy annak közelében vagy a transzportútvonal elején – a lehető legjobb módszer. Dúsító eljárással kombinálva növelhető az érzékenység, optimális pontban in situ elhelyezve és távérzékelőhöz kötve pedig lerövidíthető a mérési eredmény birtoklásához szükséges idő. A kémiai alapon megoldott szelektivitás is igen nagymértékű lehet.

Egy sor toxikus vegyi anyag igen kis koncentrációban is káros hatást mutat, ágensek, láncreakciókban keletkező káros hatású termékek kémiai monitoringja és a kölcsönhatásokból eredő további kockázatok kémiai eredményekből a biológiai rendszerre történő extrapoláció alapján nem oldható meg, ilyenkor az élőlényekre gyakorolt konkrét hatás alapján vehetjük észre a bajt és

mérhetjük annak mértékét. Minél távolabb kerülünk a forrástól, a receptor környezeti elemekben, az élőhelyeken, a transzportútvonalak végén már csökkent értékűek a kémiai módszerek eredményei, interpretálásuk, a belőlük történő következtetések kevésbé elfogadhatóak, itt a főszerepet az élőlények, az érzékeny fajok és közösségek vagy az érzékenyített mesterséges rendszerek játsszák.

Az 1. ábrán bemutatott kockázati modell és korai figyelmeztető rendszer tervezési koncepciója alapján láthatjuk, hogy a forrás és a konkrét receptorszervezet közötti területen nehéz eldönteni, hogy kémiai vagy biológiai jel mérésével lehet-e megfelelő korai figyelmeztető rendszert kiépíteni. Ezen a területen előtérbe kerül a környezeti állapotfelmérés és monitoring módszerekhez általában javasolt integrált szemlélet. A fizikai-kémiai és biológiai-környezetttoxikológiai, esetleg ökológiai módszerek megfelelő arányú kombinációja.

## **Összefoglalás**

Összefoglalásul elmondhatjuk, hogy a korai figyelmeztető rendszerek a modern környezetmenedzsment eszköztárának fontos részét képezik. Koncepciójuk alapja ugyanaz a kockázatközpontú megközelítés, mint a többi környezetmenedzsment elemnél, a veszély és kockázat felmérésénél, a környezetmonitoringnál, a határértékképzésnél, a remediációnál, és szinte minden környezettel kapcsolatos döntésnél és aktivitásnál. A környezeti probléma kockázati modelljének ismeretében a korai figyelmeztető rendszert elhelyezhetjük a forrásban, a terjedési útvonalon vagy receptor-szinten, alkalmazhatunk fizikai-kémiai, biológiai, ökológiai, genetikai módszereket vagy ezek kombinációját, megfigyelhetjük a természetes környezetet, de alkalmazhatunk teljesen mesterséges, akár genetikailag manipulált élőlényeket is. Tehát a metodikák végtelen választéka és kombinációi közül választhatunk, – legalábbis elvileg. A gyakorlatban viszont még fejlesztendő ez a terület, hogy valóban gyorsan, a károkat megelőzve, a környezet állandó jó, de legalább elfogadható állapotát tudjuk biztosítani az ökoszisztéma és az ember érdekében.

## **Publikációk**

- Balla, J. (1997) *Analytical Applications of Gas Chromatography*, pp. 1145–1147. Abigel, Hungary
- Christensen, P.D., Nielsen, L.P., Revsbech, M.P. and Sorensen, J. (1989) Microzonation of denitrification activity in stream sediments as studied with a combined oxygen and nitrous oxide microsensor. *Appl. Environ. Microbiol.*, 55, 1234–1241
- De Beer, D. and Van den Heuvel, J.C. (1988) Response of ammonium-selective microelectrodes based on the neutral carrier nonactin. *Talanta*, 35, 728–730
- Dobler, R., Burri, P., Gruiz, K., Brandl, H. and Bachofen, R. (2001) Variability in microbial population in soil highly polluted with heavy metals on the basis of substrate utilization pattern analysis. *J. Soils and Sedim.*, 1 (3), 151–158
- Fenyvesi, É. and Jicsinszky, L. (2009) Cyclodextrin-containing sensors for early warning. *Land Contamination & Reclamation*, 17 (3), xx
- Fenyvesi, É., Pasztor, I., Szejtli, J and Szente, L. (1999) Air filters for decontaminating iodine from industrial plants – containing cyclodextrin aqueous solutions, resins and absorbents. Hung. Pat. 21976392 *Land Contamination & Reclamation / Volume 17 / Numbers 3–4 / 2009*
- Fourmentin, S., Surpateanu, G.G., Blach, P., Landy, D., Decock, P. and Surpateanu, G. (2006) Experimental and theoretical study on the inclusion capability of a fluorescent indolizine beta-cyclodextrin sensor towards volatile and semi-volatile organic guest. *Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry*, 55 (3–4), 263–269

Goldberg, E.D.: The mussel watch concept, *Environmental Monitoring and Assessment*, 7, 91-103, 1986

Gruiz, K. (2005) Biological tools for soil ecotoxicity evaluation: soil testing triad and the interactive ecotoxicity tests for contaminated soil. In: F. Fava and P. Canepa (eds), *Soil Remediation Series*, No. 6, INCA, Venice, pp. 45–70

Gruiz, K. (2009) Integrated and efficient assessment of polluted sites. *Land Contamination & Reclamation*, 17 (3), xx

Gruiz, K. and Molnár, M. (2009) Interactive environmental toxicity tests. *Land Contamination & Reclamation*, 17 (3), xx

Gruiz, K. and Vodicska, M. (1993) Assessing heavy-metal contamination in soil applying a bacterial biotest and X-ray fluorescent spectroscopy. In: F. Arendt, G.J. Annokkée, R. Bosman and W.J. van den Brink (eds), *Contaminated Soil '93*, pp. 931–932. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands

Gruiz, K., Murányi, A., Molnár, M. and Horváth, B. (1998) Risk assessment of heavy metal contamination in the Danube sediments from Hungary. *Water Sci. and Technol.*, 37 (6–7), 273–281

Gruiz, K., Vaszita, E., Feigl, V. and Fekete, F. (2009) Complex environmental risk management of a former mining site. *Land Contamination & Reclamation*, 17 (3), xx

Jensen, K., Revsbech, N.P. and Nielsen, L.P. (1993) Microscale distribution of nitrification activity in sediment determined with a shielded microsensor for nitrate. *Appl. Environ. Microbiol.*, 59, 3287–3296

Jordan, G., van Rompaey, A., Somody, A., Fügedi, U. and Farsang, A. (2009) Spatial modelling of contamination in a catchment impacted by mining: a case study for the Recsk copper mines, Hungary. *Land Contamination & Reclamation*, 17 (3), xx

Kovács, M. and Podani, J. (1986) Bioindication: a short review on the use of plants as indicators of heavy metals. *Acta Biol. Hungar.*, 37, 19–29

Kovács, M. and Podani, J.: Bioindication: a short review on the use of plants as indicators of heavy metals, *Acta Biologica, Hungarica*, 37, p. 19-29, 1986

Kramer, K.J.M. and Foekema, E.M. (2000) The ‘Mussel monitor’ as biological early warning system: the first decade. In: F. Butterworth, A. Gunatilaka and M. Gonsebatt (eds), *Biomonitoring and Biomarkers as Indicators of Environmental Change*, pp. 59–87. Kluwer, New York. <http://www.mosselmonitor.nl/>

Kramer, K.J.M. and Foekema, E.M.: The „Musselmonitor” as biological early warning system: the first decade. In: Butterworth et al (eds.) *Biomonitoring and biomarkers as indicators of environmental change*, Kluwer Academic press, New York, pp. 59–87, 2000 <http://www.mosselmonitor.nl/>

Leynen, M., Van den Berck, T., Aerts, J.M., Castelein, B., Berckmans, D. and Olleviera, F. (1999) The use of Tubificidae in a biological early warning system. *Environmental Pollution*, 105 (1), 151–154

Leynen, M.; T. Van den Berck; J. M. Aerts; B. Castelein; D. Berckmans and F. Olleviera: The use of Tubificidae in a biological early warning system, <http://www.sciencedirect.com>, 1999

Mezei, P. and Cserfalvi, T. (2007) Electrolyte cathode atmospheric glow discharges for direct solution analysis. *Applied Spectroscopy Reviews*, 42, 573–604

Oertel, N. (2000) ‘Dreieisen-Basket’ – a powerful technique to monitor and control heavy metals in the river Danube. *Internat. Assoc. Danube Res.*, 33, 383–390

- Orprecio, R. and Evans, C.H. (2003) Polymer-immobilized cyclodextrin trapping of model organic pollutants in flowing water streams. *Journal of Applied Polymer Science*, 90 (8), 2103–2110
- Ortel, N.: „Dreieisen-Basket“ – a powerful technique to monitor and control heavy metals in the rives Danube, *International Association Danube Res.*, 33, 383–390, 2000
- Ramsing, N.B., Kuhl, M. and Jorgensen, B.B. (1993) Distribution of sulfate-reducing bacteria, O<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S in photosynthetic biofilms determined by oligonucleotide probes and microelectrodes. *Appl. Environ. Microbiol.*, 59, 3840–3849
- Revsbech, N.P. (1989) An oxygen microsensor with a guard cathode. *Limnol. Oceanogr.*, 34, 474–478
- Revsbech, N.P. and Jorgensen, B.B. (1986) Microelectrodes: their use in microbial ecology. *Adv. Microb. Ecol.*, 9, 293–352
- Staenz, K. (1992) A decade of imaging spectrometry in Canada. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 18 (4), 187–197
- Szomolányi, R.M., Frombach, G. and Nagy, A. (2009) Remote sensing as a promising tool of the environmental assessment. *Land Contamination & Reclamation*, 17 (3)
- Whitton, B.A., Say, P.J. and Wehr, J.D. (1981) Use of plants to monitor heavy metals in rivers. In: P.J. Say and B.A. Whitton (eds), *Heavy Metals in Northern England. Environmental and Biological Aspects*, pp. 135–145. University of Durham, Department of Botany
- Whitton, B.A., Say, P.J. and Wehr, J.D: Use of plants to monitor heavy metals in rivers, In: P.J. Say and B.A. Whitton (eds) *Heavy metals in Northern England. Environmental and Biological aspects*. University of Durham, Dept. Of Botany, pp. 135–145, 1981