

KÖRNYEZETI ÁSVÁNYTAN

Környezettudományi alapok tankönyvsorozat

A környezettan alapjai

A környezetvédelem alapjai

Környezetfizika

Bevezetés a környezeti áramlások fizikájába

Környezeti ásványtan

Környezeti mintavételezés

Környezetkémia

Környezetminősítés

Környezettudományi terepgyakorlat

Mérési adatok kezelése és értékelése

Bevezetés a talajtanba környezettanosoknak

Environmental Physics Methods Laboratory Practices



Eötvös Loránd Tudományegyetem
Természettudományi Kar

KÖRNYEZETI ÁSVÁNYTAN

Szerkesztette:
Weiszburg Tamás

Írta:
Tóth Erzsébet
geológus muzeológus,
ELTE Geológus Kert, Tata

Weiszburg Tamás
egyetemi docens,
ELTE TTK Ásványtani Tanszék

Lektorálta:
Pósfai Mihály
egyetemi tanár, Pannon Egyetem



2011

COPYRIGHT: © 2012-2017, Dr. Tóth Erzsébet, ELTE Tatai Természetvédelmi Terület és Szabadtéri Geológiai Múzeum, Dr. Weiszbürg Tamás, Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar Földrajz- és Földtudományi Intézet

Lektorálta: Dr. Pósfai Mihály

Creative Commons NonCommercial-NoDerivs 3.0 (CC BY-NC-ND 3.0)
A szerző nevének feltüntetése mellett nem kereskedelmi céllal szabadon másolható, terjeszthető, megjelentethető és előadható, de nem módosítható.

ISBN 978-963-279-541-6

KÉSZÜLT: a [Typotex Kiadó](#) gondozásában

FELELŐS VEZETŐ: Votisky Zsuzsa

TÁMOGATÁS:

Készült a TÁMOP-4.1.2-08/2/A/KMR-2009-0047 számú,

„Környezettudományi alapok tankönyvsorozat” című projekt keretében.

Nemzeti Fejlesztési Ügynökség
www.ujszachenyiterv.gov.hu
06 40 638 638



A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

KULCSSZAVAK:

Ásvány, kőzet, érc, műtermék, kristály, üveg, keverék, agyag, környezeti ásványképződés, nanoanyag, azbeszt, mesterséges szál.

ÖSSZEFOGLALÁS:

A könyv két részből áll, egy általános bevezetésből és egy komplex esettanulmány-sorozatból. Az első, általános rész bemutatja a környezeti ásványtant, mint tudományterületet és a rokon tudományágakat. Áttekintést ad az érdeklődési körébe tartozó anyagokról, vagyis környezetünk szilárd anyagairól, elkülönítve a fő természetes szilárd anyag típusokat (ásvány, kőzet, érc, drágakő) és a mesterséges anyagokat. Párhuzamot von a természetes és mesterséges anyagok között. Ismerteti a környezeti ásványképződés főbb jellegzetességeit, és megmutatja, miben térnek el a környezeti ásványképződés folyamatai a geológiai ásványképződési folyamatoktól.

A rendszeres ásványtani rész megközelítésében tér el a hagyományos ásvány rendszertani munkáktól: bemutatja a 9 ásványosztályt, kiemelve a környezeti jelentőséggel bíró, környezeti folyamatokban fontos szerepet betöltő ásványfajokat.

A második rész az azbeszteket ismerteti. Az azbesztek ásványok, azaz természetes szilárd anyagok, előfordulnak természetes környezetünkben. Jó technológiai tulajdonságaik miatt az őskortól alkalmazta őket az emberiség, ma is részei épített környezetünknek. Egészségkárosító hatásuk miatt ma már jobbára tiltják az azbesztek használatát, így eltávolítása, veszélyes hulladékként való elhelyezése fontos feladat. Az esettanulmány-sorozat ismerteti az azbesztek bányászati, egészségügyi, környezeti és jogi vonatkozásait.

I. rész

Környezetünk szilárd anyagai és szerepük a környezeti folyamatokban

szerző: Weiszbürg Tamás, Tóth Erzsébet

Tartalom

1. Bevezetés.....	8
2. Alapfogalmak	12
2.1. Az ásvány	12
2.1.1. Az ásvány definíciója	12
2.1.2. Az ásvány definíciójának korlátai	13
2.1.3. Az ásványok neve, magyar írásmódja és kiejtése.....	19
2.2. A műtermékek	20
2.3. Az üvegek.....	22
3. Az ásványok és a műtermékek keverékei.....	24
3.1. A kőzetek.....	24
3.2. Az ércek.....	25
3.3. Agyagok	27
3.4. Mesterséges építőipari keverékek (kerámiák, beton).....	28
3.5. Ipari műveletek melléktermékei, mesterséges ipari keverékek (pl. vörösiszap, flotációs és más ipari zagyok).....	29
4. A mérettartományok jelentősége a környezeti szakember munkájában.....	33
4.1. A felület jelentősége és méretfüggése	34
4.2. A felületi szerkezet jelensége és jelentősége a méretváltozással	35
4.3. A méret, a tömeg és a részecskeszám kapcsolata.....	36
4.4. A szemcseméret jelentősége az ülepedő és szálló por példáján	39
5. A környezeti szilárd anyagok megismerhetőségének eszközei.....	42
5.1. Az alak, méret meghatározása a környezeti anyagoknál.....	42
5.2. A kémiai összetétel meghatározása a környezeti anyagoknál	43
5.3. A (kristály)szerkezet meghatározása környezeti mintáknál	43
6. Környezeti ásványrendszertan.....	45
6.1. Terméselemek és rokon anyagok	45
6.2. Szulfidok és rokon vegyületeik	46
6.3. Oxidok és hidroxidok	48
6.4. Szilikátok és rokon vegyületeik.....	50
6.5. Foszfátok és rokon vegyületeik	52
6.6. Szulfátok és rokon vegyületeik.....	53
6.7. Karbonátok és rokon vegyületeik	55
6.8. Halogenidek.....	57
6.9. Szerves vegyületek	57
Irodalomjegyzék az első részhez	58

II. rész**Azbesztek: a környezeti ásványtan alkalmazhatósága egy kiemelt ipari ásványcsoport példáján****szerző: Tóth Erzsébet, Weiszburg Tamás****Tartalom**

A II. rész tartalma (rövid összefoglaló).....	59
7. Az azbeszt fogalma	61
7.1 Az azbesztszál – ásványtani kritérium	64
7.1.1 Az amfibol csoport.....	67
7.1.2 A krizotil	72
7.2 Az azbesztszál – alaki (morfológiai) kritérium	77
8. Az azbesztek egészségre gyakorolt hatása.....	82
9. Azbeszt az épített környezetben.....	89
9.1. Kis kötőanyag-tartalmú alkalmazások	93
9.2 Nagy kötőanyag-tartalmú alkalmazások	94
10. Az azbeszt jogi vonatkozásai	99
10.1 Alkalmazás	99
10.2 Eltávolítás az épített környezetből	99
10.3 Azbeszttartalmú hulladékok és elhelyezésük.....	101
10.4 Azbesztre vonatkozó határértékek a környezetben	103
10.5 Levegő azbeszttartalmának meghatározása	103
11. Azbesztcement termékek előállítása, a gyártás és a felhasználás környezeti kockázata (Esettanulmányok 1.)	109
11.1. Azbesztcement termékek előállítása, a gyártás környezeti kockázata	109
11.2. Azbesztcement termékek korróziója, és az ehhez kapcsolódó környezeti kockázat	110
11.2.1. Magyarországi tapasztalatok: azbesztcement vízvezetékcső ásvány átalakulási és -képződési folyamatai	110
11.2.2. Azbesztcement vízvezeték csőrendszer bizonyított vízszennyezése és annak egészségre gyakorolt hatása	114
12. Szálas szilikátok akaratlan felhasználásához kötődő környezeti kockázat (Esettanulmányok 2.)	115
12.1. Fluoroedenit (amfibol, Biancavilla, Szicília, Olaszország).....	115
12.2. Winchit, richterit (amfibol, Libby, Montana állam, USA).....	116
12.3. Erionit (zeolit, Kappadokia, Törökország).....	117
12.4. Akaratlan azbeszttalkalmazáshoz kötődő környezeti kockázat (Nem mind azbeszt, ami szerpentin!).....	119
13. Azbesztelőfordulások környezeti kockázata (Esettanulmányok 3.).....	121
13.1 Példák az Egyesült Államokból: a Sumas-folyó völgye (Északi-Kaszkád-hegység, Washington állam, USA)	121
13.2. Szerpentinút a Páring-hegységben (Románia)	125
14. Az azbesztbányászat és a felhagyott azbesztbányák környezeti kockázata (Esettanulmányok 4.)	130
14.1. Wittenoom: felhagyott kékazbeszt bánya, sajátos rekultivációval.....	135
14.2. Egy lassan befejeződő bányarehabilitáció: Észak-Görögországi Azbesztbánya (MABE), Zidani, Görögország.....	140

15.	Azbesztet helyettesítő anyagok, az azbeszt jövője	147
15.1.	Helyettesítő anyagok	147
15.1.1.	Wollastonit	147
15.1.2.	Mesterséges üveges szálak	147
15.1.3.	Para-aramid szálak.....	149
15.1.4.	Egyéb szerves szálak	150
15.2.	Van-e jövője egy ilyen, ellentmondásokkal teli anyagnak?	150
16.	Irodalomjegyzék a második részhez	152
17.	Feladatok megoldása	157
	Fajlagos felület: amfibolkristály és ugyanolyan térfogatú amfibolazbeszt szálköteg fajlagos felületének összevetése (1.1.)	157
	Azbeszt szálkötegek felépítése (1.2.)	157
	Porszemcsék tüdőbe jutásának hatékonysága a szemcseméret függvényében (1.3.)	158
	Azbesztszálakra vett levegőminta kiértékelése fáziskontrasztos mikroszkópiával (PCM). (1.4.)	160

I. rész

Környezetünk szilárd anyagai és szerepük a környezeti folyamatokban

1. Bevezetés

Környezetünk nem élő, kémiai összetételük szerint *egynemű* anyagai gázok, folyadékok és szilárd anyagok lehetnek.

A környezettel foglalkozó szakember jól tudja, hogy közülük a *szilárd anyag* nem csak a lábunk alatti *talajban* és *kőzetekben* található: állandóan, jelentős mennyiségben, és a *mennyiségénél is jelentősebb környezeti hatással* jelen van a *légtérben* és a *vizekben* is, csupán szemcséinek parányi mérete rejti el itt a hétköznapi ember szeme elől. Ha egy kémiailag egynemű (*homogén*) gáz- vagy folyadékrendszerben megjelenik a szilárd anyag bármilyen apró szemcséje is, vele szükségszerűen eltűnik a homogenitás, megjelennek *határfelületek*, a rendszer összetetté (*heterogénné*) válik és tulajdonságai is megváltoznak.

A környezetben képződő szilárd fázisok szemcsemérete jellemzően a nanométer (nm) – 10 mikrométer (μm) tartományba esik, vagyis nagy részük a legjobb felbontású *optikai* (fényvel működő) mikroszkópokkal sem látható. A kis szemcseméret oka, hogy a környezeti folyamatok viszonylag *kis energiájú környezetben* zajlanak (normál légköri nyomás, kb. 101 kPa, és alacsony hőmérséklet, $-60 - +60$ °C), ráadásul az e környezetben meghatározó vizes oldatokban a *kémiai koncentráció* és a (*mikro*)*biológiai aktivitás gyorsan változó*, így a nagy kristályok növekedéséhez elengedhetetlen, időben állandó körülmények sem adóttak.

A gázokat és folyadékokat általában *molekulaként* megjelenő *vegyületek*, *elemek* vagy ezek *keverékei* és bennük oldott *szabad* (általában *hidratált*) *ionok* alkotják. A *gázok* és *folyadékok* vizsgálatára fejlődött ki az elmúlt kétszázötven évben a modern *kémia*.

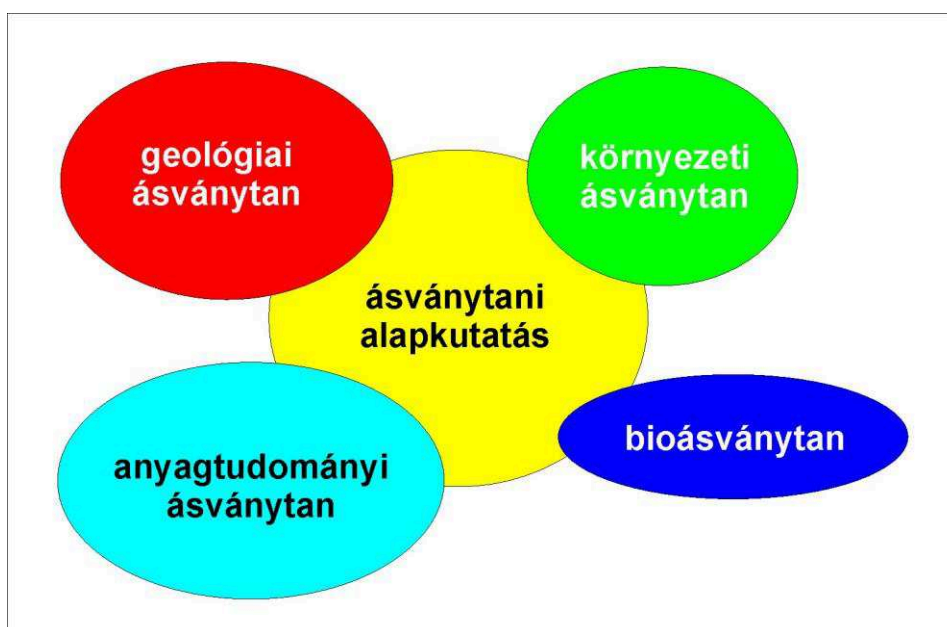
Ezzel párhuzamosan a *természetes szilárd vegyületek* (ásványok) kutatása is megindult a 18. században, önálló tudományág, a modern *ásványtan* keretében. A kémia és az ásványtan elkülönülésének fő oka, hogy a természetes szilárd anyagok többsége – szemben a gázokkal és a folyadékokkal – *nem molekuláris vegyület*, ezért megismerésük más módszereket kívánt. Az elmúlt 15–20 évben alakult ki a természetesekkel rokon, *szilárd környezeti* anyagok megismerésével foglalkozó *környezeti ásványtan*.

Az ásványtan (mineralógia) tehát az ásványokkal és a velük rokon (szilárd) vegyületekkel foglalkozó tudomány. Ásványtani szempontból a tisztán természetes és a környezeti (az ember keze nyomát *is* magán viselő) szilárd anyagok között nincs különbség: mindkettő az ásványtan *alapfogalmaival* írható le, az ásványtan eszközeivel ismerhető meg, mindkettőnél az ásványtan tudja feltárni és jellemezni a kedvező vagy kedvezőtlen – vagy éppen semleges – környezeti hatásokat.

Az ásványtan 21. századi tudományos kapcsolatrendszerét az **1.1. ábra** mutatja.

A kémia, a fizika és az ásványtan kutatási eszköztárában számos hasonlóságot találunk, de mindegyiknek megvannak a maga sajátos eszközei is. Mivel a környezeti ásványtan tárgyát képező parányi szemcséket hagyományos módon, közvetlenül (szabad szemmel vagy optikai mikroszkópokkal) nem láthatjuk, ezért kutatásuk csak az elmúlt évtizedekben elterjedt *nagyműszeres vizsgálatokkal* (elektronmikroszkópiák, diffrakciós mérések, szerkezeti információt adó spektroszkópiák, felületi mikroszkópiák) lehetséges. Ezért a környezeti ásványtan esetében – az egyes szilárd vegyületek ismerete és a környezeti folyamatokban betöltött szerepük tárgyalásán túl – e módszerek legalább alapszintű megismerése elengedhetetlen.

Az ásványok és velük rokon anyagok a vegyületsoportok széles körét képviselik; gazdasági jelentőségük és környezeti hatásuk vegyületsoportonként eltérő. Ezért az ásványok környezeti hatását legegyszerűbb a kémiai rokonságot is tükröző *ásványrendszertan* keretében adott példákkal áttekinteni.



1.1. ábra: Az ásványtan 21. századi tudományos kapcsolatrendszere

Könyvünk ennek megfelelően két nagyobb részből áll, melyek maguk is önálló fejezetekre bomlanak.

Az *általános áttekintésben* hat, egymáshoz kapcsolódó, egymásra épülő fejezet szerepel. Először az *alapfogalmakat* vezetjük be. Ezután tárgyaljuk a *szemcseméret* jelentőségét, hiszen a hagyományos és a környezeti ásványtan anyagai főként ebben különböznek egymástól. Itt, pusztán geometriai megfontolások alkalmazásával, még a konkrét vegyületek ismerete nélkül megmutatjuk, hogy a környezeti ásványok *parányi mérete* milyen óriási változást eredményez szemcséik *mennyiségében* és *fajlagos felületében*. A következőkben röviden bemutatjuk a legtöbbször fénymikroszkóppal sem látható, nanométeres, ritkábban mikrométeres méretű szemcsék megismerhetőségét lehetővé tevő főbb vizsgálati módszereket és ezek eszközeit. A környezeti ásványtanban legfontosabb vegyületsoportokat a tulajdonságaik általánosíthatóságát is lehetővé tevő kémiai rendszer szerint ismertetjük

meg az olvasóval. Ennek kapcsán röviden azt is áttekintjük, hogy melyek a szilárd vegyületeket érintő legfontosabb környezeti folyamatok, hogyan épülnek, hogyan bomlanak el, mikor stabilak, mikor és miért használhatók fel a környezet védelmében, a környezetgazdálkodásban, vagy éppen mikor veszélyeztetik a környezetet.

Végül arra hozunk igen részletes, az ásványtani ismereteken túl a gazdasági, társadalmi vetületeket is tárgyaló példát az *azbesztek* segítségével, amikor a méret csökkenésével nem csupán a felület *nagysága*, hanem *minősége* is megváltozik: amikor *nano- és mikrométeres* méretben keletkező, környezetünkbe ipari méretekben beépített szilárd vegyületcsoportok kémiai, fizikai, sőt élettani hatásukban is másként viselkednek, mint a hagyományos, milliméteres, deciméteres megfelelőik.

A könyv végén ajánlott szakirodalom pedig a továbblépés, a mélyebb megértés útját mutatja meg, akár a témában hallgatott haladó kurzusoknál, akár a vizsga utáni diákköri munkánál, akár a diplomatervezés során, vagy már éppen a végzést követően, a gyakorlati munka során.

2. Alapfogalmak

Előadásunk, amelyhez könyvünk segédletként készül, olyan felsőbb éves diákoknak ajánlott, akik már teljesítettek bevezető ásványtani vagy kristálykémiái tárgyakat. A tapasztalatok szerint azonban az általában a legelső egyetemi félévben – középiskolai előzmények nélkül – hallgatott ásványtan emléke pár év alatt megkopik, és emellett a mai többciklusos rendszerben jelentős számban csatlakoznak mesterszakos diákok olyan alapképzésekből is, ahol ez a tárgy teljesen hiányzik. Utóbbiak számára – mivel Magyarországon 1948 óta az ásványtani alapismeretek nem épülnek be a közoktatásba, és így az azt lezáró érettségibe sem – az ásványok országa teljesen ismeretlen. Ásványtani alapismeretek nélkül pedig a környezeti ásványtan nem tanítható, ezért áttekintésüket – hacsak röviden is – nem tudjuk elhagyni.

2.1. Az ásvány

2.1.1. Az ásvány definíciója

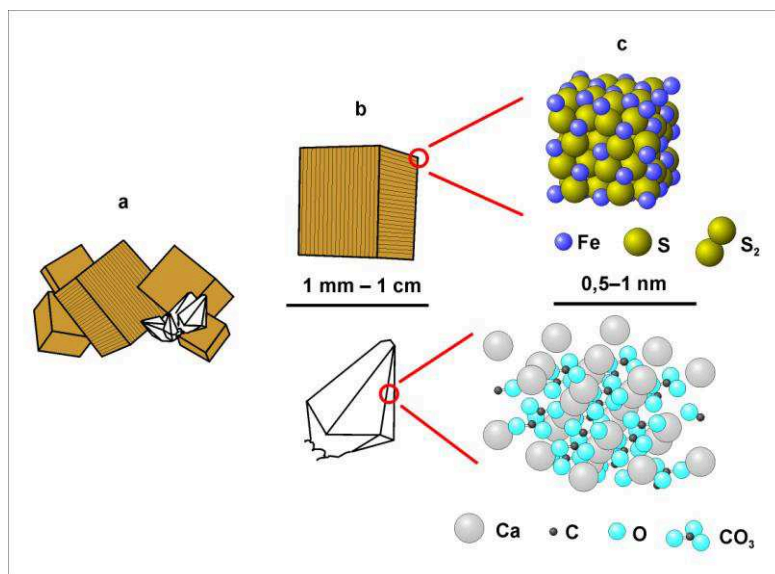
Az ásvány természetes kristályos vegyület, ritkán elem. Ma mintegy 4500 ilyen vegyület ismert. Számuk lassan gyarapszik, minden évben néhány tíz újabbat fedeznek fel a Földön.

A természetes azt jelenti, hogy *természetes folyamatok* hozták létre.

A kristályos azt jelenti, hogy az anyagban *mind rövid, mind hosszú távú rend* megtalálható. A *rövid távú* (jellegzetesen 0,1–0,2 nanométeres távolságú) geometriai rendet a kémiai kötések alakítják ki az atomok, ionok között. A *hosszú távú rend* a rövid távon rendezett atomcsoportok néhány nanométertől akár centiméteres távolságokig is terjedő szabályos ismétlődését, a „végtelen” (kristály)rács kialakulását jelenti.¹ A kristályos szemcséknek legtöbbször nincs szabályos alakjuk, de különleges, a természetben ritkán megvalósuló növekedési feltételek között, síklapok szimmetrikus elrendeződésével megjelenhetnek rajtuk *szabályos kristályalakok* is. A kristályos anyagnál mindig meglévő *belső* (atomi léptékű) kristályrácsot az esetenként megjelenő *külső* (makroszkopikusan észlelhető) *kristályalakkal* a *szimmetria* kapcsolja össze.

A vegyület esetünkben olyan anyagi minőséget jelöl, ahol az alkotók (atomok, ionok) között főként elsőrendű *kémiai kötések* (kovalens, ionos, fémes) vannak, és ennek nyomán az anyagnak van határozott, állandó kémiai összetétele, a benne levő alkotók aránya *kémiai képlet* segítségével felírható.

¹A kristályrácsot az ásványok *döntő többségénél* folytonosan – a szemcse teljes térfogatában, „végtelenül” – elsőrendű kötésekkel kapcsolódó atomok, ionok építik fel. Az ilyen anyagban nincsenek zárt, kémiai, elektromosan semleges molekulák. A megadott kémiai összegképlet pusztán az alkotók egymáshoz képesti arányát rögzíti. Például egy parányi kvarcsemmében *sok ezer milliárd szilíciumatom* és velük kémiaiailag összekötve *kétszer annyi oxigénatom* található, a felírt képlet mégis „csak” SiO₂. Egy ilyen, *nem molekuláris* kristály szétbontásakor a vegyület is alkotóira bomlik, a kvarc példájánál maradvá Si és O atomokra esik szét. *Néhány ásványnál*, ilyen például a *jég* (H₂O) és a *természen* (S₈), az elsőrendű kötések „véges” számú atom rövid távú rendjeként megjelenő, kémiaiailag zárt, elektrosztatikusan semleges, igazi *molekulát* hoznak létre. Ezeknél az anyagoknál a hosszú távú rend (kristály) e molekulák gyenge (másodlagos) kötések révén történő sorba állításából ered („molekulárcsos anyagok”). Ebből következően a *molekulákból álló kristályoknál* a rács felbomlása után is megmarad a vegyület: a jégkristály (H₂O) felolvasztása nyomán víz (H₂O) lesz, a kén olvadáskor pedig a 8 kénatomból álló kénmolekula (S₈) lesz jelen.



2.1. ábra: Szerveződési szintek. Figyeljük meg a méretek nagyságrendi változását!

a) ásványkeverék vázlatos rajza,

b) ennek alkotói ásványok: az aranysárga pirit és a fehér kalcit,

c) az ásványok kristályszerkezetét a mm tízmilliomod résznyi (angström; \AA , $1 \text{\AA} = 10^{-10} \text{ m}$) méretű **atomok/ionok** alkotják, amelyeket a kémiai kötések szintén az \AA mérettartományban rendeznek egymáshoz.

(Pirit: $\text{FeS}_2^{\text{köbös}}$; kockáinak mérete az ábrán maximum 1 cm; kristályszerkezete köbös szimmetriájú, benne a vas és kén aránya 1:2; kalcit: $\text{CaCO}_3^{\text{trig}}$; az ábrán kb. fél cm-es hegyes kristályokból áll, kristályszerkezete háromszöges – trigonális – szimmetriájú, alkotóinak aránya Ca:C:O=1:1:3.)

Egy ásvány(szemcse) jellemzéséhez három dolgot kell megadni (**2.1. ábra**):

1. a szemcse méretét, alakját;
2. a kémiai elemi összetételét, vagyis a benne lévő egyes kémiai elemek egymáshoz viszonyított mennyiségét (arányát), tekintet nélkül arra, hogy ezek az elemek hogyan kapcsolódnak egymáshoz; valamint
3. a vegyület anyagszerkezetét, vagyis az elemek, ionok között ható kémiai kötőerőket (kötéstípus), az általuk kialakított rövid távú rendet (koordináció), és a különböző koordinációk összességéként kialakuló hosszú távú rendet (rács, rács típus).

2.1.2. Az ásvány definíciójának korlátai

Az ásvány fenti, három szóból álló definíciója jó, mert egyszerű, és az érintett anyagcsoport döntő részére igaz. A természet és az anyag azonban sosem hagyja magát egyszerű dobozokba csomagolni: tisztában kell lennünk mindhárom kritérium esetében a korlátokkal is.

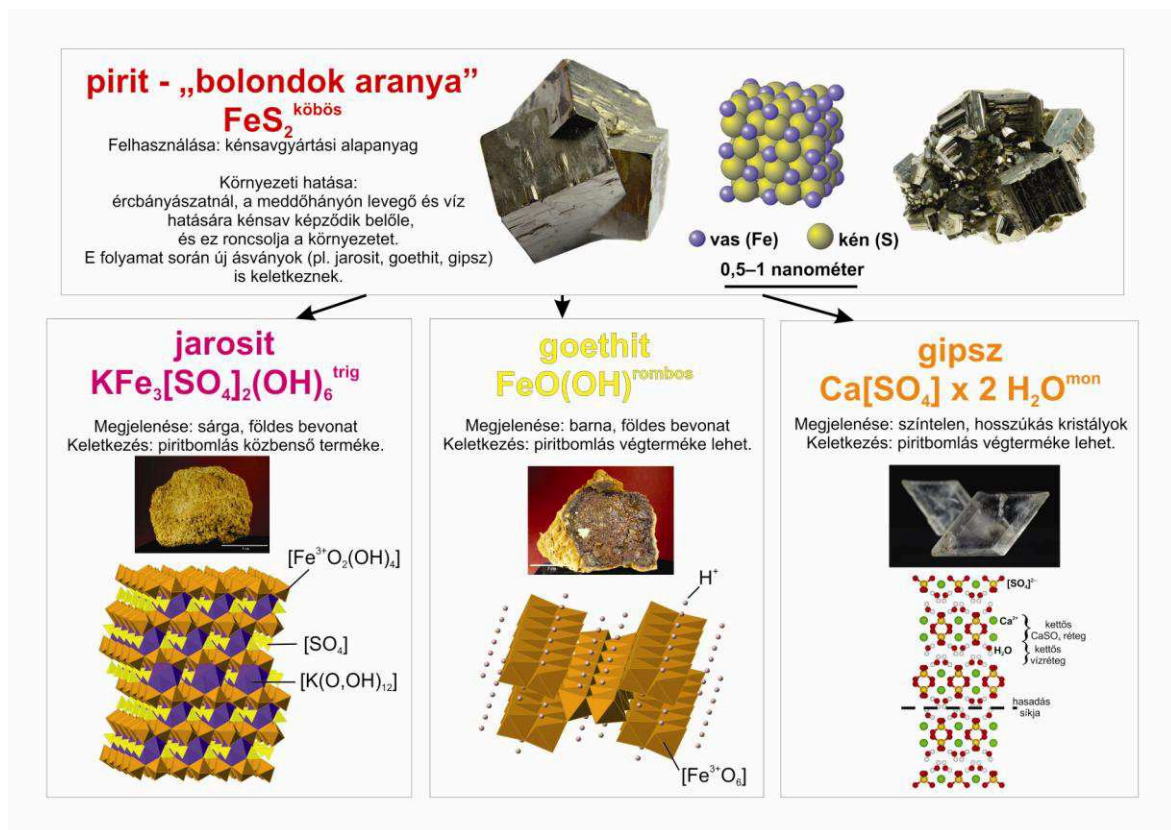
A „természetesség” korlátai

A természetes folyamatok kapcsán két korlátot emelünk ki.

Az első, hogy a legtöbb ásványt mára laboratóriumi eszközökkel is elő tudjuk állítani. Ezek a szintetikus ásványok. Például a digitális órák lelkét adó kvarckristályokat kezdetben a természetből gyűjtött, nagyon tiszta kvarcból vágták ki, mára azonban döntően laboratóriumban növesztett kristályok kerülnek az órákba. A két anyag mind kémiai összetételét

(szilícium-dioxid, SiO_2), mind kristályszerkezetét (háromszöges szimmetriájú kristályrács) tekintve azonos. Ha pontosak akarunk lenni, akkor a laboratóriumban „utánzott” anyagot megkülönböztethetjük a *szintetikus* jelzővel (kvarc – szintetikus kvarc), de tudnunk kell, hogy környezeti szempontból a „két”anyag egy, viselkedésük is teljesen azonos. Hasonló a helyzet az informatikában, a műszeriparban, az ékszeriparban alkalmazott gyémánt – szintetikus gyémánt (C, köbös), rubin – szintetikus rubin (Al_2O_3 , háromszöges) esetében is.

A természetesség egy másik korlátja, ha az ember közvetve, a *természetes folyamatok módosításával* vesz részt az ásvány kialakulásában. Ilyenkor az ásványok már *környezeti folyamatokban* keletkeznek. Példa erre a „*meddőhányó ásványok*” kialakulása. Tudjuk, hogy a bányászat során a haszonanyag kitermelése érdekében jelentős tömegű nem hasznosítható (*meddő*) anyagot is meg kell mozgatni. Ez utóbbit a bányákhoz közeli *meddőhányókon* helyezik el. A *szén* és a *szulfidos ércek* bányászatánál gyakori, hogy a meddőhányókra kerülő eredeti szilárd vegyületek (ásványok) a felszíni levegővel és vízzel érintkezve instabillá válnak, elbomlanak, és ott helyben új, a felszínen már stabil szilárd vegyületek formálódnak (2.2. ábra).



2.2. ábra: A felszínre, például meddőhányóra kerülve a pirit elbomlik.

Bomlása eredményeként a környezet előbb savasodik, majd – megfelelő kémiai viszonyok esetén, környezeti ásványképződés révén – ismét savmentessé, normál pH-júvá válhat.

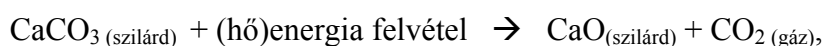
Az ábra e folyamat fő ásványait mutatja be (lásd még a 6.1., 6.3. és 6.4. ábrákat is)

E *meddőhányó ásványok* környezeti jelentősége nagy, viselkedésük a környezeti ásványtan eszközeivel írható le.

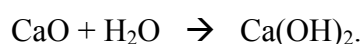
Hasonló, de az előbbinél összetettebb emberi hatással találkozhatunk ókori vagy középkori épületek, templomok, várfalak vizsgálatakor. A „mészsel” összetapasztott terméskövek

közeit ma elemezve *kalcitot* (kalcium-karbonát, CaCO_3 , trigonális szimmetriájú kristályrács) találunk, pont azt a vegyületet, amely a *mészkö* kőzetet alkotja. Ez a kalcit azonban csak részben természetes. Tekintsük át a teljes kémiai átalakulási sort.

Tudjuk, hogy a várfalak építéskor a mai építőiparban is használt „*oltott meszet*” (kalcium-hidroxid, Ca(OH)_2) alkalmazták. Az oltott meszet ma is, a korábbi évszázadokban is a *természetes kalcit* kb. 950 °C-ra történő felhevítésével, hőbontásával:



a „*mészégetéssel*” gyártott *mesterséges kalcium-oxidból* (CaO) készítik, víz hozzáadásával:



Ez a *mesterséges kalcium-hidroxid* azután a falban, a beépítés után, a levegő széndioxidjával (CO_2) *természetes* folyamatok révén egyesül:



és a végeredmény megint *kalcit* lesz, immár *részben mesterséges*. Ez a „*másodlagos*” kalcit azonban környezeti szempontból, kémiai és fizikai tulajdonságait tekintve azonosan fog viselkedni a kiinduló „*elsődleges*” kalcittal. Megjegyzésre érdemes, hogy ugyanez a kalcium-hidroxid a természetből is ismert, ásványként (portlandit).

A „*kristályosság*” korlátai

A kristályosságnak is több korlátja van.

A környezeti gyakorlatban vannak olyan szilárdként viselkedő (méreteit, formáját megőrző szemcsékben megjelenő), nem molekuláris anyagok, amelyekben *nincs meg a hosszú távú rend*. Ilyen, kémiaileg egynemű (*vegyületnek* tekinthető), csak rövid távú renddel jellemezhető anyag például az *opál-A* ($\text{SiO}_2 \times n\text{H}_2\text{O}$). Szintén hosszú távú rend nélküliek, de kémiaileg is összetettebbek a különböző természetes (és mesterséges) *üvegek* (lásd [2.3. alfejezet](#)).

A környezeti alkalmazásokban a kristályosság (a hosszú távú rend) egyik legizgalmasabb korlátozása az, amikor az ásvány *szemcséjének mérete* olyan kicsi, hogy maga a szemcse mérete jelenti a határt. Ha egy – például légköri aeroszol részecskéként lebegő – 10–100 nm-es szemcse teljes *belső térfogatában* rendezett kristályrács is van, az anyag fizikai és kémiai tulajdonságai – éppen parányi mérete miatt – eltérhetnek, esetenként jelentősen el is térnek egy azonos anyagú és rácsú, de az ember számára megszokott méretű (10–100 μm – 1–10 mm) ásványétól. Ennek oka, hogy a kicsiny méret miatt az ismétlődések száma már nem tekinthető „*végtelennek*”, a *szemcse felületének szerkezete* a csökkenő szemcsemérettel egyre jelentősebb szerepet játszik a *térfogati szerkezettel* szemben. E jelenségre még visszatérünk a [4.2. pontban](#).

Megjegyzésre érdemes, hogy egy ilyen parányi méretű szemcsékből álló, de a szemcséken belül rendezett anyagot a kristályosság megállapítására ma legáltalánosabban használt

vizsgálati módszer, a röntgendiffrakció olyannak láthat, mintha nem volna benne hosszú távú rend (*röntgenamorf*; lásd később, a vizsgálati módszereknél).

Ugyancsak említésre érdemes, hogy a rövid távra épülő hosszú távú rendnek, vagyis a kémiai kötések megszabta helyi atomkapcsolatok ismétlődésének lehetnek a hagyományos kristályban megszokott, 3 eltolási vektor segítségével felépülő kristályrácsétól különböző megvalósulásai is. Ilyeneket találunk például az 1980-as évek elején először megfigyelt *kvázikristályokban*.² Mai ismereteink szerint ugyan éppen ez a rendeződési szabály nem játszik kiemelt szerepet a környezeti ásványokban, de más szabályok igen. Például a könyvünkben később, az azbesztek között részletesen tárgyalt szerpentinásványban, a krizotilban az ismétlődési szabály a három térirány közül csak egyben a rácsvektor szerinti, „végtelen számú” eltolás. A másik kettőben körív menti elmozdulással írható le a szerkezetben uralkodó rend, és ez eredményezi a krizotil csöves felépítését (**7.10.–7.12. ábra**). Hasonló ismétlődés jellemző a ma már ipari mennyiségben gyártott különböző *nanocsöves* műtermékekre. A hosszú távú rend ezen típusait valójában nem a kristályosság korlátainak, hanem éppen a kristályfogalom kiterjesztésének tekinthetjük.

A „vegyületség” korlátai

A természetes és környezeti folyamatok legfőbb eltérése a vegyész számára megszokott laboratóriumi körülményektől éppen a folyamatban részt vevő kémiai elemek sokfélesége. A természetben sosem találunk „steril”, „pro anal.” alkotókból felépülő rendszereket. Egy konkrét szilárd vegyület (ásvány) vizsgálatakor a képletében ismert elemektől eltérő kémiai elemek megjelenése általában a következő három ok közül egyre vagy többre vezethető vissza (**2.3. ábra**).

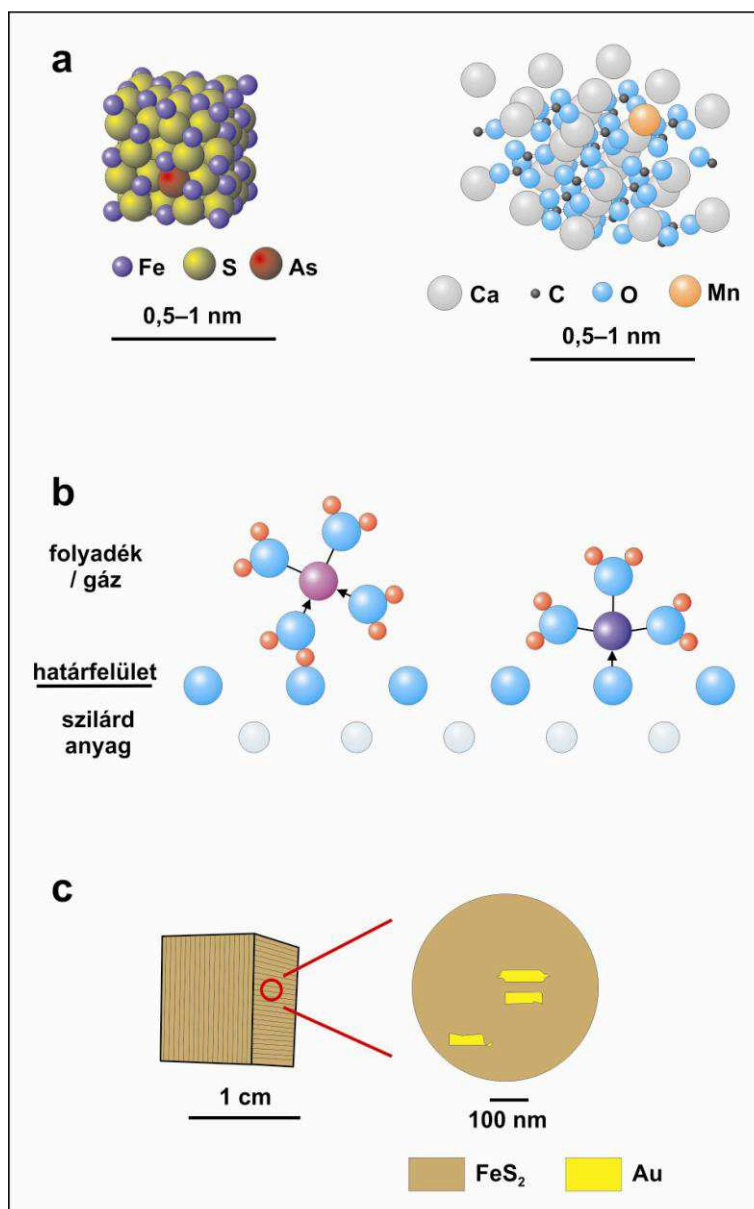
Az egyik ok, hogy a kristályrácsban a hasonló viselkedésű (pl. töltés, ionsugár stb.) *elemek helyettesíthetik egymást* (**2.3.a. ábra**). Erre azért nyílik mód, mert az ásványok többsége nem molekuláris vegyület. Az egy-egy atom/ion cseréje nyomán kialakult anyagot, ha a helyettesítés csak korlátozott mennyiségű (pl. minden tizedik, századik, ezredik atomnál történik), még az eredetivel azonos vegyületnek tekintjük, hiszen főbb tulajdonságaik azonosak.

Ennek egyenes következménye az is, hogy az ásványfajok megadott képlete mindig elvonatkoztatás eredménye. Például az a fent olvasott megállapítás, hogy a *kalcit* kalciumkarbonát (CaCO_3), a környezettel foglalkozó szakember számára azt jelenti, hogy ez a vegyület magában rejthet – és leggyakrabban rejt is! – még több, a kalciumhoz hasonlóan viselkedő kémiai elemet is (pl. magnézium, stroncium, mangán, vas, kobalt), a környezet-tudomány számára jelentős, század-tized százalék, vagy akár több százalék mennyiségben.

Ha az elemek, ionok közötti hasonlóság elegendően nagy, a helyettesítés a kristályrácsban két ásvány („két szélső tag”) között korlátlan, folytonos is lehet. Ilyenkor *elegykristályról*, vagy *szilárd oldatról* (angolul: *solid solution*) beszélünk.³

² A felfedezést 2011-ben kémiai Nobel-díjjal ismerték el.

³ Az elegykristályokat alkotó ásványfázisok esetében csak a szélső kémiai tagok kapnak nevet. A helyettesített fázist mindig annak a szélső tagnak a nevével jelöljük, amely kémiailag a meghatározó („50%-os szabály”).



2.3. ábra: A „vegyületség” korlátai ásványoknál.

Az ábra felső részén a kristályrácsban atomi szinten történő helyettesítésre látunk példát: a már megismert pirit- és kalkitkristályok egy részlete látszik. A piritben a kén helyére arzén (As) épült be, a kalkitban a kalcium helyére mangán (Mn). Az ábra középső részén vízmolekulákkal körülvezt ionok kötődnek meg egy kristály felületén. Az ábra alsó részén az ásványzárványokra látunk példát: az 1 cm-es piritkockába parányi, 100 nm-es aranzsemcsék (termésarany) záródtak be

Ezek a helyettesítések a természetes vegyületszoportok (ásványosztályok) mindegyikében jelen vannak. Nézzünk erre konkrét környezeti ásványtani példát az előbbi gondolat továbbfűzésével, a természetben ritkább stronciumion (Sr^{2+}) és a gyakori kalciumion (Ca^{2+}) viselkedésére a foszfátok ($[\text{PO}_4]^{3-}$) osztályában.

Az 1986-os csernobili reaktorbaletet után rövid ideig Magyarországon (is) vigyázni kellett a kalciumot tartalmazó ételekkel, például a tejjel. Mi volt ennek az oka, és mi köze lehet mindennek az ásványtanhoz?

A tejesdobozon olvashatjuk: „A tej kiemelt helyet foglal el mindennapi táplálkozásunkban, hiszen az emberi szervezet számára leghasznosabb fehérjét tartalmazza, valamint az egyik legfőbb *kalcium*- és vitaminforrásunk.” Kicsit lejjebb pedig ez szerepel: „A kalcium szervezetünknek fontos, mert gyerekkorban segíti a megfelelő *csont*tömeg kialakulását, felnőttkorban segít, hogy a *csontrendszer* erős és egészséges legyen, időskorban pedig segíti a *csonttriturálás* megelőzését.” Ha tudjuk ehhez, hogy az emberi (és állati) csontok szeretlen, fő merevítő alkotója egy foszfátásvány (*apatit*: $\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3(\text{OH})$, hexagonális), a Csernobil utáni tejfogyasztási riasztás máris érthetővé válik. A reaktorbalesetben keletkező és az esővel Magyarországon is a földre érő, jelentősebb mennyiségű sugárzó izotópok egyike a stroncium lassan (kb. 29 év alatt) feleződő sugárzó izotópja (^{90}Sr) volt. A lefelől kiülő sugárzó anyagot a tehének a fűvel együtt elfogyaszthatták, és ettől kezdve a stroncium mindenütt együtt mozgott bennük a kalciummal, így a belőlük lefejt tejben is megjelent. A sugárzó stronciumot is tartalmazó tejet azután saját csontképző sejtjeink hasznosítják, de e folyamat során a képződő *apatit*ba nemcsak a kalciumot, hanem – az ásványokra jellemző helyettesíthetőség miatt – a stronciumot is be fogják építeni. Ezért – ellenőrizetlen tejfogyasztás esetén – a kalcium „trójai falován” a sugárzó stronciumatomok is tartósan be tudtak volna épülni az emberi (és állati) csontokba, állandó, az emésztéssel ki nem ürülő, belső sugárveszélyt jelentve az élő szervezetek számára. Megjegyzésre érdemes, hogy a szilárd vegyületbe (ásványba) így beépülő sugárzó izotóppal annak ellenére komolyan kellett foglalkozni, hogy a rövid időtávon mérhető teljes sugárdózisnak csak kis részét tette ki, mert kockázata éppen abban rejlik, hogy a beépülés után még akár évtizedekig is hat a szervezetre, és nem távolítható el belőle.

Szerencsére Magyarországon a sugárszennyezés mértéke 1986 tavaszán a tejben elhanyagolható volt, így a riasztást hamar le lehetett fűjni.

Az ásványokban mért, képletükben nem szereplő, kis koncentrációjú elemeket az ásványtanban vagy a környezettudományban járatlan szakemberek gyakran illetik a „szennyező” kifejezéssel. Ez a szóhasználat a természetes és környezeti szilárd fázisoknál (ásványok) *helytelen*, hiszen az ásványok a képletükben is megjelenő *főelemeik* mellett, mindig tartalmaznak *mellékelemnyi* (kb. 0,1–1%), vagy *nyomelemnyi* (kb. 0,0001–0,1%) mennyiségben más elemeket is. A mellék- és nyomelemek a keletkezésük körülményeire visszavezethető, *fontos alkotói* az ásványoknak. A fenti példánál maradva, a környezetkutató vagy környezetmérnök számára a kalcit *nem* „kobalttal szennyezett”, hanem „kobalttartalmú”. (A „szennyező” kifejezésnek legfeljebb a *tiszta vegyszerekkel* dolgozó laboratóriumi vegyész szemszögéből lehetne értelme.)

A kémiai képlettől való eltérés másik oka lehet, hogy a parányi, μm alatti méretű környezeti anyagoknál fokozottan számolnunk kell a szemcsék *nagy fajlagos felülete* miatt ionok, vagy akár molekulák jelentősebb mértékű *felületi megkötődésével* is (**2.3.b. ábra**). Ilyenkor a felületen kötött anyagmennyiség a mai, korszerű kémiai elemanalitikai módszerekkel már jól kimutatható, esetenként akár a szilárd szemcsék tömegével is összevethető nagyságrendű lehet. E kémiai mérési eredmények – minden tisztítási, szeparálási, dúsítási igyekezetünk ellenére – valójában tehát egy heterogén rendszert (nem egy vegyületet) jellemeznek. Az ilyen rendszer környezeti, egészségi stb. viselkedése, hatása eltérő lesz attól, mintha az összes jelen lévő kémiai elem az adott vegyület kristályába épült volna be.

Egy harmadik lehetséges okkal, a *zárványokkal* is számolnunk kell ([2.3.c. ábra](#)), ha az idealizált kémiai összegképlettől való eltérésre keresünk magyarázatot szilárd vegyületeinknél. Ezek forrása, hogy a nagyobb szemcsék növekedése során mindig nyílik lehetőség más szilárd vegyületek kicsiny szemcséinek befogására-befogadására is (ásványzárványok). E szilárd zárványok, nano- vagy mikrométeres ásványösszenövések jelenthetik a kémiai változatosság harmadik fő okát.

Megjegyezzük, hogy a kristályosodás során befogott zárványok nemcsak szilárdak, hanem folyékony vagy gáz-, illetve vegyes halmazállapotúak is lehetnek. A gázok – kis sűrűségük miatt –, és a folyadékok – környezeti rendszerekben jellemző vizes oldatok híg volta miatt – ugyan a befogadó ásvány teljes elemzésekor általában elhanyagolható járulékot adnak, de a zárványok közvetlen elemzése mégis hordozhat fontos környezeti információkat. Gondoljunk csak az egyik legfontosabb, környezeti folyamatokban keletkező ásványra, a jégre. A grönlandi, évente hízó jégtakaróba befagyott levegő zárványok egyedülálló módon a több száz, vagy akár a több ezer évvel ezelőtti légkör összetételét (így pl. az üvegházgázok koncentrációját) is őrzik számunkra.

A *környezeti hatás* szempontjából meghatározó fontosságú, hogy a [2.3. ábrán](#) bemutatott lehetőségek közül melyik valósul meg. Ugyanaz a kémiai elemi összetétel például lényegesen nagyobb vagy kisebb toxicitást jelenthet, attól függően, hogy az adott nyom- vagy mellékelem milyen helyzetben, milyen kémiai kötésben van. Ezért a környezeti rendszerekben, ahol szilárd fázis (is) mindig jelen van, a hagyományos (környezet)kémiai vagy (környezet)geokémiai vizsgálatokat feltétlenül ki kell egészíteni ásványtani vizsgálatokkal is, meg kell tudni mondani, hogy a kémiai jellemzők hogyan oszlanak meg a szilárd és a nem szilárd fázisok között. Ezek a vizsgálatok – a környezeti ásványoknál jellemző kis szemcseméret miatt – gyakran nem egyszerűek. Itt nem csak arra gondolunk, hogy rutinszerűen kell drága eszközöket alkalmazni. Ezen eszközök használata önmagában csak szükséges, de nem elégséges feltétele az eredményes problémamegoldásnak. Az érzékeny, sokszor már a vizsgálat során is változó anyagok sikeres megismerése csak sok új, eredeti ötlet és kitartó kísérletezés révén válik lehetségessé. Ez az egyik ok, hogy a környezeti ásványtan még biztosan intenzív fejlődésben lévő tudományterület marad a 21. század első felében.

2.1.3. Az ásványok neve, magyar írásmódja és kiejtése

Az *ásványfajoknak* (egy-egy adott – idealizált – kémiai összetételű és kristályszerkezetű természetes vegyület) az egyszerűbb kezelhetőség érdekében nevet adunk („triviális név”). Az *ásványfajok neve* nemzetközileg egységes (a kevés kivételek egyike a jég!).

Korábban az *ásványváltozatoknak*, *ásványsoroknak* és *ásványcsoportoknak* is gyakran adtak külön nevet.

A *változatokat* egy ásványfajon belül valamilyen másodlagos tulajdonság (pl. szín, alak) alapján különítjük el. Ma a változatnevek használata nem támogatott, kikopóban van a szaknyelvből. A legismertebb kivételt az ellenálló ásványok esztétikus változatai, a *drágakövek*⁴ jelentik, itt megőrizzük és használjuk a változatneveket is. Például a gyakori és közönséges *korund* ásványfaj (háromszöges rendszerben kristályosodó alumínium-oxid,

⁴ Ahogy azt korábban, az ásvány definíció korlátainál tárgyaltuk, a 20. századtól az ékszeriparban is egyre szélesebb körben alkalmazzák a szintetikus ásványokat (szintetikus gyémánt, szintetikus rubin stb.). Ennek megfelelően ott a drágakő fogalom mellett megjelent a *szintetikus kő* fogalom is. Fontos, hogy a szintetikus köveket ne keverjük össze a műtermékekkel (lásd alább).

Al_2O_3) drágakő (szín)változatai a *rubin* (vörös) és a *zafír* (kék és színtelen). Egyes változatnevek továbbélhetnek ipari termékekben, például az azbeszteknél ilyen a *krokidolit* és az *amozit* név (lásd részletesen könyvünk második részében).

Arra is van példa, hogy egy korábban fajként használt név a tudomány fejlődésével magasabb rendszertani szintre (pl. sor, csoport) került. Az ilyen nevek használata – az új tartalommal – gyakran ma is indokolt (pl. *olivin*, *turmalin*).

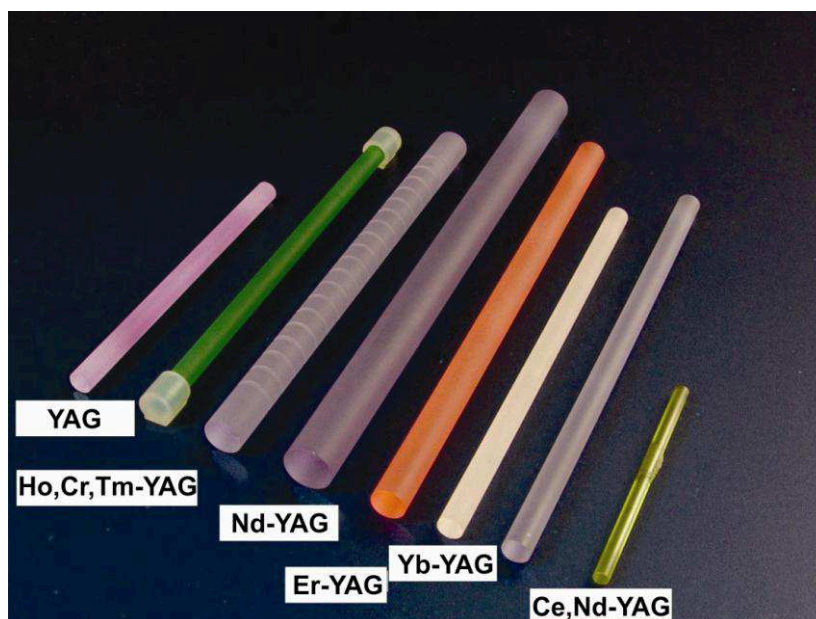
Ugyancsak van triviális neve néhány olyan ásványkeveréknek, amelyeket – például alkotó ásványaik parányi szemcsemérete miatt – a terepen nem tudunk pontosan leírni, de főbb jellemzőjüket mégis szeretnénk jelezni. Ilyen, a környezeti ásványtanban is fontos **terepi nevek** a *limonit* és a *manganomelán*.

Ahogy láttuk, maguk az ásványnevek nemzetközi, azonban a név *írásalakja* minden nyelvben eltér, alkalmazkodik az adott nyelv helyesírási és kiejtési szabályaihoz.

A magyarban törekszünk a *kiejtés szerinti* (fonetikus) írásmódra, így az ásványnevek jó része egyszerűen, az olvasott alakban ki is ejthető. Például *kvarc*, *kalcit*, *gránát*. A kivételt azok az ásványok jelentik, amelyek nevét latin betűs nyelvből átvett *tulajdonnévből* (pl. személynév, földrajzi név) származtatjuk. Ezeknél megőrizzük az eredeti írásalakot, például *goethit* – ejtsd: „gőtit” (német), *jarosit* – ejtsd: „harozit” (spanyol), vagy *grunerit* – ejtsd: „grünerit” (francia).

2.2. A műtermékek

Vannak olyan szilárd, kristályos, nem molekuláris vegyületek is, amelyek nem keletkeznek a természetben, csak a laboratóriumokban, műhelyekben, ipari üzemekben állítjuk elő őket. Ezeket a környezeti ásványtanban *műtermék*nek nevezzük. Műtermék például a cementgyártáskor keletkező *trikalciumszilikát* („alit” – Ca_3SiO_5 , háromhajlású), amellyel minden betonozásnál dolgozunk, vagy a modern kor informatikai technikája által alkalmazott ittrium-alumínium gránát (YAG – ejtsd: „jag”). De műtermék a kéményekből a légkörbe jutott és ott aeroszolként lebegő parányi (0,1–10 μm -es) szilárd vegyületek jelentős része is. Bár a műtermékeket (csak mesterségesen („szintetizálva”) állítjuk elő, rájuk, az egyértelműség érdekében, nem használjuk a *szintetikus* jelzőt, azt meghagyjuk a természetes anyagokkal kémiai és szerkezeti egyező laboratóriumi termékekre (pl. szintetikus kvarc). Nem is volna értelme „szintetikus YAG”-ról beszélni, hiszen nincs „természetes YAG” ([2.4. ábra](#)).



2.4. ábra: Rudakként növesztett YAG kristályok különböző kémiai helyettesítésekkel

A középkori ember szinte kizárólag a természet alkotta szilárd anyagokat (szűk értelemben vett ásványokat) használta. Az elmúlt 150–200 évben, és ezen belül is különösen az elmúlt néhány évtizedben ugrásszerűen megnőtt a csak az emberi tevékenység (laboratórium, ipari folyamatok) eredményeként előállt, természetben nem keletkező szilárd vegyületek (műtermékek) száma. Az ilyen anyagok tervezésére és gyártására mára már önálló műszaki-természettudományi tudományterület, az *anyagtudomány* fejlődött ki (2.1. ábra).

Környezeti szempontból sajnos azok a műtermékek a jelentősebbek, amelyeket nem tudatosan fejlesztünk ki, hanem amelyek ipari vagy mezőgazdasági folyamatok melléktermékeként, nem szándékoltnak kerülnek ki a környezetbe (erőművek vagy éppen autók légszennyezésének szilárd alkotói, ipari üzemek vízszennyezésének szilárd alkotói stb.).

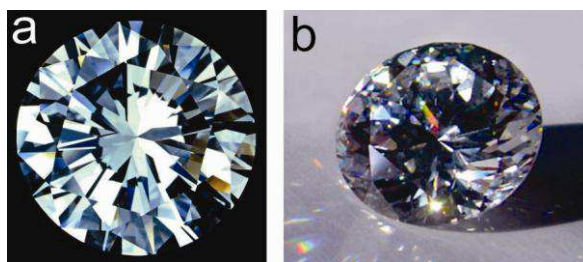
Mára a műtermékek száma jóval meghaladja a százezret, amely a négyezer-egynéhányszáz ásványfajhoz képest igen jelentős szám. A dolgok természetéből adódóan azonban a tágabb környezetünket meghatározó szilárd vegyületek többsége még ma is ásvány és nem műtermék.

A műtermékek a környezetbe kerülve az ásványokhoz hasonló módon kapcsolódnak be a környezeti folyamatokba (oldódás-mállás, aprózódás, kondenzációs mag stb.). Legtöbbjük viselkedése – a hasonló kristálykémiai tulajdonságok miatt – hasonló az ásványokéhoz, így a környezettel foglalkozó természettudományos vagy műszaki szakember számára az *ásványok és a műtermékek együtt kezelhetők* a környezeti ásványtan keretein belül.

Ezért a későbbiekben nem fogjuk rendszeresen kiemelni, hogy egy-egy leírt jelenség, tulajdonság mind az ásványokra, mind a műtermékekre igaz, a könnyebb olvashatóság érdekében legtöbbször csak „ásványt” jelzünk (és nem „ásványt/műterméket”), de fontos, hogy az olvasóban is tudatosodjék: környezeti szempontból nem megalapozott, így gondolatainkban sem, hogy külön kezeljük a két fogalmat.

Az előbbiekből is következik, hogy egy műtermék konkrét szemcséjét pontosan úgy kell jellemeznünk, mint egy ásványszemcsét (méret, alak; kémiai elemi összetétel; kristályszerkezet, lásd fent), és ezekből a tulajdonságokból már kémiai, fizikai, környezeti tulajdonságai is következni fognak.

A műtermékek csak egy kis részének van „triviális”, az ásványnévhez hasonló, egyszerű neve. Például a gyémántot ékszerekben helyettesítő, köbös szimmetriájú cirkónium-dioxid kapott nevet: *cirkónia* (**2.5. ábra**), de a legtöbb műterméket csak ennél bonyolultabban, kémiai összetételük és kristályszerkezetük egyidejű megadásával tudjuk leírni. Egyes szakmák speciális névkészleteket is használnak (pl. cementipar: *alit*, *belit*; kohászat: *fer-rit*).

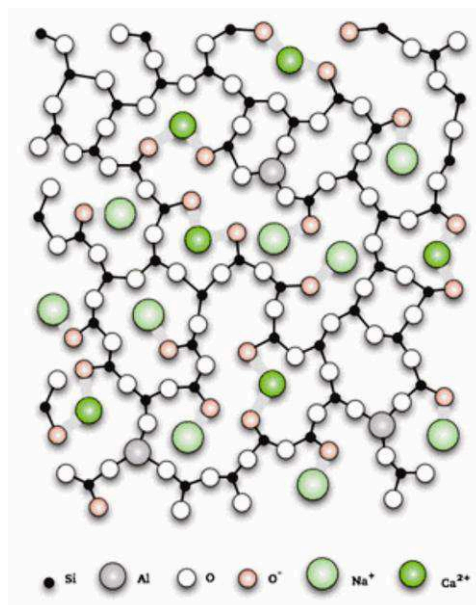


2.5. ábra: Gyémánt- (a) és cirkónia- (b) kristályok megcsiszolva

Megjegyzés: környezetünkben számos *műanyag* van jelen. Ezek a szerves *molekulákból* álló anyagok első pillantásra mutathatnak a műtermékekkel hasonló tulajdonságokat (állandó alak, felület, keménység stb.). Ennek ellenére a *műanyagokat*, valamint a műanyagok és ásványok/műtermékek keverékeiből alkotott *kompozit anyagokat* itt nem tárgyaljuk, mivel ezek ismeretéhez az ásványokétól eltérő kémiai, szerves kémiai alapok is kellenek, az ásványtan eszköztára ezek leírásához már nem elegendő.

2.3. Az üvegek

Az üvegek olyan nem molekuláris, kondenzált anyagok, amelyekben nincs meg a hosszú távú rend (nem kristályosak), de a felépítő atomokat jellemzően elsőrendű kémiai kötések kötik össze (rövid távú rend) folytonosan (**2.6. ábra**), ezért köznapi értelemben tulajdonságaik a szilárd anyagokéval azonosak (állandó alak, felület, keménység stb.). A kristályrács hiánya miatt kémiai összetételük széles tartományban változhat, így nem tekinthetők szűk értelemben véve vegyületeknek. Ugyanakkor egy konkrét üvegen belül általában a kémiai összetétel nem változik jelentősen, így van értelme az üvegeket kémiai elemzés alá vetni, és kémiai összetételüket megadni (ez nem azonos egy vegyület összegképletével!). Az, hogy az üvegen belül az elsőrendű kémiai kötések folytonosak, egyben azt is jelenti, hogy alapesetben az üvegben nincsenek külön fázisok, nincsenek benne belső (fázis)határok, így az üveg keveréknek sem tekinthető.



2.6. ábra: A folytonos üvegszerkezet sematikus rajza

Az üvegállapot legtöbbször olvadt anyag olyan gyors lehűlésével (vagy lehűtésével) keletkezik, amikor nincs idő az olvadékban a kristálycsírák kialakulására és növekedésére. Az üvegállapotot metastabilnak tekintjük, ebből következően a kémiaailag homogén üveg esetenként már kis energiaközlésre is kristályosodni kezd, kémiaailag heterogén kristályos fázisok keverékévé alakul, tulajdonságai megváltoznak. Megjegyezhető azonban az is, hogy a környezettudomány emberi léptékű (tehát évtizedekben-évszázadokban, és nem évmilliókban számoló) időskáláján igen sok üveg viselkedhet stabil anyagként.

Vannak természetes üvegek, mint például a vízbe ömlő lávából üvegesen megdermedő, a láva kémiai elemi összetételével – a víztartalmat leszámítva – megegyező kémiai összetételű *obszidián* és *perlit*. A mesterséges üvegek gyártása az emberiség korai történelmétől fontos, az üvegiparnak ma is és a jövőben is fontos szerep jut a fejlett gazdaságokban.

Az üvegek gazdasági jelentősége és környezeti hatása vegyületcsoportonként eltérő. A környezetben található üvegek legtöbbje *szilikátüveg*, így környezeti hatásuk a szilikátásványokéhoz lesz hasonló. A mesterséges üvegek egy részébe technológiai okokból vagy speciális célok (pl. dekoratív színek) érdekében olyan fémeket is beépítenek a gyártás során, amelyek később, a környezetbe kioldódva a hagyományos szilikátoknál nem várt környezeti kockázatot jelenthetnek.

Az azonos kémiai összetételű kristályos és üvegállapotú anyag környezeti viselkedése (pl. oldódás) lényegesen eltérő lehet, ezért egy anyag környezeti kockázatának értékelésékor elengedhetetlen a rendezettség állapotának ásványtani meghatározása. A környezeti szakembernek azzal is számolnia kell, hogy egy konkrét üvegállapotú anyag környezeti hatásáról esetleg csak ásványtani ismeretei alapján gondosan megtervezett laboratóriumi kísérletek (pl. szelektív oldás, oldási sorozatok elemzése) elvégzése után tud nyilatkozni.

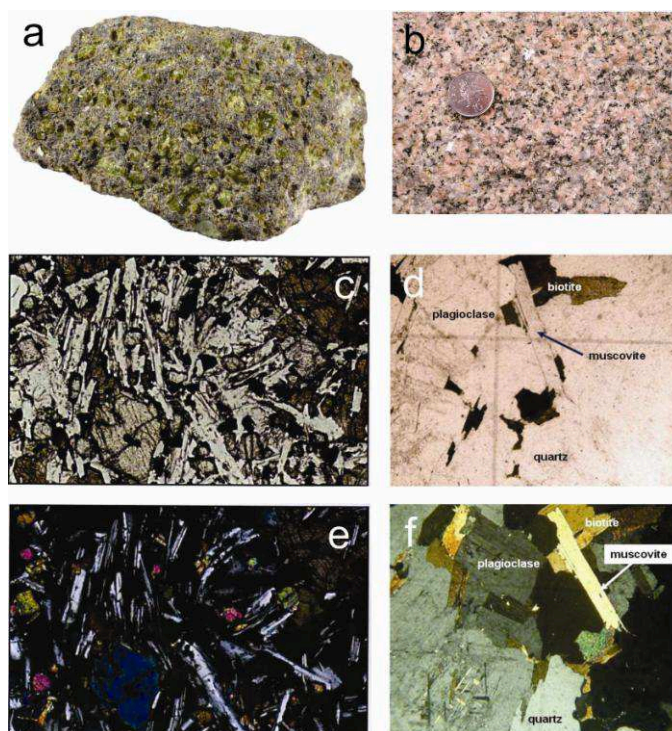
3. Az ásványok és a műtermékek keverékei

Az ásványok és a műtermékek *szilárd keveréke*iben több, nem molekuláris vegyület van jelen *fizikailag* egymás mellett. E vegyületeket egyszerű fizikai kapcsolatok, vagy bonyolult anyagszerkezetű, néhány atomnyi vastagságú (0,5–1 nm) határrétegek kötik össze. Általános esetben két ilyen szilárd vegyület között tehát nincs közvetlen kémiai kapcsolat, kémiai reakciók nélkül elválaszthatóak egymástól.

A környezetünkben található leggyakoribb, a gazdaság által is felhasznált természetes ásványkeverékek a *közetek*, az *ércek* és az *agyagok*. A részben vagy egészben mesterséges ásvány- és műtermékkeverékek száma nagy, ilyen például a *beton*, a különböző *durvakerámiák* (pl. téglá, cserép), *finomkerámiák* (ipari kerámiák, háztartási kerámiák – mosdókagylók, tányérok stb.) vagy éppen egyes ércdúsítási, ércfeldolgozási melléktermékek. A következőkben röviden áttekintjük a környezetben nagyobb tömegben található ásványkeverékek főbb jellemzőit.

3.1. A közetek

A közetek olyan ásványkeverékek (**3.1. ábra**), amelyek *földi léptékben* (1–10–1000 km) nagy kiterjedéssel, nagy tömegben jelennek meg. A közetek építik fel a Föld külső, mintegy 100 km vastag szilárd burkát, a *kőzetövet* (litoszféra), amely a Föld kérgét és a Föld köpenyének felső zónáját foglalja magában.



3.1. ábra: Két gyakori közet, a bazalt (a, c, e) és a gránit (b, d, f): fő tömegükben közetalkotó ásványok keverékei. c–f: Vékonycsiszolatról készült áteső fényes polarizációs mikroszkópi fotók (c és d: 1 nikollal; d és f: keresztezett nikollokkal)

A kőzetek fő tömegét az összes ásványfaj mintegy 1 százaléka, mindössze néhány tíz ásványfaj adja. Ezeket nevezzük *kőzetalkotó ásványoknak*.

A *kőzettípusok* számát (legfeljebb 100–150) a *nagy földi geológiai folyamatok* száma, és nem – a matematika (kombinatorika) szabályai szerint – az őket felépítő ásványfajok száma határozza meg.

A nagy földi geológiai folyamatok a Föld egymástól földrajzilag távoli pontjain, és sok tízszáz millió év időtávolságban is hasonlóan játszódnak le. A magyarországi Mátrát felépítő magmás kőzet (*andezit*) nevét a dél-amerikai Andokról kapta, mert az ott *most* működő vulkánok ugyanezt a kőzetet „gyártják”. A kőzet hasonlósága azt mutatja, hogy mintegy 15 millió évvel ezelőtt a mai Máttra helyén álló hatalmas vulkán alatt a mélyben hasonló geológiai folyamatok zajlottak, mint ma zajlanak a mai Andok vulkánjai alatt. E folyamatok leírását, megértését az elmúlt csaknem ötven évben már a *lemeztektonika* egységes szemléletű rendszere segíti.

Képződési módjuk szerint a kőzetek három nagy csoportba oszthatók: *magmás*, *átalakult* (metamorf) és *üledékes* kőzetek.

A Föld felszínén elhelyezkedő kőzetek fizikai alapját és kémiai hátterét adják a környezeti folyamatoknak. E folyamatok során a kőzetek egyes ásványai (vegyületei) kémiai alkatóikra bomolhatnak (*mállás*), míg mások stabilak tudnak maradni a környezet nyomás, hőmérséklet és kémiai koncentráció viszonyai között is. Utóbbiak fizikai *aprózódás* után, a szél vagy a felszíni vizek révén elszállítódnak. A mállás nyomán – legtöbbször egy teljes vagy részleges oldódáson keresztül – új, parányi szemcseméretű ásványok képződnek. Ezek laza, *nem konszolidált* (nem megszilárdult) halmaza található a *talajokban*, vagy a folyók, tavak, tengerek fenekén jellemző iszapban, hordalékban (*üledékek*). Az üledékek egy része később betemetődik, és – a környezeti szakemberek érdeklődési körén kívül eső, gyakran sok millió éves folyamat (kőzetképződés, diagenézis) során – megszilárdul, *üledékes kőzet* lesz belőle.

A kőzetek legtöbbje környezeti szempontból semleges. Ez természetes is, hiszen az élet kialakulása és fejlődése, az emberi civilizáció létrejötte a kőzeteken, a kőzetekkel egyen-súlyban történt. Ezért használhatja az ember a kőzetek nagy tömegeit környezeti szempontból kockázatmentesen, például építőanyagként.

3.2. Az ércék

Az ércék – a kőzetekhez hasonlóan – *ásványkeverékek*. Jellemzőjük, hogy belőlük *gazdaságosan* fémeket tudunk kinyerni.

Az ércnek tekintett ásványkeverékekben (**3.2. ábra**) a meghatározó, fémeket hordozó vegyületek az *ércásványok*.¹ A legtöbb fémnek csak néhány, soknak csak egy-egy vegyületét

¹ Az *ércásvány* fogalmat az ásványtanban részben más értelemben is használják. Az átlátszatlan (opak) szilárd vegyületeket nevezik így, függetlenül attól, hogy az adott vegyületből történik-e a gyakorlatban fémkinyerés. Ebben az értelemben például a bárium fém gazdaságilag legfontosabb vegyülete, a szintelen, átlátszó bárium-szulfát (BaSO_4 – *barit*) nem lenne ércásvány, míg a főként *kénsavgyártásnál* használt, köbös kristály-

tekinthetjük a gyakorlatban is az adott fém ércásványának, mert vagy nincs is több vegyülete, vagy ha van is, a mennyiségük és/vagy a kémiai jellegük miatt nem jöhetnek szóba a gazdaságos fémtermelésnél. A *vasércben* a *vasnak* például több ércásványa is lehet. Ilyenek a 72 tömeg% vasat tartalmazó vas-oxid ($\text{Fe}^{2+}\text{Fe}_2^{3+}\text{O}_4$), a *magnetit*; vagy a 70 tömeg% vastartalmú másik vas-oxid (Fe_2O_3), a *hematit*; vagy a 48 tömeg% vastartalmú vas-karbonát (FeCO_3), a *sziderit*. Ezzel szemben például a *molibdén* fémet adó ásványkeverékben, a *molibdénércben* általában csak egy molibdénvegyület, a *molibdenit* (molibdén-diszulfid, MoS_2) található a többi, nem hasznosuló (*meddő*) ásvány mellett.



3.2. ábra: Egy tipikus érc: ércásványok és meddőásványok keveréke

Minden kőzet tartalmaz fémeket, ám ezek kőzeten belüli *összmenyisége*, és/vagy a fémeket a kőzetalkotó ásványokban rögzítő *kémiai kötések erőssége* igen drágává tenné a kőzetek fémtartalmának kinyerését. Ezért az emberiség nem a 10–100 km léptékű ásványkeverékből (kőzetek) állítja elő a tiszta fémeket. Ezt megteheti, mert a Földön léteznek olyan különleges, ritkább geológiai folyamatok is (*ércképződés*), amelyek ugyan sokkal kisebb hatótávolságúak (sokszor csak pár száz méter, 1–2 km), ám eredményükként egyes fémek *igen nagy mértékben, földkéregbeli átlagukhoz képest akár milliószorosan is* felszaporodnak, így kitermelésük gazdaságossá válik. A kőzet és az érc viszonyát a **3.3. ábra** mutatja.



3.3. ábra: A két gyakori természetes ásványkeverék (kőzet és érc) viszonya. A legtöbb kőzetből nem tudjuk gazdaságosan kinyerni a fémet (nem érc), a legtöbb érc pedig sajnos földi léptékben nem olyan nagy kiterjedésű, mint a kőzetek. A kevés kivétel egyike az alumínium érce, a bauxit

Az ércek, mint a fémeket (gyakran nehézfémeket) nagy koncentrációban tartalmazó ásványkeverékek *komoly környezeti kockázatot jelenthetnek*. Különösen igaz ez, ha ezek a fémek kénnel alkotnak vegyületeket (*szulfidok*), mert e vegyületek víz jelenlétében, kör-

rendszerű, átlátszatlan vas-diszulfid (FeS_2 – *pirit*) igen. A példaként hozott kivételek ellenére a két értelmezés között igen nagy az átfedés, és bár a két értelmezés keveredik a mindennapok szóhasználatában, ez komolyabb zavart nem okoz.

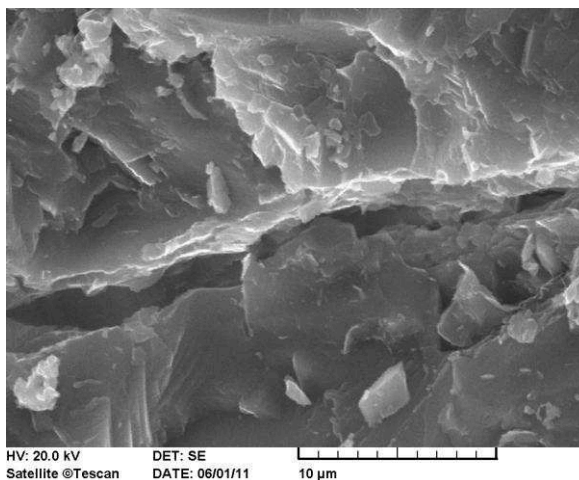
nyezeti körülmények között általában metastabilak, könnyen elbomlanak, és így alkotóik bekapcsolódnak a környezeti folyamatokba. Az eredmény egyidejű nehézfémzennyezés és savasodás-szulfátosodás ($[\text{SO}_4]^{2-}$ képződés) lehet.

3.3. Agyagok

Az agyag az emberiség által legkorábban felhasznált (nem érces) ásványi nyersanyag. Napon szárított agyagtéglákat 10 ezer éve már biztosan használtak. Ma a világ éves agyagbányászata 50–60 millió tonnára becsülhető.

Az agyag (angolul: *clay*) szót ma több értelemben is használják a különböző tudományterületek. Ez a kevert használat számos félreértéshez vezet nap, mint nap. A környezettudományban egyértelműen az *agyagtudományban (clay science)* általánosan elfogadott agyagmeghatározást célszerű alkalmaznunk, hiszen ez anyagközpontú,² és jól leírja mind a természetben megtalálható, mind a környezeti, mérnöki alkalmazásokban felhasznált anyagcsoport legfőbb tulajdonságait, viselkedését.

Az agyagok természetes ásványkeverékek (3.4. ábra). Jellemzőjük, hogy víz hozzáadására *formázhatóvá* (plasztikussá) válnak, és az így kialakuló (vagy kialakított) alakjukat szárítás után, megkeményedve is megőrzik. Ezek a hasznos tulajdonságok a keverékben jelentős mennyiségben jelenlévő *finomszemcsés* (mikrométer körüli szemcseméretű) *agyagásványokra* vezethetők vissza. A keverék egyéb ásványai – a szintén finomszemcsés „soványító” alkotórészek – is szerepet kaphatnak az agyagok ipari felhasználásánál, de lehetnek zavaró, a felhasználást korlátozó (pl. előnytelen szint eredményező) ásványok is jelen. Az agyagok alkotóinak tipikus szemcsemérete nem haladja meg a néhány tíz mikrométert.



3.4. ábra: Az agyagokban sem szabad szemmel, sem fénymikroszkóppal nem látjuk az ásványokat, a pásztázó elektronmikroszkóp nagyítása azonban már elegendő ezen anyagcsoport ásványkeverék jellegének megmutatásához

Az ipari gyakorlatban és a környezettudományban felhasznált agyagásványok kivétel nélkül *rétegszilikátok* (lásd később, a rendszeres ásványtani áttekintésnél). A főként *montmorillonit*ből álló ásványkeverék a *bentonit* (ipari név és közetnév is egyben), a fő-

² A geológiában, és ezen belül az üledékes közetekben található agyagfogalom erősebben a szemcseméret-hez és a keletkezési folyamatokhoz (mállás, aprózódás) kötött. A mérnöki gyakorlatban pedig az „agyag” akár egyszerű szemcseméret-tartományt is jelölhet, akkor is, ha az adott képződményben egyáltalán nincs agyagásvány, így tulajdonságai teljesen eltérőek (pl. nem plasztikus)!

ként *kaolin*től álló a *kaolin* (ipari név). Utóbbit a kerámiaipar, előbbit például a környezetvédelem (hulladéklerakók szigetelése) hasznosítja. A nagyon tiszta (kevés más ásványt tartalmazó) agyagtelepeket a *nemesagyag* névvel illeti az ipar. A téglá- és cserépipar által felhasznált különböző *közönséges agyagok*ban jellemzően többféle agyagásvány is jelen van.

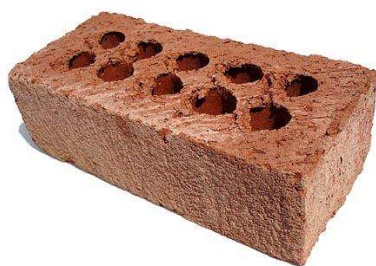
Az agyagok jellegzetesen környezetazonos anyagok, kémiai kockázatot esetükben csak a felületükön (hatalmas fajlagos felület!) esetlegesen megkötött (adszorbeált) anyagok jelenthetnek. Egyes agyagok fizikai viselkedése (duzzadóképeség, plaszticitás) fontos korlátozó tényező, melyet mind a környezettudománynak, mind a mérnöki tudományoknak figyelembe kell venni (lejtőcsúszások, suvadások, épületek emelkedése-süllyedése – falak repedése, vízzáró rétegek stb.).

3.4. Mesterséges építőipari keverékek (kerámiák, beton)

A környezetmérnök és környezetkutató elsősorban az épített környezetben, vagy az épített környezet elbontása nyomán találkozik ezekkel az anyagokkal. Az *agyagok* égetésével készített *téglákat*, *cserepeket* már évezredekkel ezelőtt is használta az emberiség, főként a terméskőben szegény, agyagban gazdag vidékeken. Az elmúlt 50–100 év tömegépítészetben pedig a *beton* vált uralkodóvá.

A *kerámiák* az *agyagok* (lásd fent) sok száz, akár ezer fokos hőkezelésével („égetésével”) készülnek.³ A keletkező kerámia keverék anyag (**3.5. ábra**). Rendkívül finomszemcsés (mikrométer alatti szemcseméretű), kémiaileg és fizikailag is igen ellenálló szilárd vegyületek (műtermékek és szintetikus ásványok) sűrű szövődéke alkotja. Egyes kerámiákban üveges részek is jelen lehetnek.

Az építőiparban használt *durvakerámiák* (tégla, cserép, csempe, padlólap) kiinduló anyagát hőre átalakuló (reaktív) *agyagásványok* (általában *réteges felépítésű szilikát* vegyületek) és az átalakulási folyamatban részt nem vevő, a kialakuló kerámia tulajdonságainak szabályozására felhasznált, a hőnek ellenálló, inaktív „töltőásványok” (például *kvarc*) alkotják.



3.5. ábra: A téglá kiégetése során a kiinduló ásványkeverék új, más kristályos vegyületeket (természetes és szintetikus ásványokat, valamint műtermékeket) tartalmazó keverékké alakul

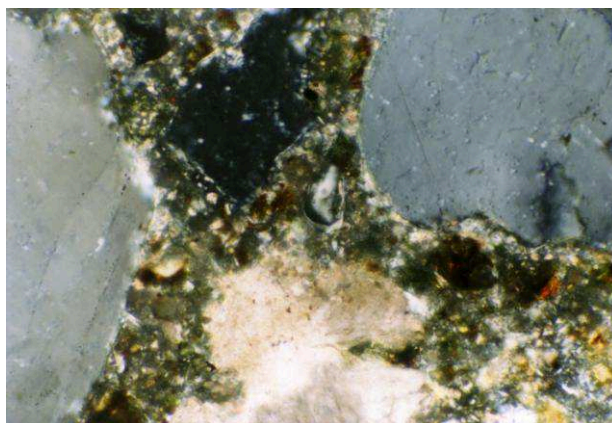
Egyes technológiákban kalcium-karbonátot (*kalcit*) is kevernek a kiinduló masszába, hogy a kerámia készítésnél kihasználják a hőbomlás (lásd [2.1.2.](#)) során létrejövő, kémiaileg igen reakcióképes kalcium-oxidot.

³ A folyamat nagyon hasonlít ahhoz, mint amikor a természetben az agyagot „megsüti” egy magas hőmérsékletű anyag, például a vulkánkitörésnél kifolyó láva.

A háztartások eszközeiként jól ismert *finomkerámiák* (pl. porcelántányérok, -csészék), illetve az ipar számos területén, például a számítógépek processzorainál felhasznált *speciális kerámiák* gyártása a durvakerámiákénál sokkal igényesebb, mind a kiindulási ásványkeverékek, mind az alkalmazott technológiai eljárások (égetések, hőkezelések stb.) tekintetében.

A kerámiák legtöbbjét természetazonos kiinduló anyagokból gyártják, és a gyártás során sem éri őket olyan hatás, amely környezeti kockázatot eredményezne. Ezek az anyagok tehát *környezeti szempontból semlegesek*.⁴ Sőt a kerámiákat bizonyos környezeti problémák elhárítására is használhatják: egyes veszélyes anyagokat kerámiába égetve, stabil szilárd vegyületekbe zárva lehet kivonni a környezeti folyamatokból.

A **beton** mesterséges kőzetnek tekinthető. A beton gyártásakor vízzel keverik össze a vele kémiai reakcióba lépő cementet (cementásványok⁵ keverékéből álló port). Ehhez a pépszerű anyaghoz különböző szilárd adalékanyagokat (kvarckavics, kőzetek vagy ipari termékek, pl. salakok őrléményei stb.) adnak. A pép néhány óra-néhány hét alatt kikristályosodik, benne ásványok, műtermékek kristálykái alkotnak szoros szövetet, közrefogva az adalékanyag durvább szemcséit (**3.6. ábra**). Az így megszilárdult beton fizikai tulajdonságaiban vetekedhet a legjobb építőkövekkel. Bár a betont sokszor környezetidegennek érezzük, valójában környezeti kockázatot csak akkor jelent, ha a hozzáadott eredeti adalékanyagoknak volt (kémiai) környezeti kockázata (pl. egyes salakok).



3.6. ábra: A beton a természetes homokkővekhez hasonlóan főleg kvarcból (szürke; lekerekített homokszemcsék) és az ezeket a szemcséket összekötő cementásványokból áll. Utóbbiak a cementporban található klinkerásványok hidratációjával keletkeznek. Ez a folyamat a beton kötése. (Fénymikroszkópos felvétel, képszélesség 3 mm)

3.5. Ipari műveletek melléktermékei, mesterséges ipari keverékek (pl. vörösiszap, flo-tációs és más ipari zagyok)

Ahogy a középkor embere a szántóföldi gazdálkodás elterjedése, vagy éppen a fenntarthatósági szemlélet nélküli fakitermelés révén már képes volt földi léptékben is jelentős terü-

⁴ A kerámiákat bevonó mázak azonban tartalmazhatnak mérgező (toxikus) fémvegyületeket.

⁵ A felhasznált cement maga is szilárd, kristályos vegyületek (műtermékek és szintetikus ásványok) keveréke. Leglényegesebb alkotói a *klinkerásványok*, amelyek mészkő és agyag keverékének (pl. márga) égetésével keletkeznek (cementégetés), és amelyek képesek a betonozásnál hozzákevert vízzel kémia reakcióba lépve új vegyületekké alakulni (hidratáció). A „megkötött” betonban már ezek az új vegyületek vannak jelen. (Lásd részletesebben később, a rendszeres ásványtani résznél.)

letek ökológiai egyensúlyát felborítani, úgy került a 20. század az ásványkeverékek tekintetében a környezeti feketelistára.

Ez volt az a század, amikor már nagy tömegben igényelte, bányászta és dolgozta fel az ipar az ásványi nyersanyagokat. De ez volt az a század is, amikor a napi gyakorlatban a gazdasági fejlődést még nem, vagy csak korlátozottan befolyásolta a környezet fenntarthatóságának igénye. E két tényező együtt azt eredményezte, hogy a földfelszín egy-egy pontján akár több tíz, vagy több száz négyzetkilométeren is megváltoztathatta az emberiség a természetes környezet alapját jelentő, a talpunk alatt található ásványkeverékeket.

Itt nem a talajok változására gondolunk, pedig talán a köznapi, környezeti problémákra nyitott, tájékozott embernek elsőként ez juthat eszébe. Nem a savasodás vagy éppen szikesedés, tehát nem azok a hatások szerepelnek itt, amelyek közvetett úton, a légköri szennyezések, vagy a felszín közeli vízháztartás megbontása nyomán eredményeznek új ásványkiválásokat.

Az ipari tevékenység nyomán nagy területeken több tíz, de akár száz méter vastagságban is kerültek, kerülnek környezetünkbe szilárd ásványkeverékek. Vonatkozik ez a bányászati meddőre, és az ipari műveletek során az eredeti, természetes keverékekből visszamaradó ásványokra csakúgy, mint az ezen műveletek során kristályosodó azon szintetikus ásványokra és műtermékekre, amelyek a gyártásban nem kerülnek további hasznosításra.

Ezek a mesterséges *ipari keverékek* mindenütt megtalálhatóak a környezetben a gazdaságilag fejlett országokban, és sajnos ma is nagy tömegben keletkeznek a fejlődő országokban. Ilyen anyagok millió köbméterei töltenek fel mély völgyeket, vagy vannak éppen elterítve síkságokon, meghatározva ezzel a környezetet.

A fejlett világban ma már nem szabad úgy bányát nyitni, és nagy tömegű ásványi nyersanyagot felhasználó ipari tevékenységet indítani, hogy már kezdetben ne lenne világos terv *valamennyi* megmozgatott kőzet- vagy érc típus felhasználására és/vagy fenntartható, környezetazonos elhelyezésére, visszatöltésére. A 20. század nyomainak ilyen szemléletű környezeti harmonizálása azonban biztosan kitölti a következő évtizedeket. Ebben a munkában világszerte kiemelt szerep jut a jelenleg képzett környezeti szakembereknek, hiszen sem a természetes anyagokra fókuszáló geológusok, sem a mesterséges anyagokban jártas gyártási technológusok képzése nem teljes körű ezen a téren.

Ezt bizonyító példaként álljanak itt az elmúlt évtized legnagyobb visszhangot kiváltó hazai környezeti katasztrófája, az Ajka melletti vörösiszap-tározó gátjának átszakadása során szerzett tapasztalataink.

A vörösiszap azon ipari folyamat során keletkezik, amikor az alumínium ércéből (bauxit) több lépcsős feldolgozás során előállítják a fém alumíniumot. E folyamat első lépésben a természetes ásványkeverékből kioldják az alumínium ércásványait (alumínium-hidroxidok és alumínium-oxi-hidroxidok), és a finomra őrölt természetes ásványkeverék visszamaradó többi ásványát (pl. kvarc, hematit), valamint a folyamat (timföldgyártás) során keletkező néhány szintetikus ásványt (pl. akermanit) tartalmazó új, ipari ásványkeveréket a feldolgozási hely közelében kialakított tározókba rakják le ([3.7. ábra](#)).



3.7. ábra: A 2010. évi vörösiszap környezeti katasztrófát okozó zagytározó. A lúgos zagy kifolyása után a tározó alján visszamaradt a finomszemcsés ásványkeverék

Mivel mind a bauxit, mind a keletkezett szintetikus ásványok környezetazonos, veszélytelen anyagok, így esetükben sem mérgezéstől, sem megnövekedett radioaktív sugárzástól nem kell tartani.⁶ Vagyis minden, ezen nem létező veszélyekről elhangzott híradás csak pánikkeltés, minden ezek elhárítására tett lépés⁷ fölösleges lenne. A konkrét tragédiában a veszélyes anyagot nem a szilárd vegyületek jelentették, hanem az a lúgos oldat, amelyben a finomra őrölt ásványokat a technológiai folyamat részeként szuszpendálták (zagy), és amelyet a lerakás során nem távolítottak el. Környezeti szempontból egyszerűsítve tehát a vörösiszap-tragédia elsődlegesen a környezet, az élővizek és az érintett települések hatalmas tömegű ipari lúggal történő elöntésének tekinthető. A baleset után bevezetett, *száraz* (nem zagyszerű) végeredményt adó új technológiával a hasonló tragédia veszélye megszűnik ugyan, de a lerakott ipari ásványkeverék környezeti harmonizációja még évtizedekig feladatot jelent majd a mérnököknek és kutatóknak.

Fontos kimondanunk azt is, hogy a tragédia megtörténte után a védekezést, a kárelhárítást nagyban nehezítette, lassította, hogy hiányoztak – ahogy még ma sincsenek kellő számban – a komplex környezeti anyag- és folyamatszempléletű szakemberek. Kiváló mérnökök, ipari vegyészek, geológusok, biológusok, fizikusok segítettek a legbiztonságosabb utak keresésében, de napok, hetek teltek el, mire ezen a valóban inter- és multidiszciplináris területen a különböző szemléletmódok, fogalomrendszerek annyira össze tudtak csiszolódni, hogy valódi párbeszéd alakulhatott ki.

E magyarországi friss környezeti katasztrófának van még egy fontos, általánosítható környezeti ásványtani üzenete is számunkra: a 21. században rendre számolnunk kell majd azzal, hogy az elmúlt 100–150 évben készült nagyméretű mérnöki objektumok, különösen, ha készítésükkor a fent ismertetett „modern” (az adott korban, új, korszerű) építőipari ásványkeverékeket használták fel, tönkremehetnek, és sokuk tönkre is fog menni. A leggondosabb mérnöki tervezés sem tudott ugyanis – tapasztalatok híján – számolni a múltban azzal, hogy 50–100 év alatt a természetes környezeti ásványtani folyamatok hatására ezek

⁶ Főként a mechanikai megmunkálásuk, a finom porrá őrlés miatt növekszik környezeti kockázatuk, hiszen így már egy részük a belélegezhető tartományba kerül, és tartós kitétség esetén a légutakban, a tüdőben vezethet megbetegedésekhez (pl. szilikózis). E témakört részletesen tárgyaljuk a könyv második részében, az azbesztek kapcsán. Emellett az alkalmazott Bayer-eljárás egyes nyomelemeket is dúsíthat.

⁷ Éppen ezen környezetazonos vegyületek kémiai veszélytelensége miatt volt azonban értelme a vörösiszap kémiai összetételét rendszeresen mérni: ha az iszaptározót szabálytalanul, a timföldgyártással össze nem függő veszélyes hulladékok (pl. galvániszap) illegális lerakására is használták volna, az erre jellemző mérgező elemek könnyen azonosíthatóak lettek volna.

az anyagok, vagy egyes alkotóik, átalakulnak, ezáltal mechanikai tulajdonságaik, állékony-ságuk, vízzáró képességük stb. lényegesen romolhat.

Ma sehol a világon nincs rendszeres forrás betervezve arra, hogy ezeket a nagy létesítményeket, ipari gátrendszereket, nagyvárosi csatornarendszereket stb. ilyen szemlélettel vizsgálják. De még ha egy-egy vizsgálatra sor is kerül, nagyon kevés olyan technológiai kutatás folyik, amely az így feltárt hibák elhárítását elfogadható árú eljárásokkal lehetővé tenné. Így marad – gazdagabb országokban – a problémás létesítmények hatalmas összegeket felemészítő teljes kiürítése, és új – 100 év múlva is álló (?) – mai normák szerint „modern” építményekkel való kiváltása, míg szegényebb országokban csak reménykedni tudnak, hogyha történik is baleset, az nem lesz tragikus vagy katasztrofális mértékű.

A vörösiszap-tragédia világosan megmutatta, hogy lehet arról tudományelméleti vitákat folytatni, hogy a környezettudomány hogyan illeszkedik a tudományok rendszerébe, ettől függetlenül azonban a társadalomnak égető szüksége van olyan szakemberekre, akik ezt a természettudományos alapú környezeti szemléletet és komplex gyakorlati ismeretanyagot betéve tudják és késlekedés nélkül alkalmazni is tudják.

Az eddig ismertetett természetes és mesterséges szilárd, nem molekuláris anyagfajtákra a **3.1. táblázat** hoz összefoglaló példákat.

MEGJELENÉSI HELY	TERMÉSZETES	MESTERSÉGES
Földön/földben	kőzetek , pl. gránit, mészkő, bazalt, márvány; érc ek, pl. bauxit, aranyérc, vasérc; a talaj szervesetlen alkotói	beton, salakok, téglák, tim-föld, csempék, padlóburkoló kőlapok
Vizekben	az iszap és a lebegő hordalék jelentős része	szennyvíziszapok jelentős része, ipari tevékenység (pl. ércdúsítás) melléktermékei
Légkörben	tengeri só kristályok a légkörben, vulkáni finom por , lebegő és szálló természetes porok (földfelszínről, talajról)	kémények „füstje”, pernye, lebegő és szálló ipari porok
Élőlényekben/emberben	szilárd vázelemek: CaCO ₃ – kalcit/aragonit (csigaház, kagyló) Ca ₅ [(PO ₄) ₃ (OH,F,Cl)] apatit/foszfátok (csontok, fogzománc, guanó) SiO ₂ – opál-A (egysejtűek váza) „kövek” : pl. Ca-oxalát (vesekő, növények kalciumraktározása)	csonthelyettesítő implantátumok (kerámia, fémötvözetek), kerámia fogpótlás

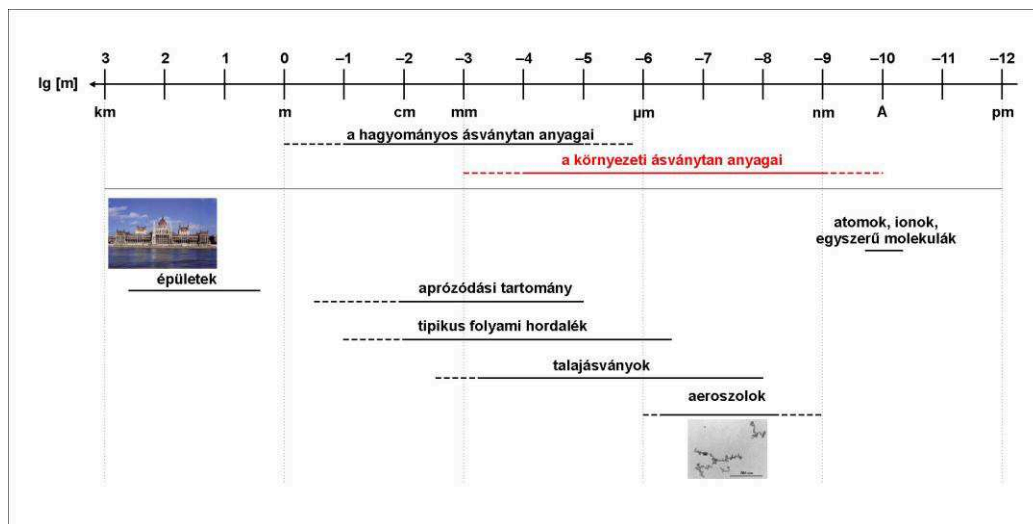
3.1. táblázat: Természetes és mesterséges szilárd, nem molekuláris anyagfajták a környezetben

4. A mérettartományok jelentősége a környezeti szakember munkájában

Láttuk, hogy a szilárd anyagoknak *mérete, alakja, határa, felülete* van.

Felmerül a kérdés, hogy melyik az a mérettartomány, amelyben a környezeti problémák megoldása során képesnek kell lennünk gondolkozni és dolgozni.

Az alsó határ elég pontosan megadható: a környezeti problémák megoldásához legtöbbször nem kell a kémia építőkövei, az atomok, ionok *tized nanométeres* mérete alá benézniük. A felső határt pedig a köznapi életünkben megszokott *méteres-kilométeres*, esetleg *ezer kilométeres* méretek jelentik (**4.1. ábra**). A lefedendő mérettartomány tehát mintegy *tizenhárom-tizenhat nagyságrend!*



4.1. ábra: A környezeti problémák megoldásakor figyelembe veendő mérettartomány, logaritmikus méterskálán. A felső határ a kilométeres nagyságrend (pl. hegyek), olykor akár 1000 km-ig (pl. légszennyezés terjedése egy földrajzi értelemben vett medencében). Az alsó határ az atomok mérete (10^{-10} m)

A *mindennapi ember tapasztalatai, gondolkodása* nagyjából e tág mérettartomány felső felét, a tized milliméter-pár száz kilométer tartományt fedik le. Az ennél kisebb tartományban való gondolkodást már *csak külön tanulással lehet elsajátítani*.

Ahogy arról a bevezetőben már szóltunk, és a későbbiekben példákkal is megmutatjuk, a környezeti folyamatokban szerepet játszó szilárd anyagok kivétel nélkül ebbe az alsó mérettartományba esnek (**4.1. ábra**), ezért a környezeti szakember nem takaríthatja meg az alsó hat nagyságrendben (tized nanométer-tized milliméter) való gondolkodás megtanulását. Ez még akkor is igaz, ha ezen bevezető jegyzetben csak néhány példával tudjuk bemutatni e készség elsajátításának fontosságát.

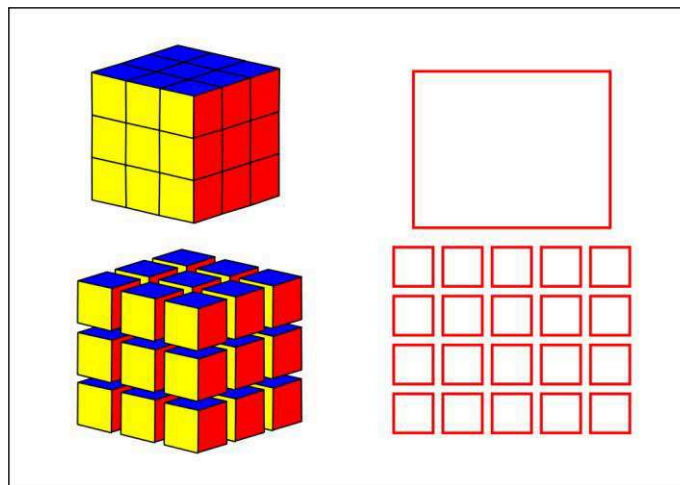
4.1. A felület jelentősége és méretfüggése

A környezeti folyamatok során az ásványok (szilárd anyag) viselkedését elsősorban a *kémiai és biokémiai kölcsönhatások, egyensúlyok* szabják meg. A hőmérséklet és különösen a nyomás szerepe másodrendű. A *(bio)kémiai kölcsönhatások* az ásványszemcsék *felületén* játszódnak le, legyen szó akár a szemcse visszaoldódásáról vagy növekedéséről, akár molekulák, ionok felületi megkötéséről (*adszorpció*). Ebből következik, hogy ezeknek a reakcióknak a gyorsasága, környezetre gyakorolt hatása arányos lesz az ásványok *szabad felületével*.

Vizsgáljuk meg a szabad felület méretének változását a szemcseméret változása során, ha az anyag mennyisége nem változik. A feladatban gondolhatunk például a *kvarcra* (SiO_2 , háromszöges) mert ez az ásvány a fizikailag és kémiaailag is ellenálló ásványok közül a leggyakoribb a környezetünkben.¹

Példánkban a szemcse alakját, a számolás egyszerűsége kedvéért, mindig tekintjük *kockának* (4.2. ábra). Egy, a homokban jellemző méretű, 1 mm élhosszúságú szemcse felülete 6 mm^2 ($=6 \times 1 \text{ mm}^2$). Ha ez a szemcse tizedakkora ($=100 \mu\text{m}$) élhosszúságú szemcsékre esik szét az aprózódás során, akkor már *ezer darab* (10^3 db) kocka lesz belőle, egyenként *századakkora* (10^{-2}), $0,06 \text{ mm}^2$ felülettel ($=6 \times 0,01 \text{ mm}^2$). Így mintánkban a teljes szabad kvarcfelület – a tömeg változatlansága mellett – tízszeresére ($10^3 \times 10^{-2}$), 60 mm^2 -re nő.

Mire ugyanez a szemcse továbbaprózódva eléri a folyóvizekben, levegőben szállított kvarcsemmékre jellemző alsó mérethatárt, az *1 mikrométert*, vagyis kiindulási méretének ezredrészére csökken, akkor már *egy milliárd darab* (10^9 db) parányi kockánk lesz, egyenként milliomodnyi (10^{-6}) felülettel, tehát a mintában *a kvarc teljes szabad felülete*, ezáltal adszorpcióképessége stb., *ezerszeresére* ($10^9 \times 10^{-6}$) nőtt anélkül, hogy változtattuk volna benne a kvarc mennyiségét. Hasonlóan továbbgondolva láthatjuk, hogy azonos összterfogat mellett, a légkörben lebegő, 10 nm-es ásványszemcsék *felülete*, *ezzel reakcióképessége is százezerszerese* egy 1 mm-es szemcséének.



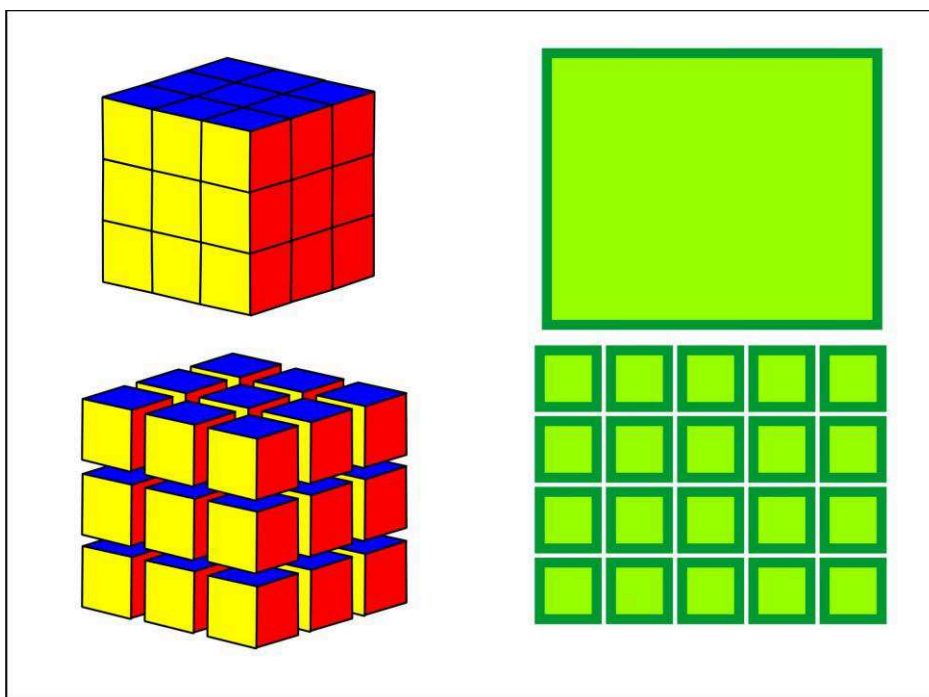
4.2. ábra: Kockával modellezett szemcse aprózódása. Az aprózódási modellben a nagy kocka sok kicsire aprózódik szét, hasonlóan ahhoz, ahogy a Rubik kocka sok kis kockából épül fel. Az összterfogat (és összterfogat) változatlansága mellett a szabad felület nő

¹ Ez az oka annak, hogy általában a *homok* is főként apró kvarcsemmékből áll.

4.2. A felületi szerkezet jelensége és jelentősége a méretváltozással

A hagyományos ásványtanban, amely a mikrométernél, milliméternél nagyobb ásvány-szemcsékkel foglalkozik ([4.1. ábra](#)), az atomok rendjét leíró kristályrácsot, egyszerűsítve, *végtelennek* tekintjük. Nem foglalkozunk azzal, hogy pontosan *hogyan végződik egy kristály*, mi történik a felszínéhez közeli atomokkal, ionokkal. Tesszük ezt annak ellenére, hogy nyilvánvaló: magán a határon az atomok, ionok közvetlen környezete más, így a kémiai kötések, és emiatt a kialakuló rövid távú rend is más lesz, mint a kristály belsejében. Egy valódi (véges méretű) kristályban tehát meg kell különböztetnünk a belső, *térfogati (kristály)szerkezetet* a külső, vékony „kéreg” szerkezetétől. Utóbbit a következőkben *felületi szerkezetnek* nevezzük.

Az, hogy a hagyományos ásványtan mérettartományában egyszerűsíthetünk, és a *felületi szerkezet elhanyagolása* mellett mégis használható eredményeket kaphatunk, abból adódik, hogy a felületi szerkezet csak a felület közvetlen közelében lévő, *néhány atomnyi vastagságú* „kéregre” terjed ki. Az ebben a „kéregben” található atomok mennyisége egy *nagy kristálynál elhanyagolható* a belső (*térfogati*) szerkezetbe rendeződő atomok számához képest ([4.3. ábra](#)).

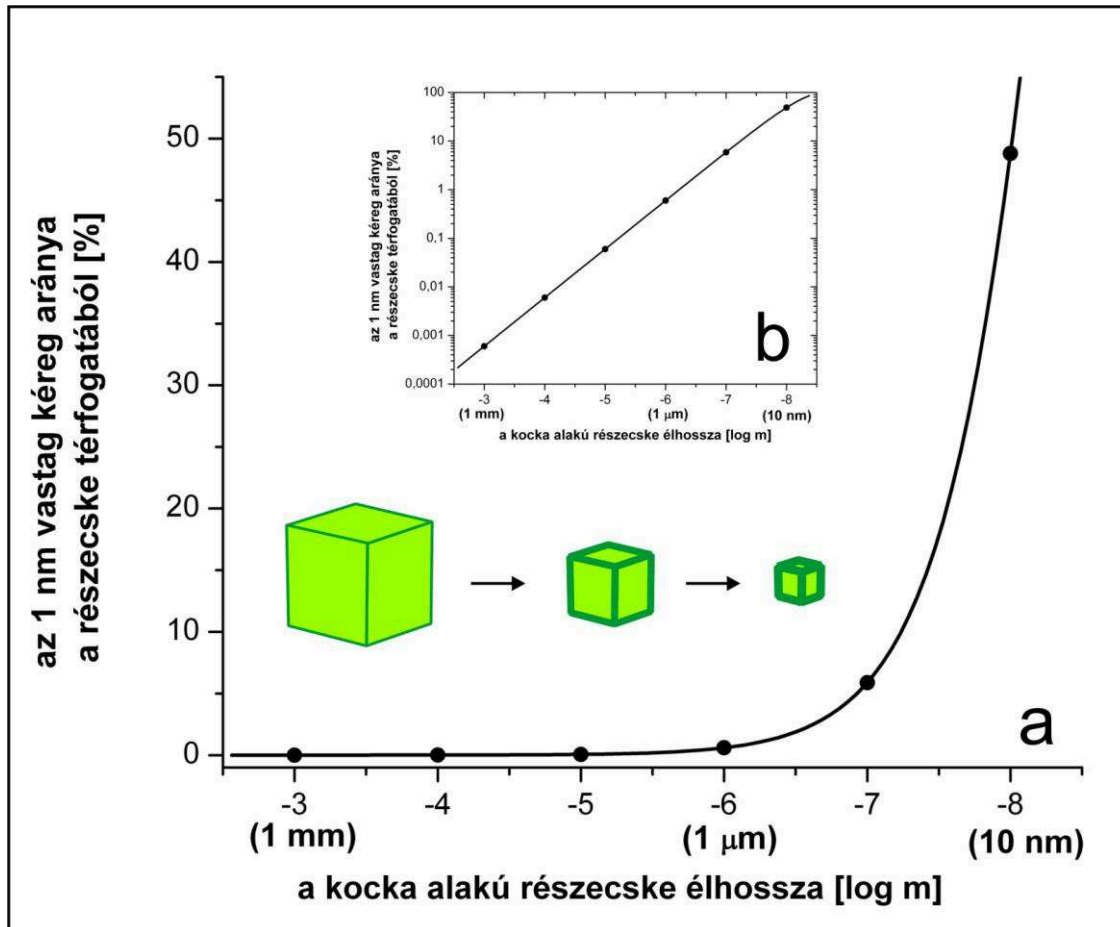


4.3. ábra: A szilárd anyagok határán nm-es vastagságú felületi szerkezet alakul ki. A szemcseméret csökkenésével a felületi (sötétzöld) és a térfogati (világoszöld) szerkezet egymáshoz viszonyított mennyisége a felületi szerkezet javára tolódik el. Ez fontos szerepet kap abban, hogy a környezeti folyamatokban szereplő parányi ásvány szemcsék másként viselkednek, mint mm-es, cm-es társaik

A szemcseméret csökkenésével a helyzet jelentősen megváltozik. Nézzük hogyan! Ha a *felületi szerkezet vastagságára*, felső becslésként, *1 nm-t adunk*, és megvizsgáljuk, hogy a fenti példánknál, az 1 mm-es kockakristály esetében mit tapasztalunk, látszik ([4.4. ábra](#)), hogy az atomok 99,9994%-a a térfogati szerkezetbe rendeződik, és még egy 1 μm -es kristálynál is 99,4% a térfogati szerkezet részesedése. Az is látszik azonban, hogy a szemcseméret további csökkenésével már rohamosan nő a felületi szerkezetbe rendeződő

atomok aránya: egy 50 nm-es szemcsénél 11%, egy 10 nm-es szemcsénél már 50%. *Vagyis a környezeti rendszerekben, környezeti folyamatokban kiemelten fontos nanométeres mérettartományban a felületi szerkezet egyre meghatározóbbá válik.*

A következmény, hogy lényegesen módosulhat, és módosul is, egyes szilárd vegyületek viselkedése. Ezekre az ásvány szemcsékre *már nem lehet automatikusan kiterjeszteni* a velük egyező kémiai összetételű makroszkopikus ásványoknál mért adatokat, mint például a földi üvegházhatást befolyásoló elektromágneses sugárzások (ultraibolya, látható, infravörös) elnyelését, átocsátását, a kémiai kölcsönhatásokat befolyásoló oldhatóságot, vagy a molekulák megkötését és a kondenzációt meghatározó felületi töltést, és annak eloszlását.

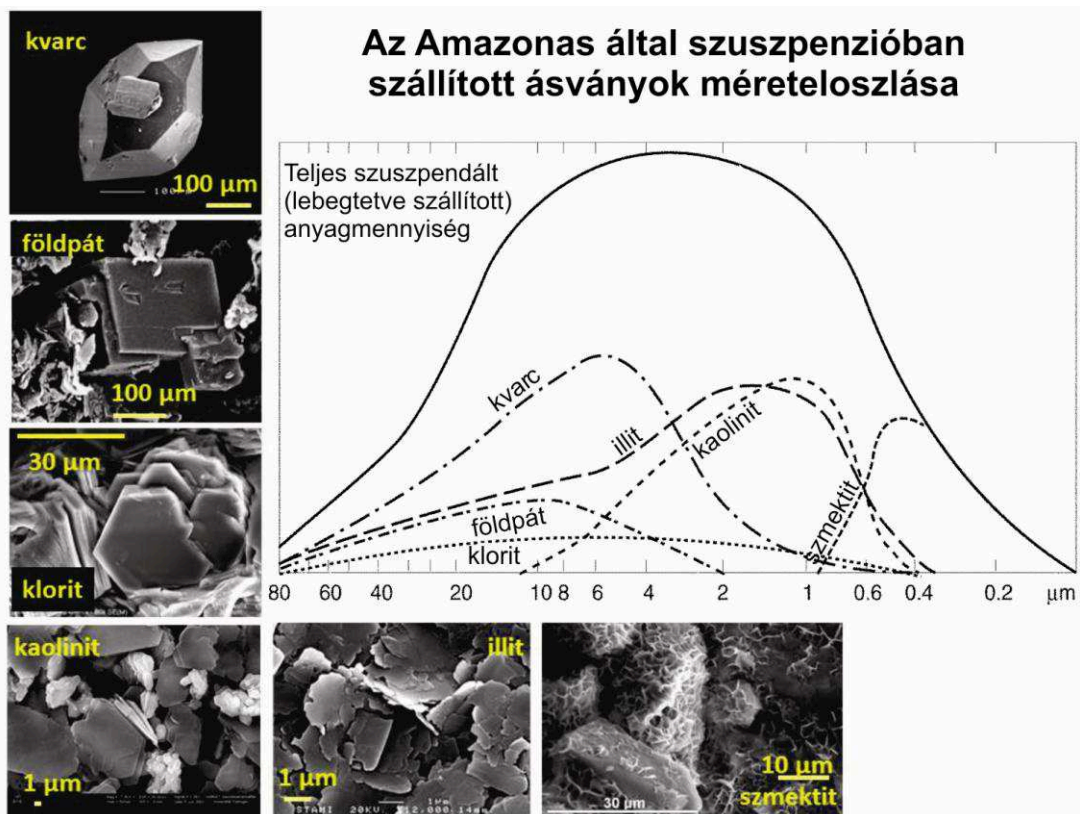


4.4. ábra: Egy 1 mm élhosszúságú kockával modellezett szemcse aprózódása során a csökkenő mérettel a felületi szerkezetű kéreg térfogatarányának növekedése. A felületi szerkezet részesevé a mikrométeres szemcseméret alatt kezd meghatározóvá válni (a: lineáris %-skála; b: logaritmikus %-skála)

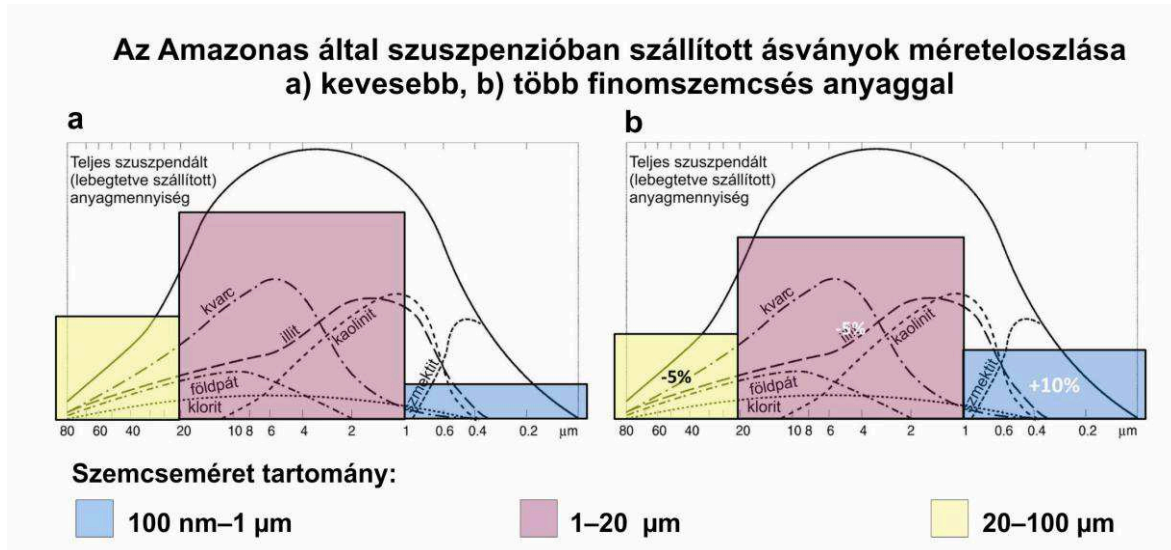
4.3. A méret, a tömeg és a részecskeszám kapcsolata

A környezet állapotának jellemzésére gyakran használjuk a levegőben, vizekben lebegő szilárd részecskék (ásvány szemcsék) számát (pl. darab/cm³), vagy a lebegő tömeget (g/cm³, mg/mm³, pg/μm³). Érdekes egy pillantást vetnünk arra, hogy ezek a mutatószámok hogyan kapcsolódnak össze a részecskék méretén keresztül. Ha ismerjük a rendszerben megjelenő ásványfajokat is, akkor – a méret mellett – ezek jellemző alakja segítségével a felület változására is jó becslést tudunk készíteni.

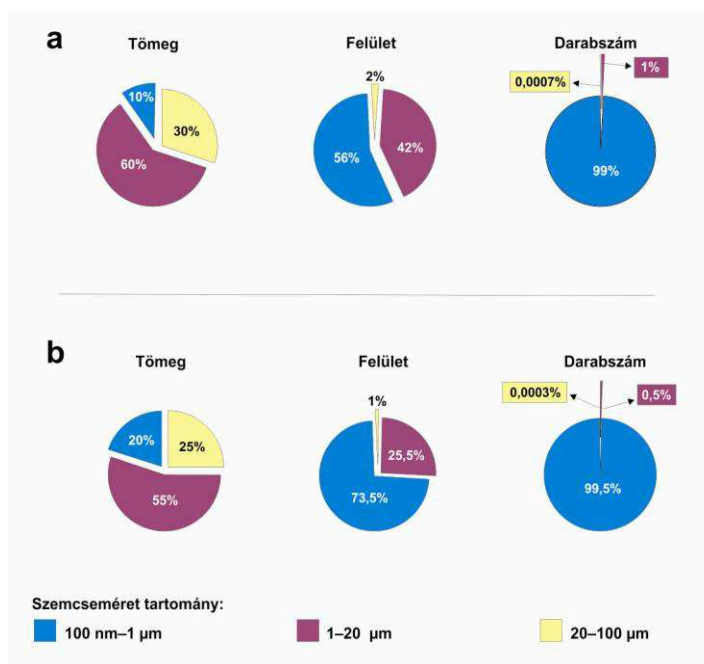
Tegyük fel, hogy egy folyó által lebegtetve szállított hordalékszemcséket méret szerint osztályozva a teljes tömegből 30% esik a 100–20 μm -es mérettartományba, 60% a 20–1 μm és 10% az 1 μm –100 nm tartományba. A durva frakció főként aprózódó *törmelékes ásványokból* (kvarc, földpát, klorit, csillám) áll, a közepesben ezek mellett már megjelennek, a finomban pedig kizárólagossá válnak a környezeti folyamatokban keletkező *agyag-ásványok* (illit, kaolinit, szmektit, [4.5.-4.6. ábra](#)).



4.5. ábra: Folyó lebegtetett hordalékának tömegeloszlása méret szerint, és ezen belül az alkotó ásványok méretei szerint. Ezt a valós, mért helyzetet modellezi egyszerűsítve a [4.6.](#) és [4.7. ábra](#).



4.6. ábra: A folyóban szállított szilárd vegyületek méreteloszlása. A színes téglalapok az egyes mérettartományokba eső tömeghányadot jelzik. Ezen egyszerű modellek alapján készült a 4.7. ábra. Ha ugyanezeket a méretfrakciókat nem a hozzájuk tartozó szemcsék összességével, hanem a darabszámmal jellemezzük, egészen más képet kapunk: az összre alárendelt, legfinomabb frakció teszi ki a lebegtetett teljes szemcseszám zömét (99%!), míg a két nagyobb (az összesség 90%-át kitevő!) mérettartomány szemcséinek darabszáma szerint elhanyagolható (4.7.a. ábra).



4.7. ábra: Folyó lebegtetett hordalékának modellezése 10 tömegszázaléknál (a) és 20 tömegszázaléknál (b), környezeti szempontból különösen fontos, finom frakcióval (100 nm–1 µm). A hordalék teljes felületének már 10% finom frakció esetén is több mint felét adja a finom frakció, a hordalék darabszámát mindkét esetben a finom frakció határozza meg

A szemcsék felülete esetében is a kis mérettartomány lesz a domináns (4.7.a. ábra), és az is jól látszik, hogy a legkisebb frakció mennyiségének már szerény növekedése is jelentősen megnöveli az összfelületen belül a finom frakció jelentőségét (4.7.b. ábra).

Megjegyzés: mivel a durvább frakciók abszolút mennyisége nem változott nagyon, így tényleges felületük sem csökkenhetett lényegesen. Ebből könnyű észrevenni, hogy a finom frakció viszonylagos (relatív) felületi jelentőségének növekedése csak a – változatlan össztömegű, de más szemcseméretű lebegő anyaghoz tartozó – tényleges (abszolút) felület növekedése révén valósulhatott meg. Így is van, a 25/55/20%-os frakciónkénti tömegmegoszlású anyag egységnyi tömegére jutó (abszolút) felület mintegy másfélszerese a 30/60/10%-osénak.

Hasonló jelenséget tapasztalhatunk a légköri aeroszoloknál is, csak néhány nagyságrenddel lejjebb (80 nm–500 nm). Ennek jelentőségét akkor érthetjük meg, ha figyelembe vesszük, hogy például a felhőképződésnél a kondenzációt a kondenzációs magok száma, és nem a tömege befolyásolja elsődlegesen, vagyis ha elegendően kicsik a részecskék, akkor már egészen elhanyagolható tömegű lebegtetett anyag is komoly kondenzációs hatást fejthet ki.

Összefoglalásként megállapíthatjuk, hogy egy olyan rendszerben, ahol több nagyságrendnyi eltérés van a szabad szemcsék méretében – és a környezetünk ilyen! –, a legkisebb mérettartomány szemcséi a *számuk* és *felületük* alapján, a legnagyobb mérettartomány szemcséi a *tömegük* alapján vesznek részt a folyamatokban.

4.4. A szemcseméret jelentősége az ülepedő és szálló por példáján

Az otthoni portörlet az ásványgyűjtés sajátos formája: a por legjelentősebb részét a mikrométeres nagyságrendekbe tartozó ásványszemcsék alkotják. Az út fölvert pora néhány perc alatt elül. Az e porokban található ásványok jellemző sűrűsége csaknem háromszorosa a víz sűrűségének, ezért ha levegőbe jutnak, például a szél felkapja őket a földről, a gravitáció hatására igen gyorsan vissza is ülnek. Ezek az *ülepedő porok* (4.8. ábra). Azonban ha a szemcseméret, és ezáltal a szemcse tömege elegendően kicsi, akkor már lesznek olyan erők a levegőben, amelyek a gravitációval összemérhető hatásúak, de irányuk eltérő. Ilyen erő származhat például a levegő mozgásából. Az erők eredőjeként a szemcsék kihullása lelassul, a szemcsék *szálló porként* hosszabb időt tölthetnek a levegőben, és akár nagy utat is megtehetnek benne. Ha a szemcseméretet tovább csökkentjük (<100 nm), akkor már más, a szemcseméretet és a szemcsék anyagi összetételét változtató fizikai-kémiai hatások is jelentkeznek, a folyamatok bonyolultabbá válnak. A szálló és a lebegő részecskék aeroszol² összefoglaló néven évtizedek óta a légkörkutatók számára is nagyon fontosak.

² Fontos szem előtt tartani, hogy az aeroszoloknak csak egy része szilárd anyag (szemcse). Más részük szilárd és folyékony (oldatok) keveréke, és jelentős a csak folyékony (oldat) cseppek aránya is.

Skála	Aeroszol	Por
1000 μm		Ülepedő por
100 μm	Óriás részecskék	<i>Settled dust</i>
10 μm	<i>Coarse mode</i>	Szálló por <i>Airborne dust</i>
1 μm	Nagy részecskék <i>Accumulation mode</i>	
0,1 μm	Aitken-féle részecskék <i>Nucleation mode</i>	
0,01 μm		

4.8. ábra: A porok (ülepedő és szálló por) és az aeroszolok osztályozása a szemcseméretük alapján

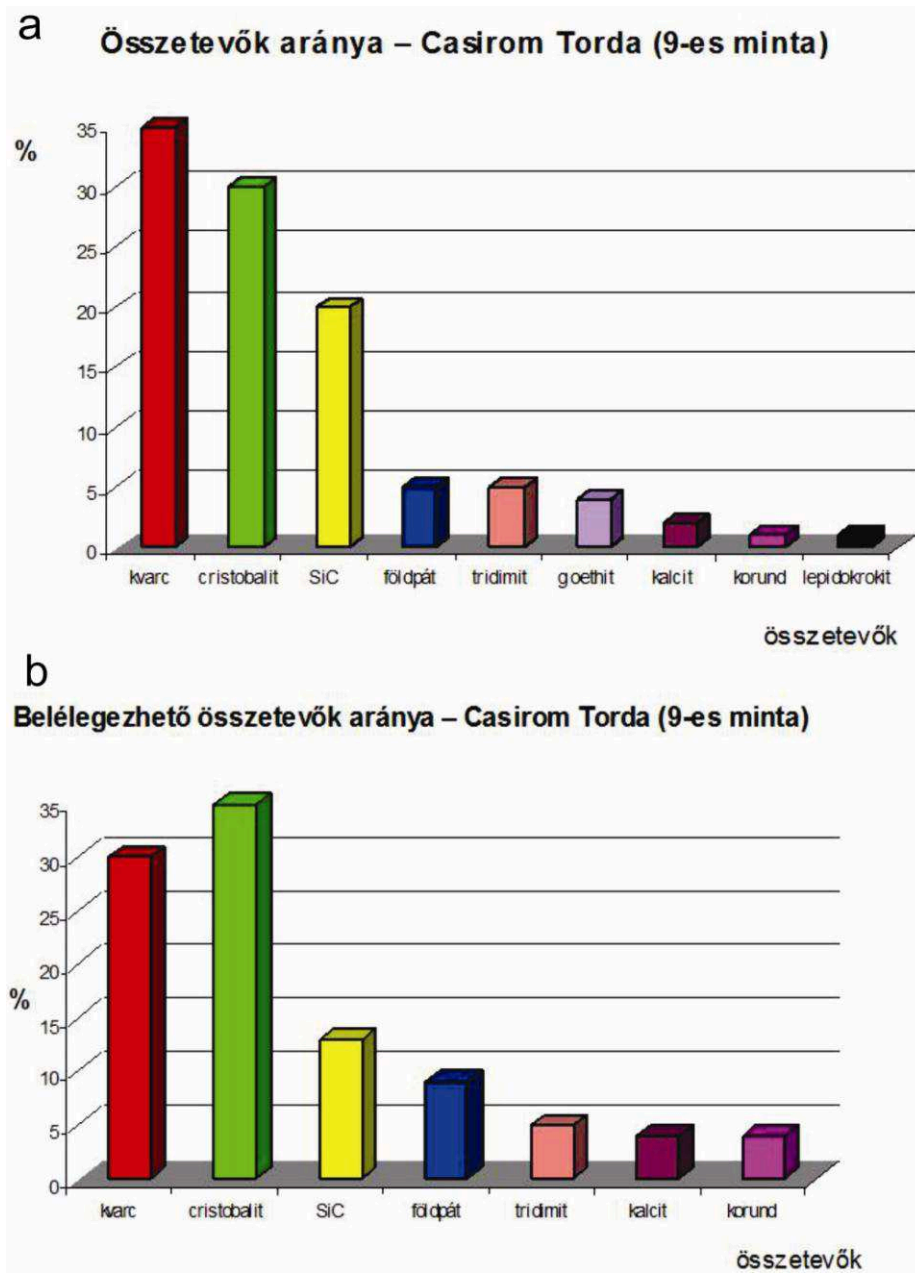
A környezeti ásványtan szemlélet- és eszközrendszere természetes módon köti össze és teszi folytonossá az átfedő felső (por) és alsó (aeroszol)³ mérettartományokat **4.8. ábra**.

Ma már a reggeli időjárás-jelentésben ugyanúgy közlik a 10 mikrométeres (PM10) és a 2,5 mikrométeres (PM2,5) szilárd részecskék városi levegőben való koncentrációját, mint ahogy a hőmérsékletet vagy a páratartalmat.

Mivel ugyanaz a (szilárd) vegyület teljesen más élettani hatást válthat ki a garatban és a tüdőben, világos, hogy egy adott munkahelyen a por kockázatát elemezve nem elegendő, ha külön-külön tudjuk, hogy milyen szilárd vegyületekből áll, illetve, hogy milyen a szemcsék méretének eloszlása: *a szemcseméret eloszlását vegyületenként kell ismernünk*. Ez a mai környezeti ásványtan egyik legfontosabb alkalmazási területe. A **4.9. ábra** mutatja, hogy egy vizsgált városi gyárudvaron a szilícium-dioxid kristályos módosulatai közül a nagyobb egészségi kockázatú cristobalit, bár a teljes porban mennyisége kisebb a kvarcnál, a mélyen a tüdőbe jutó mérettartományban a porszemcsék között már uralkodóvá válik. Az ilyen por kockázatát tehát alábecsüljük, ha nincs ásványtani információnk minden szemcseméret-tartományban.

Mindezek ismeretében nem nehéz megjósolni, hogy ugyan a mai szabványok még nem írják elő, de a közeli években már igény lesz arra is, hogy a PM10 és PM2,5 részecskék *mennyisége* mellett ismerjük ezen szemcsék *anyagát, kémiai összetételét, kristályszerkezetét* is: tudjuk, hogy természetes kvarc, kalcit, csillám, valamilyen ipari műtermék, vagy esetleg csak virágpór, pollen kavargó a levegőben.

³ Több alkalmazási területen az aeroszol fogalmába beleértik az ülepedő és szálló por mérettartományát is.



4.9. ábra: Eltérő egészségi kockázatú szilárd vegyületek arányának változása ülepedő por különböző szemcseméretű frakcióiban

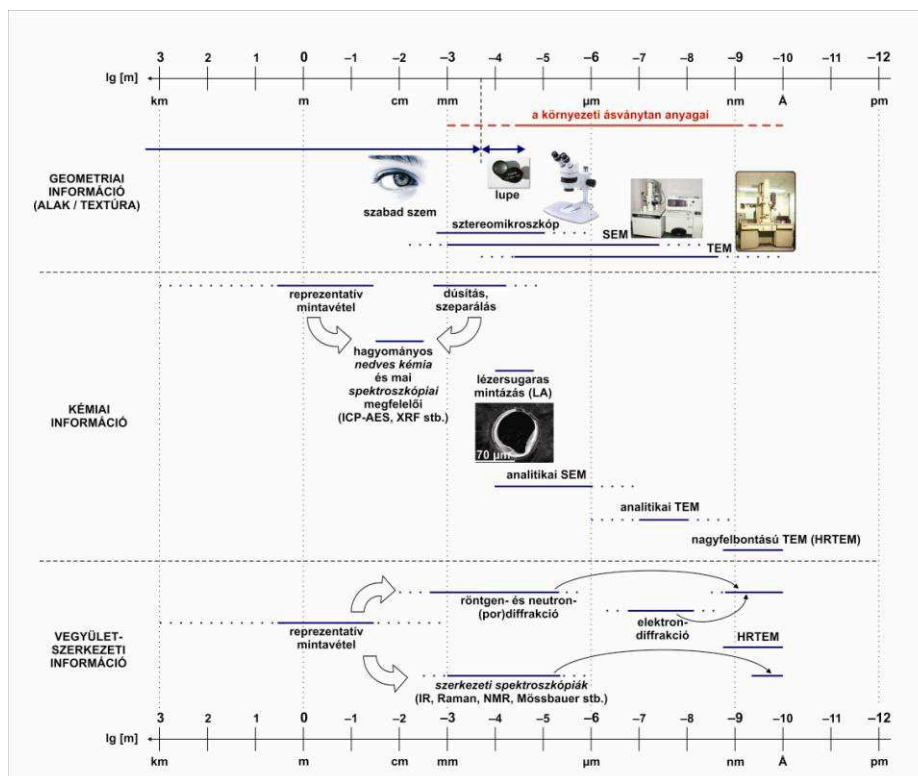
5. A környezeti szilárd anyagok megismerhetőségének eszközei

Eddig áttekintettük, hogy *melyik mérettartományban és milyen tulajdonságokat* kell a környezetmérnöknek és a környezetkutatónak meghatározni, hogy a munkájában fontos ásványokat és műtermékeket jellemezni tudja.

Felmerül a kérdés, hogy vajon *megvannak-e ezekhez a vizsgálatokhoz az eszközeink?* Ha ezt a kérdést valaki föltekerte volna 35 éve, amikor e sorok szerzője az egyetemen tanult, a válasz még nemleges lett volna. A mai diákok számára már jobbák a kilátások! De nézzük a részleteket röviden.

5.1. Az alak, méret meghatározása a környezeti anyagoknál

A tudományos megfigyelés kezdetei óta ismerjük a *szabad szemmel látható* méretű, tehát *néhány tized milliméternél* nagyobb tárgyakat, szemcséket. Az elmúlt 150 évben már alaposan megismerhettük a *fénymikroszkópok gyakorlati felbontási határánál*, az *egy mikrométernél* nagyobb alakzatokat is (5.1. ábra). A fénymikroszkópok tehát csaknem *három nagyságrenddel* tágitották a megismerés lehetőségét, és nagyon fontos új felismerésekhez segítettek a kutatókat, gyakorlati szakembereket. A fénymikroszkóp sok évtizede része a mindennapi munkának, legyen az termelés során a minőségellenőrzés, termék- vagy technológiafejlesztés, vagy éppen környezeti monitorozás.



5.1. ábra: A környezettudomány szilárd anyagainak leírásához fontos információ típusok és a megszerzésüket lehetővé tevő vizsgálati módszerek. Figyeljük meg, hogy a környezeti ásványtan anyagainak mérettartományában (1 nm–1 μm) az információk csak korszerű nagyműszerekkel szerezhetőek meg

Az [5.1. ábrán](#) jól látszik azonban, hogy az általunk kitűzött alsó határt (lásd [4. fejezet](#)) még *négy nagyságrend* választja el a fénymikroszkóppal elért határtól. Ráadásul, ahogy arról a korábbiakban már szóltunk ([4.1. ábra](#)) és a későbbiekben példákkal is megmutatjuk, a környezeti folyamatok során keletkező szilárd anyagok döntő többsége éppen ebbe a lefedetlen mérettartományba esik.

Itt nem részletezett okok miatt a nanométeres mérettartományt már nem a fényvel, vagy a fényhez hasonló természetű elektromágneses sugarakkal (pl. ultraibolya vagy röntgensugarak) tesszük láthatóvá, hanem elektronsugárzással, gyorsított elektronokkal képet alkotó *elektronmikroszkópokkal*. Az elektronmikroszkópoknak két – fő működési elvük alapján jól elkülönülő – fajtája van, a pásztázó (angolul *scanning*, rövidítése: SEM), és az átvilágító (transzmissziós, rövidítése: TEM) elektronmikroszkóp.

Ezeknél a nagyműszereknél az előállított képekről már eltűnnek makroszkópos világunk egyes megszokott fogalmai. Nincs értelme például színről beszélni, csak különböző detektált jelekről, jelerősségekről és kontrasztokról. Az elektronmikroszkópok képeit korábban filmes fényképezéssel rögzítették, ma már közvetlenül digitális formában rögzítjük.

Minden alkalommal, mielőtt egy elektronmikroszkópos kép értelmezésébe kezdenénk, két dolgot kell felderítenünk: 1) pontosan milyen technikával, milyen jelek felhasználásával készült, és 2) mekkora a nagyítása. A nagyítást ma már szinte kizárólagosan a képre helyezett *léptékkal* adjuk meg.

Az [5.1. ábra](#) mutatja, hogy az elektronmikroszkópokkal ma már a környezettel dolgozó mérnök vagy kutató által vizsgált mérettartomány lefedhető. A gyakorlatban azonban, különösen a 0,1 nm–1 nm tartományban, még számos technikai nehézség bonyolítja a vizsgálatokat. Ezek elhárítása csak kiemelkedő felkészültségű elektronmikroszkópos szakemberek segítségével oldható meg.

Külön műszercsaládot képviselnek a *felületek* nagyfelbontású vizsgálatára alkalmas eszközök. Itt közülük csak az *atomi erőmikroszkópot* (AFM) említjük.

5.2. A kémiai összetétel meghatározása a környezeti anyagoknál

A klasszikus kémiai elemzéseknél a szabad szemmel is jól látható anyagmennyiségeket tudják biztonsággal meghatározni. A környezeti anyagok tartományában ([5.1. ábra](#)) a párányi térfogatokat vagy úgynevezett *helyi (lokális) elemzésre* alkalmas eszközökkel, például az alak jellemzésénél már bemutatott elektronmikroszkópok analitikai változataival (ATEM, ASEM), vagy nagyon kis koncentrációk kimutatására alkalmas spektroszkópiai módszerekkel (ICP-AES, ICP-MS, XRF) tudjuk kémiaiilag jellemezni. Az előbbi módszerek legtöbbször lehetővé teszik, hogy a kémiai inhomogenitásokat, a kémiai változatosság természetét (lásd [2.3. ábra](#)) is meghatározzuk, az utóbbi módszerek csak *átlageredményeket* szolgáltatnak. Nincs mindenható vizsgálati módszer, minden műszeres mérésnek van erőssége és gyengéje, a konkrét mérések tervezését csak a konkrét környezeti probléma pontos megfogalmazása után szabad elkezdni.

5.3. A (kristály)szerkezet meghatározása környezeti mintáknál

A szilárd, kristályos anyagok szerkezetének meghatározása, ezen anyagok rutinszerű azonosítása ma leggyakrabban röntgendiffrakcióval történik. A röntgendiffrakció a röntgensu-

garak elhajlásán alapuló fizikai vizsgálati módszer. Alkalmazhatósága igen széleskörű, mikrométernél nagyobb szemcseméretű anyagok, porok jól azonosíthatók vele.

A röntgen(por)diffraktométer a környezeti ásványtannak is alapeszköze, de ebben az alkalmazásban már több korlátba is beleütközünk. A számunkra leglényegesebb korlátok:

- a vizsgálható anyagmennyiségnek minimális mennyisége: legalább pár száz μm^3 – sokszor nincs ennyi anyagunk;
- a folytonos kristályrács minimális kiterjedése: 0,1 μm alatt már egyre bizonytalanabb a kiértékelés – a környezeti folyamatok ásványainak szemcsemérete gyakran el sem éri ezt a méretet.

Ezeket a korlátokat a transzmissziós elektronmikroszkópban megfigyelhető elektronelhajlás (*elektrondiffrakció*; TEM – SAED) alkalmazásával tudunk túllépni.

Az *elektrondiffrakció* rendkívül hatékony a számunkra fontos, nm tartományba eső kristallitok (*kristálykák*) meghatározásában.

E módszernek is megvannak természetesen a korlátai. Közülük a környezeti mintáknál kiemelhető, hogy a vákuumban történő mérés számos víztartalmú ásvány vizsgálatát megnehezíti, továbbá, hogy az elektronsugárral történő bombázás elroncsolhatja a viszonylag kis energiájú kötéseket (is) tartalmazó környezeti ásványokat, lehetetlenné téve a vizsgálat elvégzését.

Környezetünkben számos olyan szilárd¹ anyag van, amelyben nem alakul ki a hosszú távú rend, nem lehet szerkezetüket kristályrács segítségével leírni.

Az ilyen anyagok vizsgálatára jól használhatók a rövid- és középtávú rendet mutató szerkezeti spektroszkópiák (**5.1. ábra**), mint például az infravörös (IR) spektroszkópia, a Raman-spektroszkópia, a Mössbauer-spektroszkópia, a magmágnes-rezonancia spektroszkópia (NMR) vagy a különböző elnyelési röntgenspektroszkópiák (XANES, EXAFS).

Az atomok, atomcsoportok rendjét közvetlenül is vizsgálhatóvá teszi a nagyfeloldású transzmissziós elektronmikroszkópia (HRTEM), valamint a felületek esetében a már fent is említett AFM és a hozzá hasonló elven működő más mikroszkópok.

Természetesen a nem kristályos anyagoknál alkalmazható, itt felsorolt módszerek kivétel nélkül alkalmazhatók a kristályos anyagok vizsgálatára is.

A környezetmérnök és a környezetkutató későbbi tanulmányai során részletesen is meg fog ismerkedni az e fejezetben röviden bemutatott mérési módszerekkel.

¹ A fizikában csak azokat az anyagokat nevezik szilárdnak, amelyek kristályosak is. Mi a szilárd fogalmat kiterjesztve használjuk minden olyan kondenzált anyagra, amelynek saját alakja van, és ezt a környezeti időskálán (napok, évek, legfeljebb évezredek) meg is tartja. Ezáltal például a fizikában folyadéknak tekintett üvegek a mi tárgyalásunkban szilárd anyagok.

6. Környezeti ásványrendszertan

Az eddigiekben megismerkedtünk a környezetben lévő szilárd vegyületek jellemzéséhez szükséges alapfogalmakkal. Ideje, hogy magukkal a vegyületekkel is megismerkedjünk.

Nagyon sokféle vegyület található az ásványok között, és a környezeti szempontból fontos műtermékek tovább színesítik ezt a képet. Az ásványok osztályozása vegyülets csoportok szerint, és azon belül a kristályszerkezetük alapján történik. Az így kialakított rendszert *kristálykémiai alapú ásványrendszertannak* nevezzük.

A rendszertan alapegységei az *ásványfajok*, ezeket rokonságaik alapján *sorokba, csoportokba* rendezzük, és e csoportok alkotják a rendszertan legmagasabb egységeit, az *ásványosztályokat*. A szakirodalomban több rendszertan is ismert. A különböző rendszerezőknél az ásványosztályok kicsit eltérhetnek, sorrendjük változhat, de ez nem okoz lényegi eltéréseket a környezeti felhasználók számára. Mi az alábbiakban Sztrókay Kálmán professzor Magyarországon széles körben elterjedt rendszertani sorrendjét követjük, de az olvasó remekül használhatja a más osztálysorrendet követő ásványrendszertanokat is (pl. Szakáll, 2005).

A jelen jegyzetben kilenc ásványosztályba soroljuk a vegyületeket. Ezek a következők: 1. **terméselemek** és rokon anyagok, 2. **szulfidok** és rokon vegyületeik, 3. **oxidok és hidroxidok**, 4. **szilikátok** és rokon vegyületeik, 5. **foszfátok** és rokon vegyületeik, 6. **szulfátok** és rokon vegyületeik, 7. **karbonátok** és rokon vegyületeik, 8. **halogenidok**, 9. **szerves ásványok**.

A négy és félezer ásványfaj megoszlása az egyes osztályok között nagyon egyenetlen. Az összes faj mintegy 25 %-át a szilikátok (4. osztály) teszik ki, míg szerves ásványokból ötvennél is kevesebb van. Környezeti szempontból is nagyon vegyes a kép: vannak kiemelkedően fontos, és vannak szinte elhanyagolható jelentőségű osztályok.

A következőkben osztályonként haladunk végig, minden osztálynál kiemelve pár mondatban a legfontosabb ásványtani jellemzőket és a gazdasági, valamint a környezeti hatásokat. Emellett táblázatosan példákat hozunk a környezeti szempontból legfontosabb vegyületekre, a szűk keretek miatt a teljesség minden igénye nélkül. Az olvasó további ásványokkal, illetve az itt közölt ásványok részletes ismertetésével az ajánlott irodalomban szereplő honlapokon és könyvekben találkozhat.

6.1. Terméselemek és rokon anyagok

Ez az egyetlen osztály, amelynek tagjait nem kötik össze közös tulajdonságok. A természetből ismert 90 elem közül 26 jelenik meg a természetben önállóan szilárd formában, és mindegyikük a saját elemi tulajdonságait mutatja (**6.1. táblázat**). Így találunk köztük *fémeket* (pl. terméсарany, terméсарéz, terméсарhigany), *félfémeket* (pl. terméсарzén) és *nem fémeket* is (terméскén, gyémánt, grafit). Közülük környezeti szempontból azoknak van komolyabb jelentősége, amelyeket *nagyobb mennyiségben bányásznak*. Ilyen például a terméсарany, a platinafémek, a grafit, a gyémánt, vagy a meddőhányó-ásványként is ismert terméскén. A gyémánt és a grafit a legjobb példa arra, hogy miért nem elegendő a kémiai összetételt megadni egy szilárd anyagnál: mindkettő elemi szén, de kristályszerkezetük lényegesen

eltér, így tulajdonságaik is gyökeresen eltérőek lesznek. Vannak olyan terméselemek is, amelyek már *kisebb mennyiségben is komoly környezeti kockázatot* jelentenek. Ilyenre példa a terméshigany, amelynek kockázatát tovább növeli, hogy -39 °C fölött már folyadék.

A környezetben *mesterséges eredettel* igen sok *fém vasat* is találunk, amelyet főként a vas oxidjaiból gyártanak. Ugyancsak jelentős a mesterséges eredetű, főként ólom-szulfidból előállított *fém ólom* (akkumulátorok szilárd darabjai, régi vízvezetékek, horgásznehezék) környezeti hatása. Az ezen osztályba sorolt karbidok (például a csiszolóanyagként fontos szilícium-karbid), foszfidok, nitrdek is zömmel mesterségesek a környezetünkben.

ásványfaj	képlet	kristályrendszer ¹
termésarany	Au	köbös
termésréz	Cu	köbös
terméshigany	Hg	-39 °C alatt háromszöges, fölötte folyékony (nem kristályos)
termésarzén	As	háromszöges
terméskén	S ₈	egyhajlású, rombos
gyémánt	C	köbös
grafit	C	hatszöges

6.1. táblázat: Példák a környezeti ásványtanban fontos ásványokra a terméselemek osztályából

6.2. Szulfidok és rokon vegyületeik

A szulfidok fémeknek kénnel alkotott vegyületei. A rokon ásványok közül környezeti szempontból kiemelhetők a fémek arzénnel (*arzenidek*) és szelénnel (*szelenidek*) alkotott vegyületei. Összesen csaknem 600 ásványfaj tartozik ebbe az osztályba. A szulfidok zöme a fényben átlátszatlan, vezető vagy félvezető. A szulfidokban a kén redukált (S^{2-}) állapotban van jelen és ennek különleges környezeti következményei vannak. A fémek földi gyakoriságából következően mennyiségükre nézve a vas-szulfidok a legjelentősebbek (**6.2. táblázat**). Közülük a geológiai képződményekben a pirit a legszélesebb körben elterjedt (**6.1. ábra**), de a környezeti ásványképződésben a mackinawit és a greigit is kiemelt fontosságú.

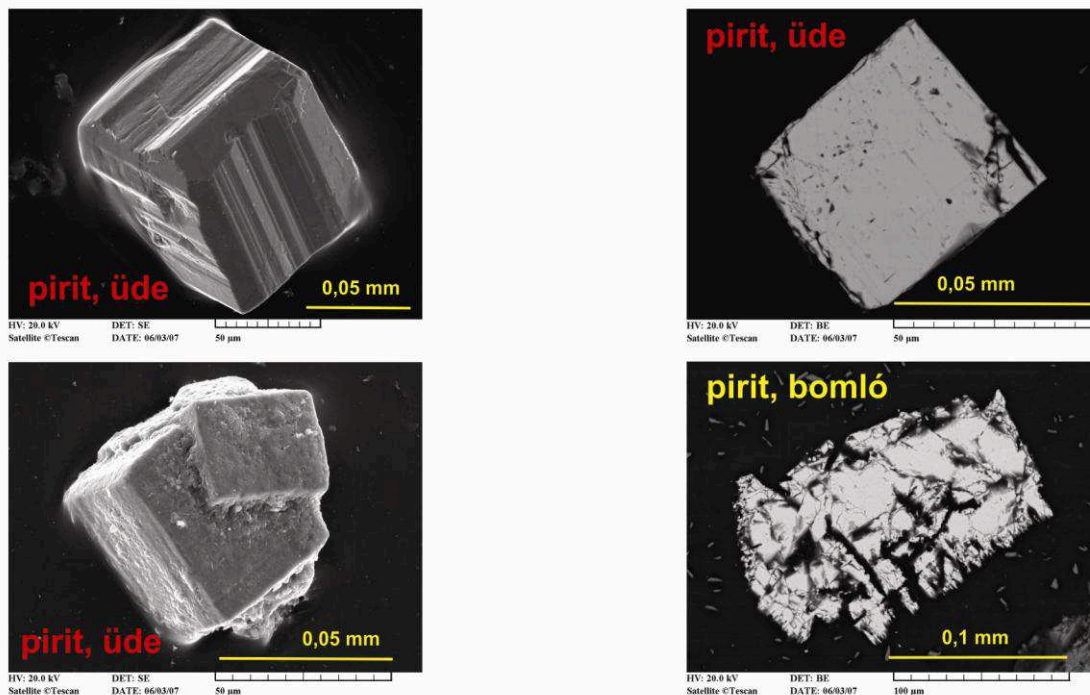
A szulfidok között találjuk nagyon sok fém legfontosabb ércásványát (**6.2. táblázat**), ezért ezekkel a vegyületekkel gyakran találkozunk bányáknál vagy érckohóknál. A legnagyobb tömegben található piritet a kénsavgyártásnál hasznosítják.

A szulfidok környezeti kockázata gazdasági felhasználásukkal közös alapokon nyugszik. Mindkettő a *jelentős fémtartalomhoz* és a *savképző képességhez* (savképző potenciál) kapcsolódik. Utóbbi azt jelenti, hogy a szulfidok redukált kénje a felszíni vízzel és a levegő oxigénjével találkozáva feloxidálódik ($S^{2-} \rightarrow S^{6+}$), kénsav ($H_2[SO_4]$) keletkezik, amely akár a talajba, akár az élővizetekbe, akár a légkörbe kerülve komoly gondokat okozhat (savas bányavizek, savas eső stb.).

Mennyiségéből adódóan a pirit (FeS_2 , köbös) jelenti a legnagyobb kockázatot.

¹ A kristályos anyagokat az őket felépítő kristályrács *szimmetriája* alapján *hét kristályrendszerbe* soroljuk. Ez a hét rendszer a csökkenő szimmetria szerint: a *köbös* (szabályos), *hatszöges* (hexagonális), *négyszöges* (tetragonális), *háromszöges* (trigonális), *rombos* (ortorombos), *egyhajlású* (monoklin) és a *háromhajlású* (triklin). Mindegyik kristályrendszer tovább osztható, ugyancsak a jellemző szimmetriák alapján, *kristályosztályokra*. E fejezetben az ásványokat csak a kristályrendszer szintjén adjuk meg.

Pirit és átalakulása pásztázó elektronmikroszkópon keresztül



6.1. ábra: A pirit a leggyakoribb szulfidásványként felszíni bomlásával savasodás okozója. Pásztázó elektronmikroszkópos felvételek

A természetes oxidáció mellett számolnunk kell azzal, hogy a szulfidos fémek kohászata során és a kénsavgyártáskor (pirit „pörkölése”), vagy a pirittartalmú szenek égetésekor² mesterségesen is oxidálják a szulfidokat. Az így levegőbe kerülő kénsav a korábbi évtizedekben igen nagy károkat okozott világszerte. Mára ugyan a fejlett országokban szigorú környezetvédelmi szabályok kötik a kohók és erőművek kéményeiből kilépő anyagok mennyiségét (*kibocsátási határértékek*), a fejlődő országok (pl. Kína, India, Brazília) gyorsan bővülő, környezetvédelmi szempontból alig szabályozott, ezért (is) lényegesen olcsóbban dolgozó ipara azonban továbbra is nagy szerepet játszik a savasodásban.

A nehézfém-szulfidok esetében a szulfid oxidációjakor a nehézfémek felszabadulnak, és mobilissá válnak. Külön kockázatot jelent, ha a bomló vegyület arzént is tartalmaz (pl. arsenopirit – FeAsS).

Összefoglalásként megállapítható, hogy *valamennyi ásványosztály közül a szulfidok képviselik a legnagyobb környezeti kockázatot*, ezen vegyületek jelenléte a környezetben minden alkalommal külön odafigyelést érdemel a környezeti szakember részéről.

² Megjegyzendő, hogy a szenekben (keverék anyagok, melyek szerves vegyületekből és ásványokból állnak) nemcsak a pirit, hanem maguk a szenet alkotó szerves vegyületek is tartalmaznak redukált ként, amely az égetéskor szintén feloxidálódik és kiszabadul.

ásványfaj	képlet	kristályrendszer
vas-szulfidok		
pirit	FeS ₂	köbös
markazit	FeS ₂	rombos
mackinawit (angol; ejtsd: „makinavit”)	FeS	négyszöges
greigit	Fe ₃ S ₄	köbös
pirrhotin	Fe _{1-x} S	egyhajlású, hatszöges stb.
egyéb szulfidok		
szfalerit	ZnS	köbös
galenit	PbS	köbös
kalkopirit	CuFeS ₂	négyszöges
cinnabarit	HgS	háromszöges
antimonit	Sb ₂ S ₃	rombos
bizmutin	Bi ₂ S ₃	rombos
molibdenit	MoS ₂	hatszöges
arzenopirit	FeAsS	egyhajlású
realgár	As ₄ S ₄	egyhajlású
auripigment	As ₄ S ₆	egyhajlású

6.2. táblázat: Példák a környezeti ásványtanban fontos vegyületekre a szulfidok osztályából

6.3. Oxidok és hidroxidok

Az oxidok fémeknek oxigénnel (O²⁻) alkotott vegyületei ([6.3a. táblázat](#)). A hidroxidokban az oxigénhez egy proton (H⁺) is kapcsolódik, és az így kialakuló (OH)⁻ *hidroxidion* kötődik a fémekhez ([6.3b. táblázat](#)).

Az *oxidvegyületek* többségében a nagyon erős kovalens kötés uralkodik, ami ezen vegyületek nagy kémiai és fizikai ellenálló képességében mutatkozik meg. Ide tartoznak olyan kemény és nehezen oldódó gyakori vegyületek, mint a *korund* (Al₂O₃), vagy a *kvarc* (SiO₂). E tulajdonságok miatt az oxidok többsége a környezeti hatás szempontjából *kémiaiilag semleges*: e vegyületek nem tudnak bekapcsolódni az alacsony energiaszintű környezeti folyamatokba. Ezért lehetnek egyes oxidok élelmiszeradalékok, gyógyszerek tablettáinak alkotói, vagy a papírgyártásnál töltőanyagok. A szemcseméret csökkenésével azonban ezeknek az anyagoknak is lehetnek kockázatai (pl. belélegzett kvarc – szilikózis).

A passzív környezeti hatás alól az egyedüli fontos kivétel a jég (H₂O), amely molekulársa miatt (lásd az [első lábjegyzet](#)t) könnyen elveszti kristályos állapotát, és vízzé, környezetünk meghatározó folyadékává alakul. Az oxidok között sok fém fontos ércásványait találjuk (pl. Fe, Mn, Cr). Emellett – éppen ellenálló képességük miatt – drágakőként is kedveltek (pl. Al₂O₃: rubin, zafír; SiO₂: hegyikristály, ametiszt, rózsakvarc). Bányászatuk általában nem jelent különös *kémiai* kockázatot a környezetre, „csak” a bányászatnál általános egyéb kockázati hatásokkal kell számolnunk (tájseb, por- és zajterhelés stb.). Különleges szerepet játszanak a vegyértékváltó (továbboxidálódásra képes) fémek, mint például a vas vagy az urán oxidjai. Egyes oxidok magas hőmérsékletű ipari folyamatok melléktermékeiként is bekerülhetnek a környezetbe.

ásványfaj	képlet	kristályrendszer
szilícium-dioxid vegyületek		
kvarc	SiO ₂	háromszöges
crystalit (<i>spanyol; ejtsd: „krisztobalit”</i>)	SiO ₂	köbös, négyszöges
tridimit	SiO ₂	hatszöges, rombos, háromhajlású
opál-A (<i>ejtsd: „opál-á”</i>)	SiO ₂ * nH ₂ O	nincs (csak rövid távú rend van)
opál-CT (<i>ejtsd: „opál-cété”</i>)	SiO ₂ * nH ₂ O	nincs (csak rövid és középtávú rend van)
egyéb oxidok		
jég	H ₂ O	hatszöges
korund	Al ₂ O ₃	háromszöges
hematit	Fe ₂ O ₃	háromszöges
magnetit	Fe ²⁺ Fe ³⁺ ₂ O ₄	köbös
spinell	MgAl ₂ O ₄	köbös
uraninit	UO ₂	köbös
rutil	TiO ₂	négyszöges
piroluzit	MnO ₂	négyszöges
periklász	MgO	köbös
wüstit (<i>német; ejtsd „vüsztit”</i>)	FeO	köbös
mész	CaO	köbös

6.3a. táblázat: Példák a környezeti ásványtanban fontos vegyületekre az oxidok közül

A hidroxidok (és oxi-hidroxidok) környezeti hatása sokkal lényegesebb az oxidokénál. A természetes vizekből, vagy akár a csapvízből is, igen gyakran ezek a vegyületek keletkeznek a felszíni, felszín közeli geológiai és környezeti folyamatokban. Néhányuknak gazdasági jelentősége is komoly. Ilyenek például az alumínium hidroxidjai és oxi-hidroxidjai, amelyek fontos alkotói (*ércásványai*) az alumínium ércének (*bauxit*). A környezeti vizekben gyakori oldott vasionok is általában barna színű oxi-hidroxidokként csapódnak ki, sokszor a szállító csövek falára, az idők folyamán akár el is tömve azokat. A vezetékes víz kimaradása után a csapból folyó „rozsdás vizet” a csövek faláról leváló parányi szilárd vas-oxi-hidroxid szemcsék színezik meg.

Ezen vegyületek környezetünkben általában *igen nagy fajlagos felülettel* vannak jelen. Ez részben kristályszerkezetükre, részben keletkezésük körülményeire vezethető vissza. A nagy szabad felület és a változatos felületi töltés miatt a hidroxidokon igen sokféle ion és molekula kötődhet meg (adszorpció), sőt baktériumoknak is gyűjtőhelyei lehetnek. Ez adja környezeti jelentőségüket, adott esetben, ha kockázatot jelentő anyagokat, például nehézfémionokat gyűjtenek össze, kockázatukat is.

ásványfaj	képlet	kristályrendszer
hidroxidok		
bayerit	$\alpha\text{-Al(OH)}_3$	egyhajlású
gibbsit (angol; ejtsd: „gibbszit”)	$\gamma\text{-Al(OH)}_3$	egyhajlású
portlandit	Ca(OH)_2	háromszöges
brucit	Mg(OH)_2	háromszöges
oxi-hidroxidok		
diaszpor	$\alpha\text{-AlO(OH)}$	rombos
böhmít (német; ejtsd: „bömit”)	$\gamma\text{-AlO(OH)}$	rombos
manganit	$\gamma\text{-MnO(OH)}$	egyhajlású
goethit (német; ejtsd: „gőtit”)	$\alpha\text{-FeO(OH)}$	rombos
ferrihidrit	$\text{Fe}_5(\text{OH},\text{O})_{12}$	hatszöges? (bizonytalan)

6.3b. táblázat: Példák a környezeti ásványtanban fontos vegyületekre a hidroxidok és oxi-hidroxidok közül

6.4. Szilikátok és rokon vegyületeik

A földkéreg két leggyakoribb eleméből, az oxigénből és a szilíciumból felépülő komplex anion, a *szilikát anion* ($[\text{SiO}_4]^{4-}$) az összes ismert ásvány mintegy negyedében jelen van. Ezzel a szilikátok a legnépesebb ásványosztályt alkotják.

Az osztályon belüli csoportosításuk a szilikát tetraéderek összekapcsolódásának mértékén (*polimerizáció*) alapul (lásd az [6.4. táblázat](#) alcímeit).

A szilikátok a legnagyobb tömegű kőzetalkotók (földpátok, csillámok, piroxének, amfibolok, gránátok stb.). Természetes (kőzetek, por) és mesterséges (beton, téglák stb.) szilárd környezetünk döntő többségét szilikátásványok alkotják, így nem csoda, hogy *kémiai* általában nem jelentenek semmiféle kockázatot a környezetre.

Környezeti kölcsönhatásaik legtöbbször kristályszerkezetükből (pl. zeolitok; szmektitok és más rétegszilikátok) és/vagy parányi szemcseméretükből (pl. azbesztmegjelenés) adódó tulajdonságaikon alapulnak.

A magmás vagy metamorf folyamatok során, sokszor jelentős nyomáson, és magas, sok száz, vagy akár 1000 °C hőmérsékleten keletkező szilikátvegyületek többsége a földfelszíni, környezeti körülmények között nem stabil, kémiai elbontást (mállás) szenved, és az így szabaddá váló ionokból, ionsoportokból a környezeti ásványképződés során új, immár a felszínen stabil, de parányi szemcseméretű szilárd szilikátvegyületek képződnek. Ilyen például a talajban található *agyagásványok* legtöbbször.

Környezeti kölcsönhatások szempontjából a rétegszilikátoknak és a zeolitoknak van a legnagyobb szerepe, ezért indokolt, hogy ezeket az ásványcsoportokat a környezetmérnök és a környezetkutató külön stúdium keretében részletesen is megismerje.

Ugyancsak részletesebben megismerendő az *azbeszt*, amely *nem egy (vagy több) ásvány*, hanem különböző, gyakori és környezeti kockázatot nem jelentő ásványoknak, köztük döntően két szilikátásvány-csoportnak (szerpentinek és amfibolok) különleges *vékonszál* megjelenési formája (szálátmérő <3 μm).

Egyes ásványok (pl. amfibolok) ilyen vékonszál, *azbesztformájú* szemcséi a tüdőbe jutva rákkeltő hatásúak (karcinogének), ezért ma az azbesztformájú anyagok használatát – tekintet nélkül arra, hogy egy adott vegyület azbesztként mennyire rákkeltő – a fejlett országokban betiltották, és a környezetünkbe az elmúlt 150 évben beépített azbeszteket – jelentős költségeket is vállalva – fokozatosan eltávolítják.

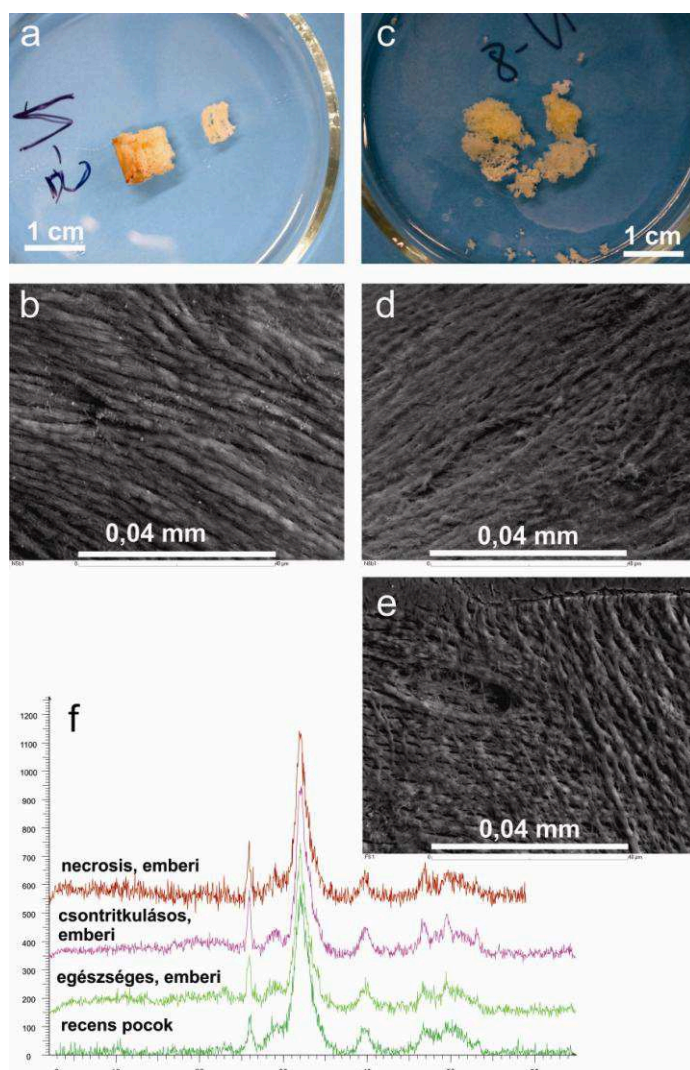
Könyvünk második része épp az azbesztek példáján mutatja be, hogy a környezeti ásványtan maga komplex, interdiszciplináris szemléletmódjával milyen szoros kapcsolatot terem a hagyományos természettudományok, az orvostudomány és a társadalmi igényeket leképezni hivatott jogalkotás között.

ásványfaj	képlet	kristályrendszer
térhálós (tekto-) szilikátok		
zeolit csoport	víz-tartalmú nátrium-kalcium-alumoszilikátok (az alumoszilikát váz megmaradása mellett a víz és a nagy kationok lecserélhetők, ezért a zeolitok molekulaszűrőként használhatók)	változatos (pl. egyhajlású, rombos, négyszöges)
földpát csoport		
kálföldpátok (ortoklász, szanidin, mikroklin)	$K[AlSi_3O_8]$	egyhajlású, háromhajlású
albit	$Na[AlSi_3O_8]$	háromhajlású
anortit	$Ca[Al_2Si_2O_8]$	háromhajlású
réteg- (fillo-)szilikátok		
szmektittek (pl. montmorillonit)	kis rétegtöltésű háromrétegű rétegszilikátok; pl. $(Na, Ca_{0,5})_x(Al_{2-x}Mg_x)[Si_4O_{10}](OH)_2 \cdot nH_2O$; $0,2 < x < 0,6$	pl. egyhajlású
illit	közepes rétegtöltésű háromrétegű rétegszilikát; $K_xAl_2[Al_xSi_{4-x}O_{10}](OH)_2 \cdot nH_2O$ $0,6 < x < 0,85$	pl. egyhajlású
csillámok (pl. muszkovit)	nagy rétegtöltésű háromrétegű rétegszilikátok; pl.: $KAl_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2$	pl. egyhajlású
kloritok	négyrétegű Mg- Fe^{2+} -rétegszilikátok	pl. egyhajlású
kaolinit	kétretegű rétegszilikát $Al_2[Si_2O_5](OH)_4$	pl. háromhajlású
halloysit	kétretegű rétegszilikát $Al_2[Si_2O_5](OH)_4 \cdot 2H_2O$	pl. egyhajlású
szerpentinek (krizotil, lizardit, antigorit)	kétretegű rétegszilikát $Mg_3[Si_2O_5](OH)_4$	pl. egyhajlású
lánc- és szalagszilikátok		
piroxének (pl. diopszid)	$[Si_2O_6]^{4-}$ szilikátvázú láncszilikátok (pl.: $CaMg[Si_2O_6]$)	egyhajlású, rombos
amfibolok (pl. tremolit)	$[Si_8O_{22}]^{12-}$ szilikátvázú, (OH)-tartalmú szalagszilikátok (pl.: $Ca_2Mg_5[Si_8O_{22}](OH)_2$)	egyhajlású, rombos
szigetszilikátok		
larnit (dikalcium-szilikát; cementipari neve: „belit”)	$\beta-Ca_2[SiO_4]$	egyhajlású
trikalcium-szilikát; cementipari neve: „alit”; csak műtermékként ismert	Ca_3SiO_5	háromhajlású

6.4. táblázat: Példák a környezeti ásványtanban fontos vegyületekre a szilikátok közül

6.5. Foszfátok és rokon vegyületeik

Bár a foszfor az élet szempontjából meghatározó elem, és ráadásul a *foszfát anion* ($[\text{PO}_4]^{3-}$) hétszáznál is több ásványban megtalálható, így a foszfátok a második legnépesebb ásványosztályt alkotják, e szilárd vegyületek közül csak kevésnek van közvetlen környezeti jelentősége. Közülük itt csak egyet, az *apatitot* ($\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3(\text{OH})$), hexagonális, **6.2. ábra**) emeljük ki, amely a leggyakoribb, legnagyobb tömegben megjelenő foszfát. Ez az ásvány a legfőbb forrása a foszfornak. Környezeti szempontból semleges hatású, amit az is mutat, hogy szervezetünkben jelentős mennyiségben megtalálható (csont, fogzománc). Az ugyan-csak ezen osztályba tartozó *arzenátok* Magyarországon igen ritkák, környezeti szerepük csekély.



6.2. ábra: Egészséges és csontritkulásos emberi csontok. Az ábrán jól látszik, hogy az apatit nanokristályok szövedéke csontritkulásos esetben (c, d, e) lazábbá válik az egészségeshez (a, b) képest. f) A csontokat felépítő nanoapatit kristályszerkezete (röntgen pordiffrakciós felvétel) megegyezik, a csontritkulás tehát magát az apatit szerkezetét nem változtatja meg.

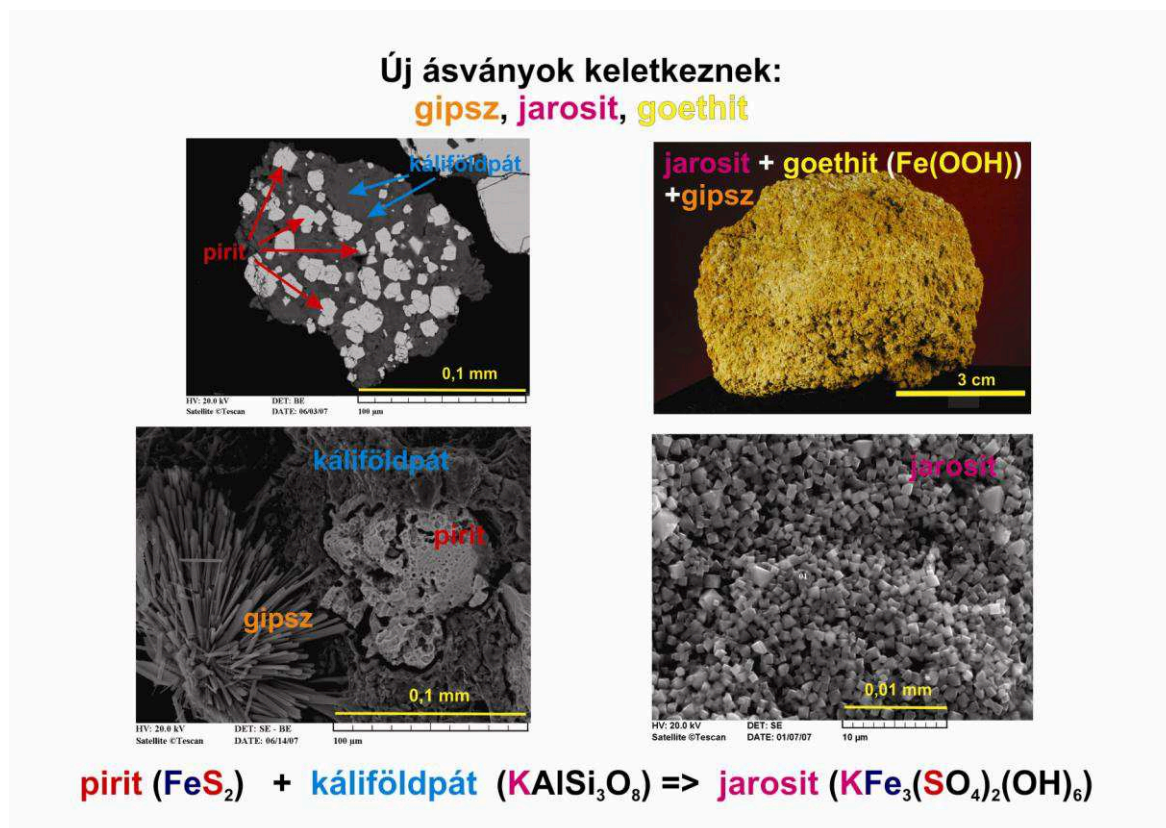
6.6. Szulfátok és rokon vegyületeik

A szulfát anion ($[\text{SO}_4]^{2-}$) alkotta vegyületek, a szulfátok (6.5. táblázat) környezeti hatását fent, a szulfidok és az általános részek tárgyalásánál már jeleztük. A szulfátok jelentik a végállomását annak a folyamatnak (2.2. ábra), amelynek során a redukált kén (S^{2-} ; pirit, 6.1. ábra) a környezeti körülmények között teljesen feloxidálódik (S^{6+}) és szulfát anionként bukkan fel a vizekben (oldott kénsav), illetve a légkörben. Utóbbi környezetben az általában jelenlevő ammóniával semlegesítődve ammónium-szulfát kristályokká alakul.

Ennek megfelelően a szulfátok környezeti jelentősége igen nagy. Ezt a jelentőséget azonban csak az elmúlt évtizedekben kezdték felismerni, és a környezeti szulfátok ismerete – részben kis szemcseméretük, részben kis stabilitásuk miatt – még ma sem tekinthető kielégítőnek.

Ha környezeti hatásukat tekintjük, akkor elsősorban a vízben való oldhatóságukra kell figyelemmel lennünk. Például a rendkívül rosszul oldódó *barit* (BaSO_4 – rombos) nagy báriumtartalma ellenére sem jelent mérgezési veszélyt, ezért használhatják az orvosi gyakorlatban is a röntgenvizsgálatoknál lenyelendő kontrasztanyagként („baritkása”). Ugyanakkor a vízben könnyen oldható szulfátok, mind a savképzés, mind az oldódásukkor felszabaduló esetleges nehézfémek miatt komoly környezeti veszélyt jelenthetnek.

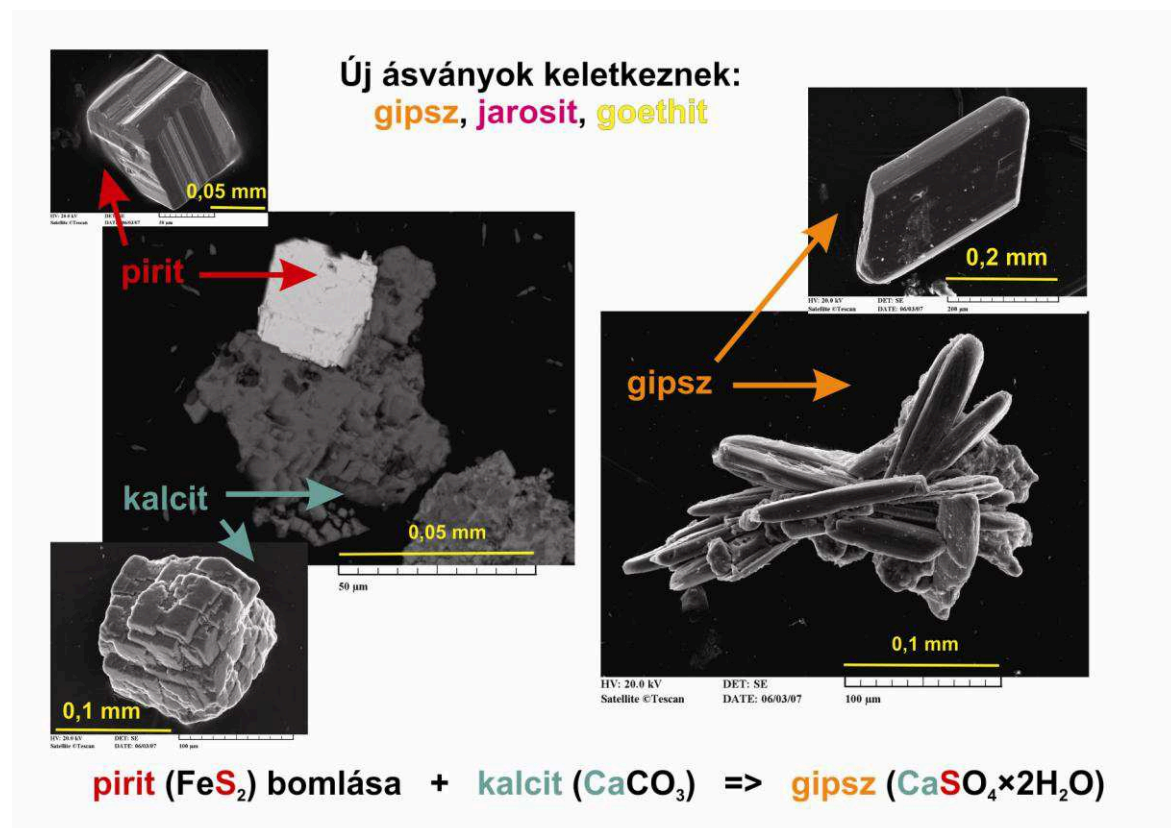
A 2.2. ábrán is bemutatott pirit bomlási folyamatban két szulfát is fontos szerepet játszik (6.3.–6.4. ábrák).



6.3. ábra: Jarosit keletkezése pirit bomlásakor

A jarosit (és közvetlen rokon vegyületei) alacsony (<3) pH-n keletkeznek, és keletkezésükkor megkötik a vízben oldott kénsav egy részét. A savas hatás csökkenésekor (például

ha már a pirit zöme feloxidálódott, így nincs szulfátutánpótlás) a jarosit instabillá válik, elbomlik, és visszabocsátja a környezetbe a korábban felvett kénsavat, ezzel pufferként időben elnyújtva a környezet savas állapotát.



6.4. ábra: Gipsz keletkezése pirit bomlásakor

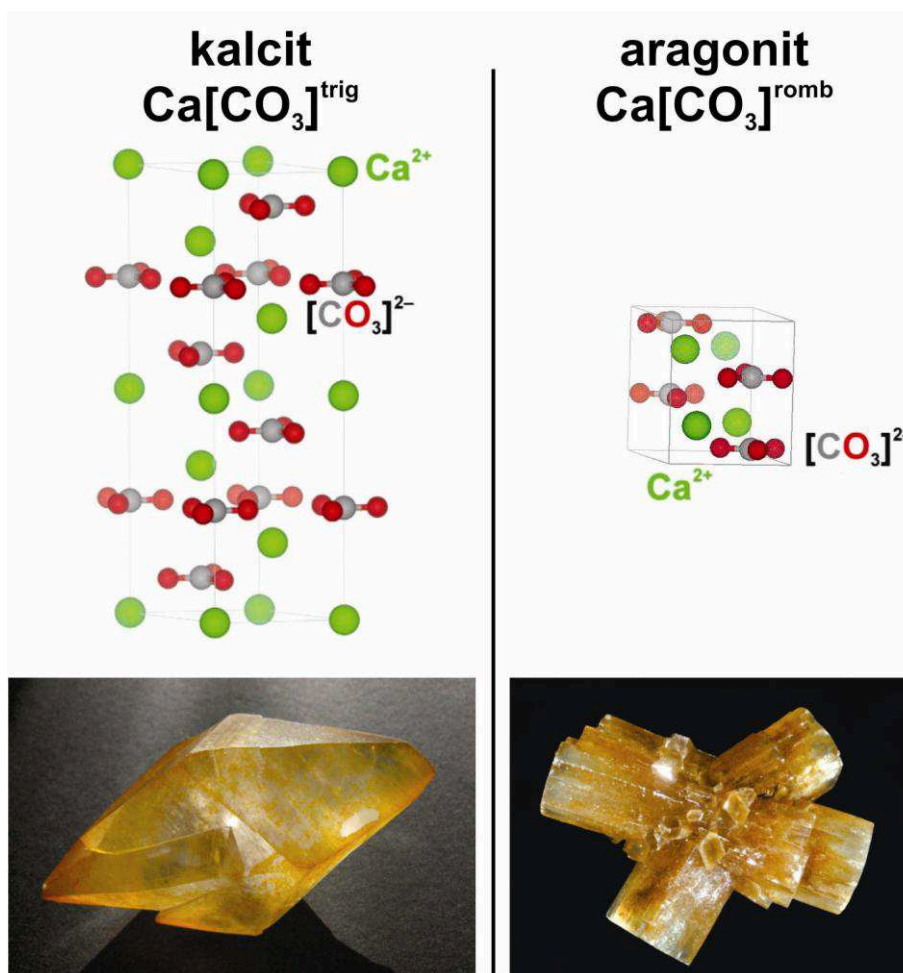
A jarosittal ellentétben a gipsz (CaSO₄ * 2H₂O – egyhajlású) savmegkötő szerepe a normál környezeti körülmények között véglegesnek tekinthető: a meszezéssel (oldott Ca-ionok rendszerbe juttatásával) kezelt kénsavas közegben a sav gipszként kicsapódik, és ezen szilárd vegyület formájában ki is lép a biológiai, környezeti folyamatokból, a környezet savmentessé válik.

ásványfaj	képlet	kristályrendszer
barit	BaSO ₄	rombos
anhidrit	CaSO ₄	rombos
gipsz	CaSO ₄ * 2 H ₂ O	egyhajlású
jarosit (spanyol; ejtsd: „harozit”)	KFe ³⁺ ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	háromszöges
halotrichit	FeAl ₂ (SO ₄) ₄ * 22 H ₂ O	egyhajlású
epsomit	MgSO ₄ * 7 H ₂ O	rombos
kalkantit	CuSO ₄ * 5 H ₂ O	háromhajlású
melanterit	FeSO ₄ * 7 H ₂ O	egyhajlású

6.5. táblázat. Példák a környezeti ásványtanban fontos vegyületekre a szulfátok közül

6.7 Karbonátok és rokon vegyületeik

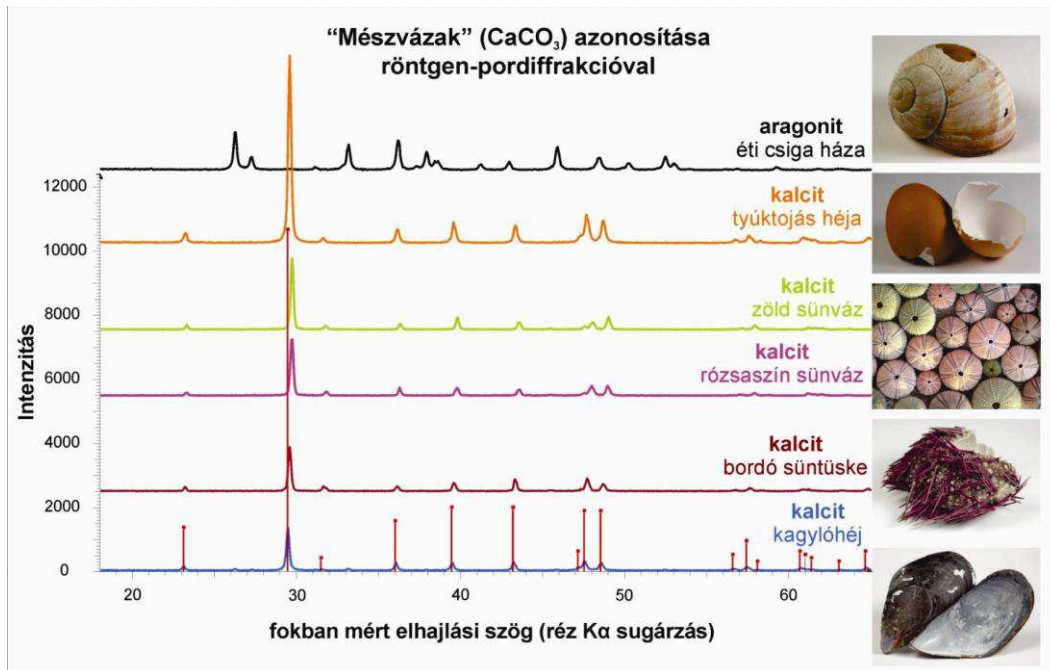
A karbonát anion ($[\text{CO}_3]^{2-}$) leggyakrabban a kalciummal alkot ásványt. A *kalcit* és a nála ritkább *aragonit* (6.5. ábra, [6.6. táblázat](#)) környezetünk állandó szereplője.



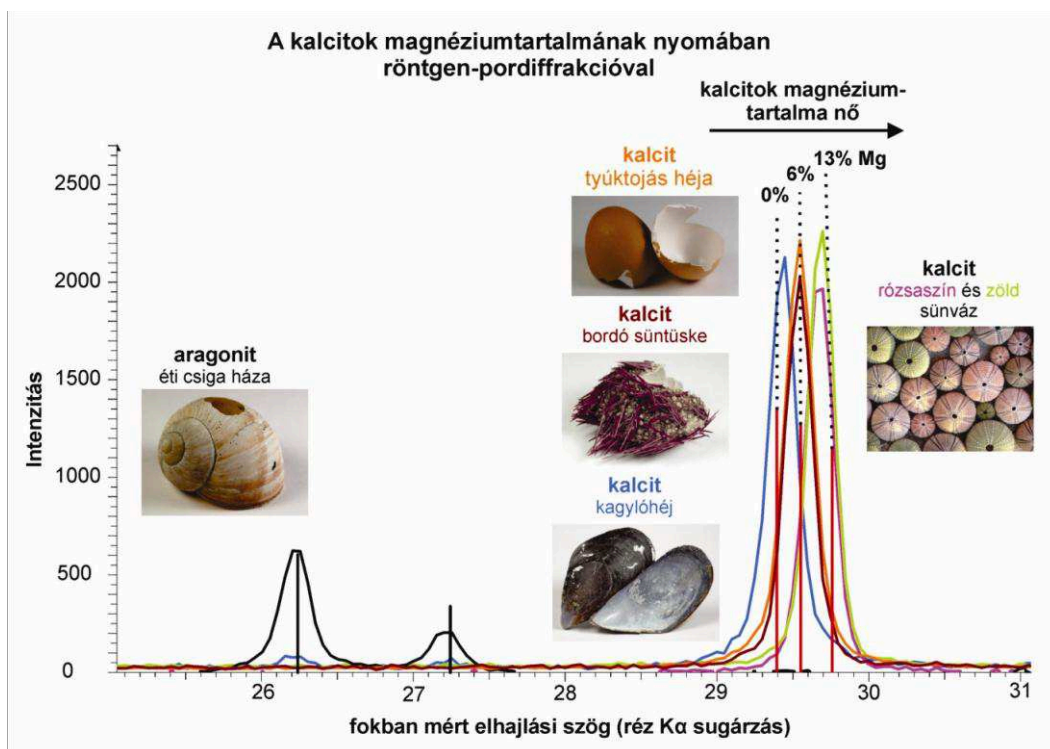
6.5. ábra: A két legfontosabb kalcium-karbonát módosulat

Bár a harmadik természetes kristályos kalcium-karbonát módosulat (*vaterit*) szerepe a geológiában nagyon korlátozott, a környezeti és biológiai ásványképződésben ez az ásvány is jelentős.

A kalcium-karbonát ásványok keletkezésében az élő szervezetek komoly szerepet játszanak: legtöbbjük egyszerű szervezetek (pl. sárgamoszatok mészváza – kokkolit) vagy komplex szervezetek (pl. kagylóhéj, csigaház, korallok mészváza) mészváz kiválasztása révén jön létre ([6.6.-6.7. ábra](#)).



6.6. ábra: Biogén mészvázak azonosítása röntgen-pordiffrakcióval. Jól látható, hogy az éti csiga háza (aragonit) lényegesen eltér a többi vázanyagtól (kalcit)



6.7. ábra: A részletesebb röntgen-pordiffrakciós vizsgálat azt is igazolja, hogy a biológiai működés során az állatok különböző mennyiségű magnéziumot is beépítenek a kalcitba, ezzel növelve a kiválasztott anyag (bio)kémiai stabilitását. E felnagyított részleten már az is látszik, hogy a kagyló héja nemcsak kalcitból, hanem kis részben (a gyöngyház) az éti csiga házával azonos anyagból (aragonitból) áll

A dolomit szintén gyakori karbonátvegyület. A kalcit és a dolomit kőzetalkotó ásványok: főként belőlük épül fel a *mész*³ és a *dolomit*,³ két Magyarországon is gyakori üledékes kőzet.

Egyes fémek karbonátjait régóta használja festékként az emberiség. Ilyen például a két réz-karbonát, a kék azurit és a zöld malachit.

Az étellel egyensúlyban, az életműködés révén keletkező karbonátok természetes módon környezetazonosak, környezeti szempontból kockázatmentesek.

A mesterséges karbonátok környezeti kockázatát egyenként lehet csak elemezni. Például a fehér festékként évszázadokon át használt – fő tömegében mesterségesen előállított – *hidrocerusszit* („ólomfehér”) használatát mára már – éppen környezeti kockázata miatt – betiltották.

ásványfaj	képlet	kristályrendszer
kalcit	CaCO ₃	háromszöges
aragonit	CaCO ₃	rombos
vaterit (<i>német; ejtsd: „fáterit”</i>)	CaCO ₃	hatszöges
dolomit	CaMg(CO ₃) ₂	háromszöges
sziderit	FeCO ₃	háromszöges
azurit	Cu ₃ (CO ₃) ₂ (OH) ₂	egyhajlású
malachit (<i>görög; ejtsd: „malahit”; hagyományos köznyelvi írásalak</i>)	Cu ₂ (CO ₃)(OH) ₂	egyhajlású
hidrocerusszit („ólomfehér”)	Pb ₃ (CO ₃) ₂ (OH) ₂	hatszöges

6.6. táblázat: Példák a környezeti ásványtanban fontos vegyületekre a karbonátok közül

6.8. Halogenidek

A halogén elemek – bár mintegy kétszáz szilárd vegyületet formálnak a természetben – kevés kivétellel elenyésző mennyiségben jelennek meg, így gazdasági jelentőségük és környezeti hatásuk is korlátozott. Igen fontos kivételt jelent a kősó (halit – NaCl, köbös) és a szilvin (KCl – köbös), amelyek ércásványként is meghatározóak, és jó oldódásuk miatt környezeti hatásuk is fontos.

6.9. Szerves vegyületek

Az ásványrendszertannak ebben a parányi, mindössze néhány tíz tagot számláló osztályában legtöbbször szerves molekulákból felépülő kristályokat találunk. Sok ilyen szerves kristály keletkezik az életfolyamatok során, akár növényekben, akár állatokban (pl. a különböző epe- és vesekövek egy része). Ez adja környezeti jelentőségüket is. Mivel ezek a vegyületek sokáig kívül álltak a hagyományos ásványtan érdeklődési körén, ismertségük ma még alacsony szinten van, kutatásuk intenzíven folyik.

³ A *dolomit* esetében a kőzet és az azt felépítő fő ásvány neve megegyezik, amely gyakorlat nem szerencsés a tudományban. Ennek kiküszöbölésére az elmúlt évtizedek angolszász szakirodalmában már erősen terjed a kalcitból („mészpát”) álló *mész*³ (*limestone*) mintájára a dolomit (ásványból) felépülő *dolokő* (*dolostone*) név a dolomitekőzet megjelölésére. A szó a magyar szaknyelvben még nem vert gyökeret, de elterjedése várható.

Irodalomjegyzék az első részhez

- Banfield, J. F., Nealson, K. H. (eds, 1997): Geomicrobiology: Interactions between microbes and minerals, *Reviews in Mineralogy*, 35, 448 pp.
- Bognár L. (1995): Ásványnévtár, ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 345 pp.
(<http://www.tankonyvtar.hu/geologia/asvanynevtar-080904-5>)
- Bognár L. (1999): Ásványhatározó, Második, átdolgozott és bővített kiadás, ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 478 pp.
- Farkas, I. M., Weiszbürg, T. (2006): Ülepedő és szálló por ásványtani vizsgálata a romániai Kolozs megyéből, *Földtani Közlöny*, 136/4, pp. 547–572.
- Gaines, R. V., Skinner, H. C. W., Foord, E. E., Mason, B. & Rosenzweig, A. (1997): *Dana's New Mineralogy (The System of Mineralogy of James Dwight Dana and Edward Salisbury Dana)*, John Wiley & Sons Inc., New York. Eighth edition, 1819 pp.
- Guthrie, G. D., Mossman, B. T. (eds, 1993): Health effects of mineral dusts, *Reviews in Mineralogy*, 28, 584 pp.
- Koch S., Sztrókay K. I. (1986): Ásványtan I–II., Harmadik, javított kiadás, Tankönyvkiadó, Budapest, 936 pp. (<http://mek.oszk.hu/04700/04799/>)
- Sahai, N. (ed, 2007): Medical mineralogy and geochemistry, *Elements – An International Magazine for Mineralogy and Geochemistry*, 3/6 (pp. 369–440).
- Sahai, N., Schoonen, M. A. A. (eds, 2006): Medical mineralogy and geochemistry, *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 64, 332 pp.
- Szakáll S. (2005): Ásványrendszertan, Miskolci Egyetemi Kiadó, Miskolc, 336 pp.
- Szakáll S., Gatter I., Szendrei G. (2005): A magyarországi ásványfajok, Kőország Kiadó, Budapest, 427 pp.
- Vaughan, D. J., Wogelius, R. A. (eds, 2000): Environmental Mineralogy, *EMU Notes in Mineralogy*, 2, Eötvös University Press, Budapest, 434 pp.

II. rész

Azbesztek: a környezeti ásványtan alkalmazhatósága egy kiemelt ipari ásványcsoport példáján

A II. rész tartalma (rövid összefoglaló)

Az azbeszt gyűjtőfogalom, egyes szálás megjelenésű szilikátásványok összefoglaló neve. Az azbesztek kitűnő tulajdonságaik – hajlékonyságuk, sav- és hőállóságuk, jó hang- és hőszigetelő képességük, jó húzó-/szakítószilárdságuk, felületi megkötőképességük – miatt az ember igen korán felfedezte, és ipari méretekben alkalmazta a 19. század második felétől kezdve. A széles körű ipari alkalmazás a 20. század végéig jellemző módon (és a fejlődő országokban feltehetően ma is) magas porterhelésű munkakörülményeket jelentett, úgy a bányászok, mint a feldolgozók, a késztermékeket előállítók esetében. Mivel egyes azbesztalkalmazások kiporzás elleni védelme megoldatlan volt, sokszor még a végfelhasználók is magas azbesztszál koncentrációjú levegőt lélegeztek be.

Az extrém porterhelésben dolgozók légúti megbetegedései világítottak rá az azbesztek egészségkárosító hatására, ami az 1970-es évekre az Egyesült Államokból kiinduló, világméretű hisztériához és azbesztellenességhez vezetett. Mára az azbesztek felhasználása tiltott a fejlett társadalmak többségében, és a környezetünkbe beépített azbesztek eltávolítása, az azbesztek, azbeszttartalmú anyagok veszélyes hulladékként való lerakása, illetve ezen anyagok ártalmatlanítása komoly iparágga fejlődött, csakúgy, mint az azbesztek kiváltó anyagok kutatása, előállítás.

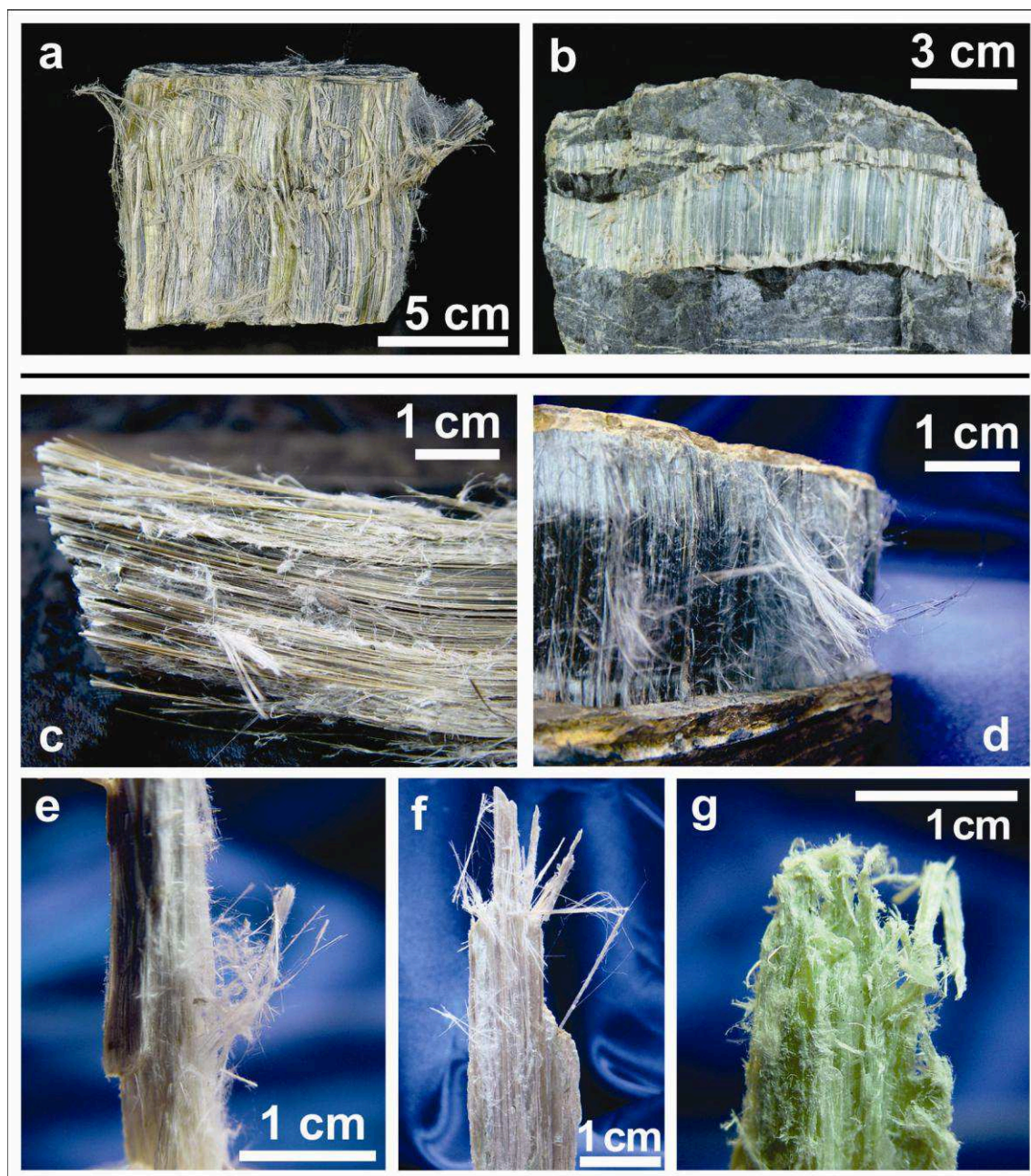
Olcsóságuk és egyszerű felhasználásuk miatt azonban az azbesztek a mai napig bányászszák, és a fejlődő országokban alkalmazzák is, amellet, hogy egyre nő az egészségkárosodásból adódó kártérítési perek száma, és egyre több országban tiltják be alkalmazásukat.

E rövid bevezetésből látható, hogy az azbesztek érzékeny, ellentmondásokkal, érdekellentétekkel terhelt témakört jelentenek. Bárhogy alakuljon is az azbesztek sorsa a tudomány fejlődésével (teljes tiltás vagy korlátozottan engedélyezett használat), mivel a 20. században nagy mennyiségben beépítettük őket környezetünkbe, a 21. század első felében még mindenképp munkát fognak biztosítani a környezettudományi szakemberek számára.

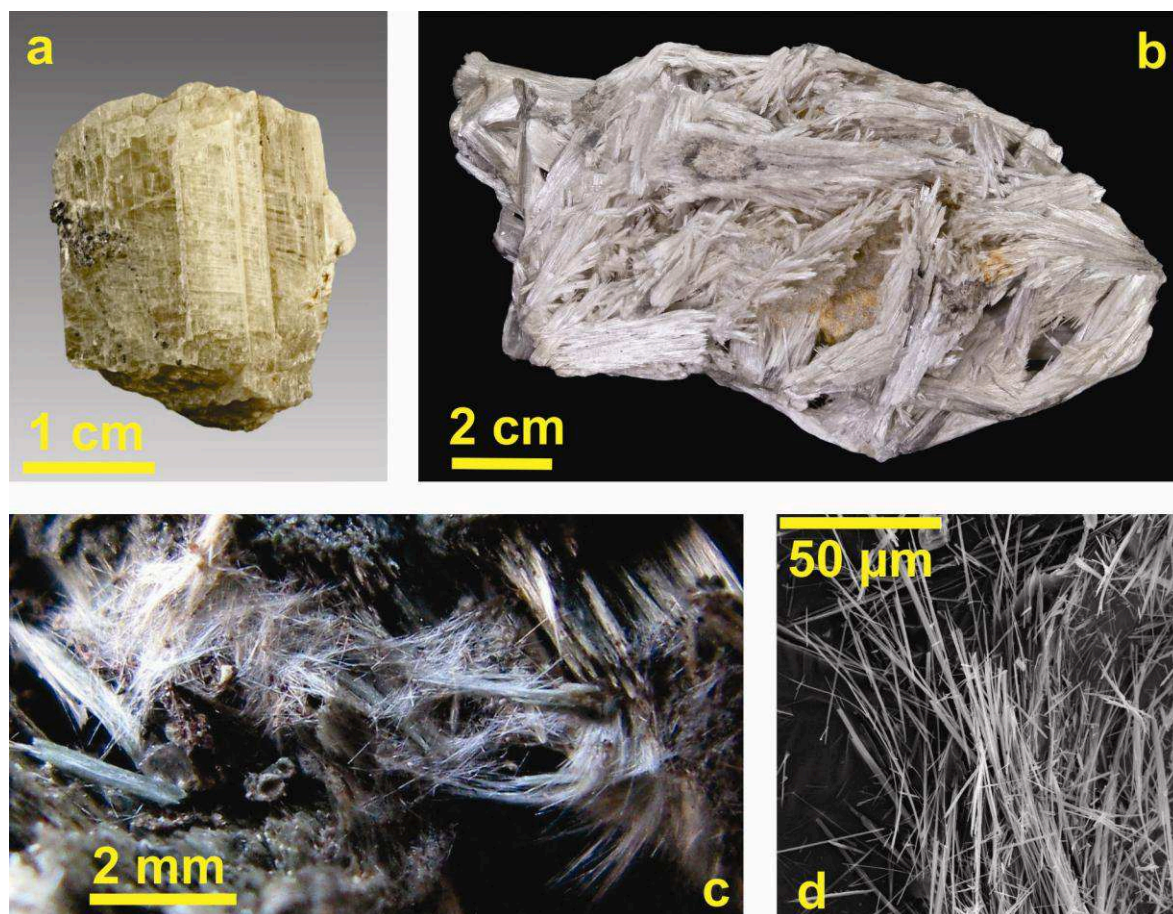
A könyv e második része elsőként ásványtani és jogi szempontból járja körül az azbeszt fogalmát. Vázolja az azbesztek egészségkárosító mechanizmusait, elkülönítve a porterhelésből adódó általános problémákat és az azbesztspecifikus jelenségeket. Röviden ismerteti az azbesztbányászat és -feldolgozás történetét. Áttekinti, mely országokban folyik ma is azbesztbányászat, -feldolgozás és -felhasználás. Ismerteti a főbb alkalmazási területeket, megmutatja, hol találkozhatunk azbesztekkel az épített környezetben, melyek a veszélyt hordozó és a veszélyt nem/korlátozottan jelentő alkalmazások. Ismerteti az azbesztekhez kötődő magyarországi joggyakorlatot, az azbesztmentesítés menetét. Bemutatja, hogy a természetes azbeszt előfordulások hol és hogyan jelenthetnek kockázatot a lakosságra. Röviden ismerteti a ma legelterjedtebb azbeszthelyettesítő anyagokat. Mindeközben megmutatja, hogy ebben a komplex kérdéskörben hány helyen juthat fontos szerep a jól képzett ásványtudományi és környezettudományi szakembernek, milyen anyagvizsgálati módszereket alkalmaznak az azbesztek azonosítására, milyen lehetséges buktatókat kell szem előtt tartani ezen vizsgálatok alkalmazásánál, illetve az eredmények kiértékelésénél.

7. Az azbeszt fogalma

Az azbeszt gyűjtőfogalom, egyes szilikátásványok szálas megjelenésű változatainak összefoglaló neve (7.1.–7.2. ábra). Az iparban alkalmazott azbesztek két ásványcsoportból kerülnek ki: a *szerpentin*, illetve az *amfibol* csoportból.



7.1. ábra: A hat azbesztként szabályozott ásvány azbeszt megjelenésű változatai: a-b) Krizotilazbeszt, Quebec, Kanada. c-g) Amfibolazbesztek: c) gruneritazbeszt (amozit vagy barna azbeszt), Dél-Afrika; d) riebeckitazbeszt (krokidolit vagy kékazbeszt), Dél-Afrika; e) tremolitazbeszt, USA; f) antofillitazbeszt, lelőhelye ismeretlen; g) aktinolitazbeszt, USA. A lépték tájékoztató jellegű. A képek forrása: © Asbestorama (www.flickr.com)



7.2. ábra: Tremolit (amfibil) különböző megjelenési formái:

a) jól fejlett kristály; b) nyúlt oszlopos kristálycsoport; c) azbeszt megjelenés; d) azbeszt megjelenés pásztázó elektronmikroszkópos felvételen. Az a) és b) képeken szereplő példányok nem jelentenek környezeti kockázatot, még porrá törve sem. A c) és d) képeken szereplő szálas változatokból könnyen kiszabadulhatnak a belélegezhető méretű amfibolszálak, így tömeges előfordulásuk környezeti kockázatot jelent

A példányok és fényképek forrása: a) Franklin, New Jersey, USA (mindat.org, fénykép száma: 246783), b) Campolungo, Ticino, Svájc (a tremolit típuslelőhelye), Didier Descouens felvétele (en.wikipedia.org), c) Útbevágás, 9-es út, Wellesley, Massachusetts, USA, Peter Cristofono felvétele (mindat.org, fénykép száma: 159086), d) El Dorado, California, USA, Greg Meecker (az Amerikai Geológiai Szolgálat azbeszt fotógalériája, usgsprobe.cr.usgs.gov)

A szerpentin csoport négy ásványfaja közül (antigorit, krizotil, lizardit, poligonális szerpentin) a *krizotil* mindig szálas, mivel *feltekert szerkezetében* kódolva van a szálas megjelenés, de az *antigorit* és a *poligonális szerpentin* is lehet szálas.

Az amfibolok *szalagszerkezete* is hordozza a szálas megjelenés lehetőségét, ám ezek a gyakori kőzetalkotó ásványok legtöbbször jól fejlett, oszlopos-táblás (nem azbeszt) megjelenésűek (7.2.a.-b. ábra), csak *különleges geológiai körülmények* között kristályosodnak szálas *amfibolazbeszt*ként.

Az azbesztszálak igazi természetes *nanoanyagok*, a szabad szemmel látható „szálak” valójában egyedi („elemi”) szálacskákból álló *szálkötegek*, ezért az elemi szálakig foszlathatók. Az amfibolazbeszt elemi szálak átmérője többnyire 500 nm (=0,5 μm) alatti, hosszúsága a néhány μm-től több 100 μm-ig terjedhet. A krizotil (szerpenticsoport) esetében az elemi szálak átmérője legfeljebb néhány 10 nm.

A vékony szálas („egydimenziós”) megjelenés a jól fejlett kristályokkal összehasonlítva hatalmas *fajlagos felületet*¹ biztosít az azbeszteknek. Ugyanakkora tömegű amfibol *azbesztként* (7.2.c.-d. ábra) akár tízezerszer is nagyobb felületű, mint egy egységes, folytonos, jól fejlett kristály (7.2.a.-b. ábra).

Az azbeszteknek azonban még két különleges tulajdonsága van. *Fizikai* viselkedése lényegesen eltér a hagyományos ásványokétól: rugalmas, szőhető, fonható; *kémiai* pedig – éppen ellentétesen azzal, amit a nagyobb fajlagos felület alapján várnánk – ellenállóbbá, nehezebben oldhatóvá, nehezebben felbonthatóvá válik. E két tulajdonság együttesen eredményezi *eltérő biokémiai* – és emiatt különleges egészségi – hatását. A különleges viselkedés oka, hogy a nanoszálal kristályosodás következtében felületi szerkezete lényegesen eltér az ideális kristályszerkezettől.

Az egészségi kockázatok miatt az azbeszt a *jogalkotásba* is bekerült az elmúlt 50 évben. Az azbeszt **jogi definíciója** *anyag minőséget* (ásványtani kritérium, 7.1. táblázat) és *számszerűsített méretinformációt* (alaki vagy morfológiai kritérium) is magában foglal. Röviden összegezve:

A) Ásványtani kritérium: jogi szempontból 6 ásványfaj² szálas változatait tekintjük azbeszteknek, ezek a *szerpentin csoportból* a **krizotil**, az *amfibol csoportból* pedig az **aktinolit**, az **antofillit**, a **grunerit**, a **riebeckit** és a **tremolit** (7.1. táblázat).

B) Alaki (morfológiai) kritérium (az Európai Unióban, így Magyarországon is): alakját tekintve azbesztek minősítendő az a **szál**, amelynek **hossza nagyobb, mint 5 µm** (=0,005 mm), **átmérője kisebb, mint 3 µm** (=0,003 mm), valamint **hossz:átmérő aránya nagyobb, mint 3:1** (l:d>3:1).

Azbesztásványok szép példáit a 7.1. ábra szemlélteti. Ezeket a szálas megjelenésű ásványokat az ember már az őskorban felfedezte magának, de ipari méretekben csak a 19. századtól kezdte felhasználni. Fontos megjegyezni, hogy az azbeszt az ásványi nyersanyagok³ azon csoportjába tartozik, ahol az ember nem alakítja át a természetes vegyületeket, hanem úgy használja fel őket, ahogy keletkeztek. Ez azt jelenti, hogy még beépített formában (7.3. ábra) is megőrzi anyagi identitását (alakját, kémiai összetételét és kémiai kötéseit, kristályszerkezetét), így a környezetkutató az ásványtanból, anyagtudományból megismert eszköztárat alkalmazhatja kutatásukra.

Az azbesztek bányászata, ipari feldolgozása a 19. század végétől kezdve szükségszerűen nagy porterheléssel járt a munkások számára több évtizeden keresztül. Így derült ki, hogy

¹ A fajlagos felület egységnyi tömegű (vagy térfogatú) anyag felülete.

² Ennél több ásványt ismerünk szálas megjelenéssel, főleg szilikátokat, amelyek sokszor az azbesztekéhez hasonló egészségi kockázatot hordoznak. Ezek sokszor más ásványi nyersanyagok alárendelt (legfeljebb néhány százalékos) alkotórészeként kerültek be mesterséges (épített) környezetünkbe, és természetes előfordulásuk mellett akaratlan alkalmazásuk is hordozhat környezeti kockázatot (lásd a 12. fejezetet).

³ Az ásványi nyersanyagokat az ember többnyire átalakítja saját céljaira: az ércásványokból fémeket nyer ki, például a magnetitből ($\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$ köbös), hematitből ($\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_3$ trig) és szideritből ($\text{Fe}^{2+}\text{CO}_3$ trig) a vasat. A vas elemi formában (Fe^0) van az acélban, míg ércásványaiban két vagy három vegyértékű kationként: tehát az ember a feldolgozáskor egy vegyületet felbontott (kémiai kötéseket szakított fel, a vasat redukálta), és új anyagi minőséget (ötvözet) hozott létre. Az acél anyagvizsgálatából tehát többnyire nem tudjuk meg, milyen ércásványból származott a hozzá való vas.

Ha a kvarchomokot az építkezésnél a betonba keverjük, a kvarc kvarc marad, megőrzi kémiai kötéseit, kristályszerkezetét és összetételét. Ha egy betonarabot röntgen-pordiffrakcióval vizsgálunk, megtaláljuk benne a kvarcot. Ha azonban a kvarchomokból üveget gyártunk, az üveg már nem tartalmaz kvarcot, más anyagok hozzáadásával és az olvasztással új anyagi minőség jön létre. Az azbesztek felhasználása a kvarchomok betonba keveréséhez hasonlítható: a vegyület nem alakul át.

az azbesztek károsíthatják az egészséget. Mivel az azbeszt ipari fogalomból munka- és közegészségügyi problémává lépett elő, így a hozzá kötődő szabályozás világszerte egyre inkább korlátozó érvényű: korlátozza a bizonyítottan egészséget veszélyeztető szálak szilikátok használatát, és egészségügyi határértéket állapít meg a levegő azbesztszál koncentrációjára. Éppen ezért alapvető fontosságú, hogy világos képünk legyen arról, mit kell azbesztszálnak neveznünk, és mit nem.

A jelenlegi szabályozás világszerte két kritériumhoz köti az azbesztszálak azonosítását (levegőminták vizsgálatához kötődően): ásványtani és alaki (morfológiai) kritériumhoz. Látni fogjuk, hogy mindkét kritérium „lötyög” kicsit. Természetesen a környezettudományi szakember feladata nem az, hogy megkeresse a törvényi kiskaput, ha épp ezt követeli meg egy jogi eljárás, egy munkavédelmi ellenőrzés, esetleg egy ingatlan értékesítés előtti felmérése, hanem hogy – akár azbesztnak törvényileg nem minősülő szálak szilikátásvány esetén is – kutassa, illetve reálisan felmérje az esetleges egészségi kockázatot, és ennek függvényében a szükséges és elégséges óvintézkedések megtételére serkentse az illetékeket.



7.3. ábra: Azbeszttartalmú hullámpala („eternit”) egy bányaeépületen. A közeli felvételen jól látszik, hogy a pala szálerősítésére riebeckitazbesztet (kereskedelmi nevén krokidolitot vagy kékazbesztet) alkalmaztak. Grozdics Tibor felvételei

7.1 Az azbesztszál – ásványtani kritérium

Azbesztszálnak, ahogy fent röviden már jeleztük, öt amfibol és egy szerpentinásvány szálak változatait nevezi a jog. A jogszabályok a vegyületeket, így az ásványokat is, az Ame-

rikai Egyesült Államokból származó CAS számok⁴ alapján azonosítják. A **7.1. táblázat** megadja, hogyan fordulnak elő az azbesztek a törvényekben (érvényes ásványnev, jogszabályi név, CAS számok).

	Érvényes ásványnev	Törvényben szereplő nevek (részben ipari elnevezések)	Törvényben szereplő ásványnev angolul	Törvényben szereplő CAS#	Megjegyzés
-		azbeszt	<i>asbestos</i>	1332-21-4	gyűjtőfogalom, nem egyedi vegyületazonosító
AMFIBOL azbeszt	aktinolit azbeszt	aktinolit azbeszt	<i>actinolite asbestos</i>	77536-66-4	nem szálas aktinolit CAS#: 68992-52-9, 12172-67-7
	antofillit azbeszt	antofillit azbeszt	<i>anthophyllite asbestos</i>	77536-67-5	nem szálas antofillit CAS#: 17068-78-9
	grunerit azbeszt	grunerit azbeszt (amozit, illetve barna azbeszt)	<i>amosite (grunerite or (brown asbestos))</i>	12172-73-5	nem szálas grunerit CAS#: 14567-61-4
	riebeckit azbeszt	krokidolit (kékazbeszt)	<i>crocidolite (blue asbestos)</i>	12001-28-4	nem szálas riebeckit CAS#: 61105-30-4, 17787-87-0
	tremolit azbeszt	tremolit azbeszt	<i>tremolite asbestos</i>	77536-68-6	nem szálas tremolit CAS#: 14567-73-8
SZERPENTIN azbeszt	krizotil	krizotil (fehér azbeszt)	<i>chrysotile</i>	12001-29-5	EU-s irányelv magyar fordításában, illetve magyar jogszabályban olykor tévesen krizolit* ; további CAS#: 101398-88-3 (krizotil-1Mc1); 101398-87-2 (krizotil-2Orc1); 101398-86-1 (krizotil-2Mc1); 132207-32-0 (krizotil azbeszt)**

7.1. táblázat: Azbesztek a nemzetközi és magyar joggyakorlatban. Figyelem! A nem szálas (nem azbeszt) amfibolfajoknak is van CAS azonosítója, olykor több is (lásd a Megjegyzés oszlopot).

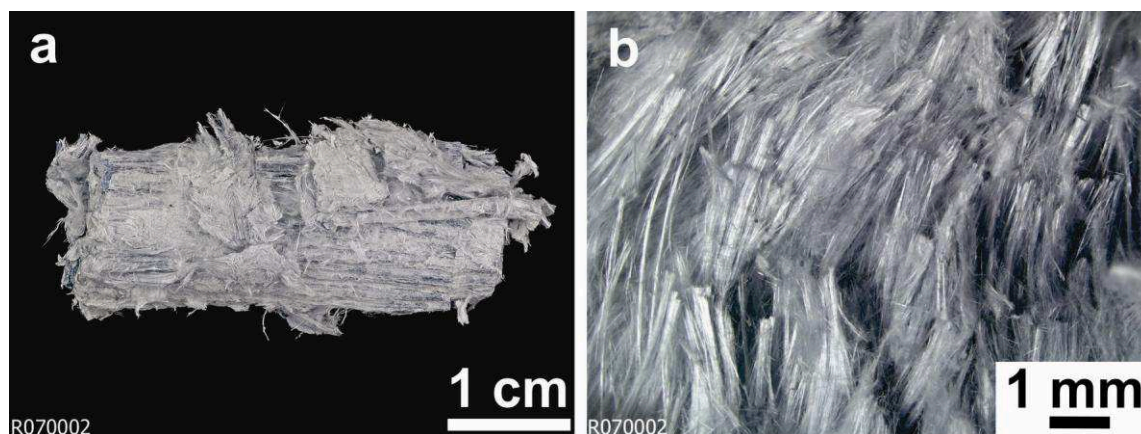
* A téves írásmód különösen szerencsétlen, mert létezik krizolit nevű ásvány is (az olivin drágakő-változata), amely a szerpentinhez hasonlóan szintén zöld, de sosem jelenik meg azbesztként.

** A krizotil esetében kérdéses, hogy van-e értelme számmal megkülönböztetni az azbeszt megjelenést, hiszen a krizotil csak szálas lehet

⁴ A CAS mozaikszó, a *Chemical Abstracts Service* rövidítése. A *Chemical Abstracts Service* az Amerikai Kémiai Társaság (*American Chemical Society*) osztagja, amely eredeti célja szerint az ismert vegyületeket katalogizálja: minden, a kémiai szakirodalomban megjelenő anyagot egyedi azonosítóval lát el, és adatokat tárol róluk (összetétel, szerkezet, tulajdonságok, szakirodalom stb.). Ezek az adatlapok (*CAS registry*) térítés ellenében mindenki számára hozzáférhetők a www.cas.org honlapon keresztül. Annak ellenére, hogy a CAS adatbázisból hiányzik a szigorú tudományos rendszerezés igénye, és a CAS adatlapok sok esetben csak neveket tárolnak, valós összetételbeli és kémiai adatok nélkül, a CAS számok (*CAS registry number*) általánosan elfogadott vegyületazonosítók a jogalkotásban.

A jogszabályokat az ipari alkalmazások hívták életre, így a jogszabályok minden esetben az ipari alkalmazásból, ipari elnevezésekből indulnak ki. Nem is életszerű, hogy a természettudományokra jellemző precizitással (olykor nanoléptékű, pontos szerkezeti információ; pontos kémiai összetételi tartomány) adják meg az azbesztek tiltólistáját. A jogszabály célja, hogy meghatározza, mely egészségi kockázatot hordozó anyag, milyen beépítés/felhasználás mellett, milyen portterheléssel veszélyes az emberi egészségre. Ennek alapján dönt a szakember az azbesztmentesítésről, vagy az azbeszt kiporzása elleni védelemről az egyes alkalmazásoknál.

Az ásványtani kritérium „lötyögése” az elnevezések ásvány nevezéktani pongyolaságából fakad. Az ipari elnevezések (pl. kékazbeszt/krokidolit; barna azbeszt/amozit) nem érvényes⁵ ásványnevek. Az érvényes amfibolnevek (aktinolit, antofillit, grunerit, riebeckit, tremolit) esetében pedig előfordulhat, hogy a jelenlegi, túlspecializált, túlfinomított kristálykémiai alapú nevezéktan (Leake et al., 1997; 2003; 7.2. táblázat) szűkebb kémiai összetételi tartományt ad meg, mint az iparban alkalmazott szálás amfibolok összetételi tartománya (7.4. ábra). Így egy pontos kémiai összetétel mérésre hivatkozva kibújhat a törvény hatálya alól egy szálás alkalmazás.



7.4. ábra: Bolíviai magnezioriebeckit (Alto Chapare, Cochabamba). Az amfibol nevezéktan nyomán jogilag nem minősül azbesztnak. Kisebb vastartalma miatt színe egészen halványkék, néhány négyzetkilométernyi területen, több kisebb bányában fejtették az 1930–40-es években (mindat.org).

Képek forrása: www.ruff.info (RRUFF azonosító: R070002)

Fontos további lötyögés forrása, hogy egyre több amfibolfajt ismerünk azbesztszerű szálás megjelenéssel és egészségkárosító hatással. Ezek jelenlegi tudásunk szerint ásványtani ritkaságok, és ipari alkalmazásuk *azbesztként* valószínűleg sosem volt, de lelőhelyük környezetében környezeti kockázatot jelentenek a lakosságra. Szálás amfibolt találtak már építőanyagként használt kőzetben (fluoroedenit az olaszországi Etna vulkáni kőzeteiben, Bruni et al., 2006, lásd részletesen az esettanulmányoknál), vagy egyéb hasznosított ásványi nyersanyagban (winchit a szigetelőanyagként hasznosított vermikulitban, Libby, Montana, USA, Bandli et al., 2003), maximum néhány százaléknyi mennyiségben. Ezekben az

⁵ Az ásványfajok rendszerét a Nemzetközi Ásványtani Társaság (*International Mineralogical Association*, röviden *IMA*, honlapja: ima.geo.arizona.edu) Nevezéktani Bizottsága (*IMA Commission on New Minerals Nomenclature and Classification, IMA-CNMNC*) gondozza. A mai ismereteink szerinti kb. 4500 ásványfajból álló rendszerben ez a bizottság tart rendet, rendszeresen megjelenő nevezéktani ajánlásai egyrészt folyamatosan gyomlálják az illesztetlenségeket, másrészt besorolják az újonnan felfedezett fajokat. Érvényes ásványnév tehát az IMA-CNMNC által nyilvántartott ásványnév, amely egy ásványt kristálykémiai alapon, egyedi szerkezet és összetétel alapján határoz meg.

esetekben részben a megbetegedések irányították rá a figyelmet a szálas amfibolok jelenlétére.

Az ásványtudományi, anyagtudományi, illetve a környezettudományi szakembertől – akiknek mért adatok alapján, többnyire nem teljes adathalmazon, és nem egyértelmű jogszabályok alapján kell döntést hozniuk – tehát a következő egyszerűsítő elvonatkoztatás várható el, szálas anyagok vizsgálata esetén: szerpentin (krizotil) vagy amfibol kristályszerkezet és az alább ismertetendő alaki kritériumok megléte esetén azbesztnak kell hívni a vizsgált anyagot.

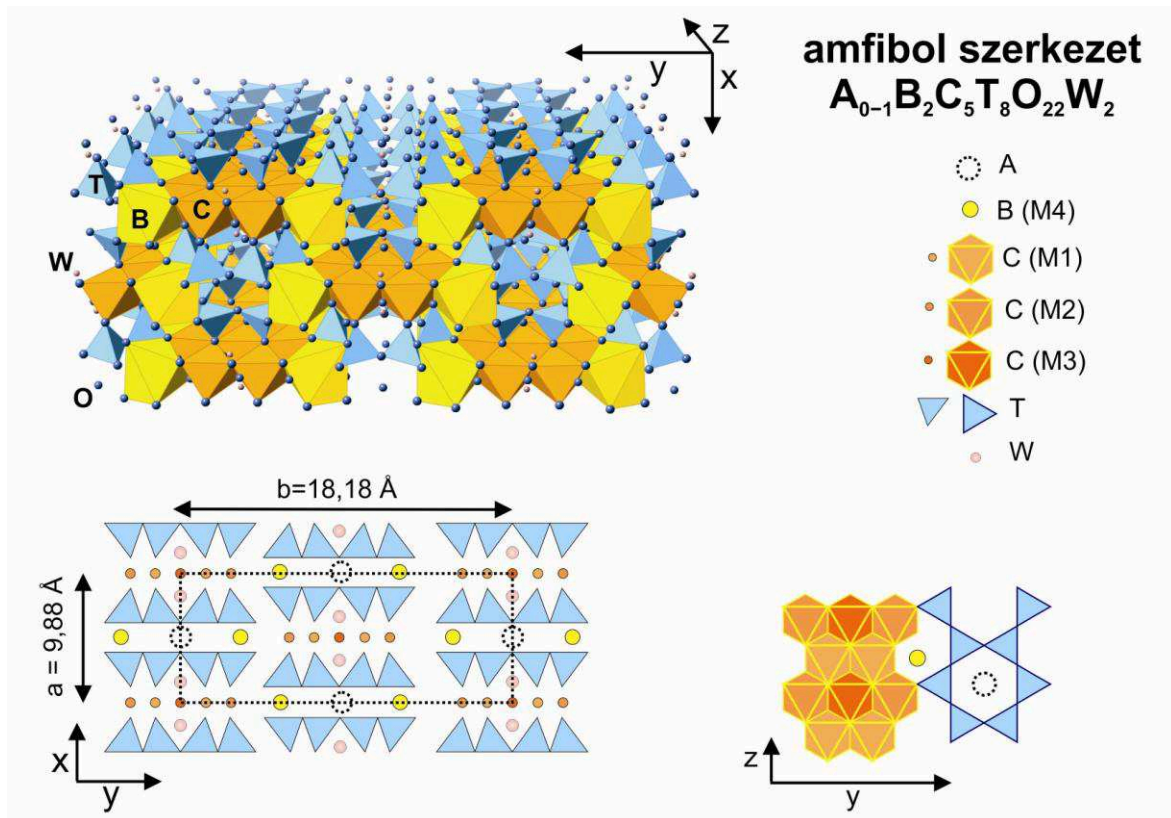
Az alábbiakban röviden bemutatjuk a két érintett ásványcsoportot, az amfibol csoportot és a szerpentin csoportba tartozó krizotilt, további információk ezekről az ásványokról a rendszeres ásványtani fejezetben, illetve ásványtani kézikönyvekben találhatók.

7.1.1 Az amfibol csoport

Az amfibolok a szalagszilikátok közé tartozó ásványok, ahol az alapszerkezethez (**7.5. ábra**) igen változatos kémiai összetétel (**7.2.–7.3. táblázat**, **7.6.–7.7. ábra**) társulhat. Ebből adódóan a jelenleg a Nemzetközi Ásványtani Társaság (*IMA*) által nyilvántartott amfibol fajok száma megközelíti a nyolcvanat ([Leake et al., 1997](#); [2003](#)). A kémiai változatosságból adódóan az amfibolok nevezéktana a mai napig vita tárgyát képezi (lásd pl. [Hawthorne és Oberti, 2006](#) munkáját).

Az amfibolok általános képlete a következőképp írható fel: $A_{0-1}B_2C_5T_8O_{22}W_2$ (A, B, C, T és W nem vegyjelek, ionpozíciókat jelölnek, míg O az oxigént jelöli). A szerkezet alapját a kettős láncba, azaz szalagba rendeződő $[TO_4]$ tetraéderek adják (innen a szalagszilikát név). A tetraéderszalagok a szerkezetnek vonalas jelleget kölcsönöznek, innen az amfibolok hosszúkás termete, a hosszanti hasadás, és ez egyben az azbesztszerű, szálas megjelenés szerkezeti alapja is. Az amfibolok szerkezetét a **7.5. ábra**, összetételbeli változatosságát a **7.2. táblázat** szemlélteti.

A szabad szemmel jól látható, olykor több centiméteres „azbesztszál” minden esetben *szálköteg*, rengeteg *elemi szál* együttese, ezért foszlatható az elemi szálakig (**7.8.a. ábra**). Az elemi szál a szálköteg egyedi szálacskája, amely nem hasadással jött létre, hanem szálas formában kristályosodott. Azbesztektnél tehát ne használjuk a hasadás/hasítás kifejezést. Az elemi amfibolazbesztszálak átmérője TEM, illetve FESEM vizsgálatok ([Huntington et al., 2008](#)) alapján többnyire 0,5 μm alatti, metszete változó, hosszúsága a néhány μm -tól több 100 μm -ig terjedhet (**7.8. ábra**).



7.5. ábra: Az amfibol alapszerkezet, háromdimenziós modell és két vázlatos metszet (xy és yz). A kék $[TO_4]$ tetraéderek közepén Si^{4+} kation foglal helyet, csúcsait sötétkéssel jelölt oxigén anionok (O^{2-}) jelölik ki. A tetraéderek, mintha lapjukkal az asztal lapjára fektetnénk őket, cikk-cakkos elrendeződésben láncokká állnak össze (két csúcsukon, azaz két oxigéneken keresztül másik tetraéderhez kapcsolódnak), két lánc összekapcsolódásával pedig szalag jön létre. Két tetraéderszalag egymással szembe fordul, és őket a narancssárga színnel ábrázolt oktaéderszalag kapcsolja össze, amely felváltva két, illetve három oktaéder szélességű. Az oktaéderszalag $[CO_6]$ és $[CO_5W]$ oktaéderekből áll: az oktaéderek közepén a C kation foglal helyet, hat csúcsán pedig sötétkék színnel jelölt oxigén (O^{2-}), illetve rózsaszínnel ábrázolt W anionok foglalnak helyet. A két szembe forduló tetraéderszalagot a közbeékelte oktaéderszalaggal I gerendának nevezi a szakirodalom, a keresztmetszet rajzolata után, de a szemléletesség kedvéért hasonlítható az amerikai hot-doghoz is: a hosszúka, egymás felé forduló bagettszeletek a tetraéderszalagok, míg közöttük a virsli az oktaéderszalag. Az egymás mellé rendeződő, végtelen szalagösszleteket („hot-dogsereget”) az A és a B kationok kapcsolják össze háromdimenziós szerkezetté, az A kationt 12, a B kationt 8 oxigén anion veszi körül ($[AO_{12}]$ és $[BO_8]$ poliéderek, előbbi egy hatszög, utóbbi egy négyzet alapú hasábhöz hasonlítható). Az amfibolok szimmetriája rombos vagy monoklin. A bal felső, háromdimenziós ábra az aktinolit szerkezetét mutatja, ahol az A pozíció üresen marad (az $[AO_{12}]$ poliéder nem látszik), a $[BO_8]$ poliéder citromsárga. Az aktinolit átlagos kémiai összetétele így adható meg: $Ca_2(Mg,Fe^{2+})_5[Si_8O_{22}(OH)_2]$, a W anion jelen esetben OH^- .



A: □ (üres pozíció), K, Na

B: Na, Ca, Mg, Fe²⁺, Mn²⁺, Li (Zn, Ni, Co)

C: Ca, Mg, Fe²⁺, Mn²⁺, Li (Zn, Ni, Co)
Al, Fe³⁺, (Mn³⁺, Zr³⁺), Ti⁴⁺, Zr⁴⁺

T: Si, Al, Ti⁴⁺

O: O

W: OH, F, Cl, O

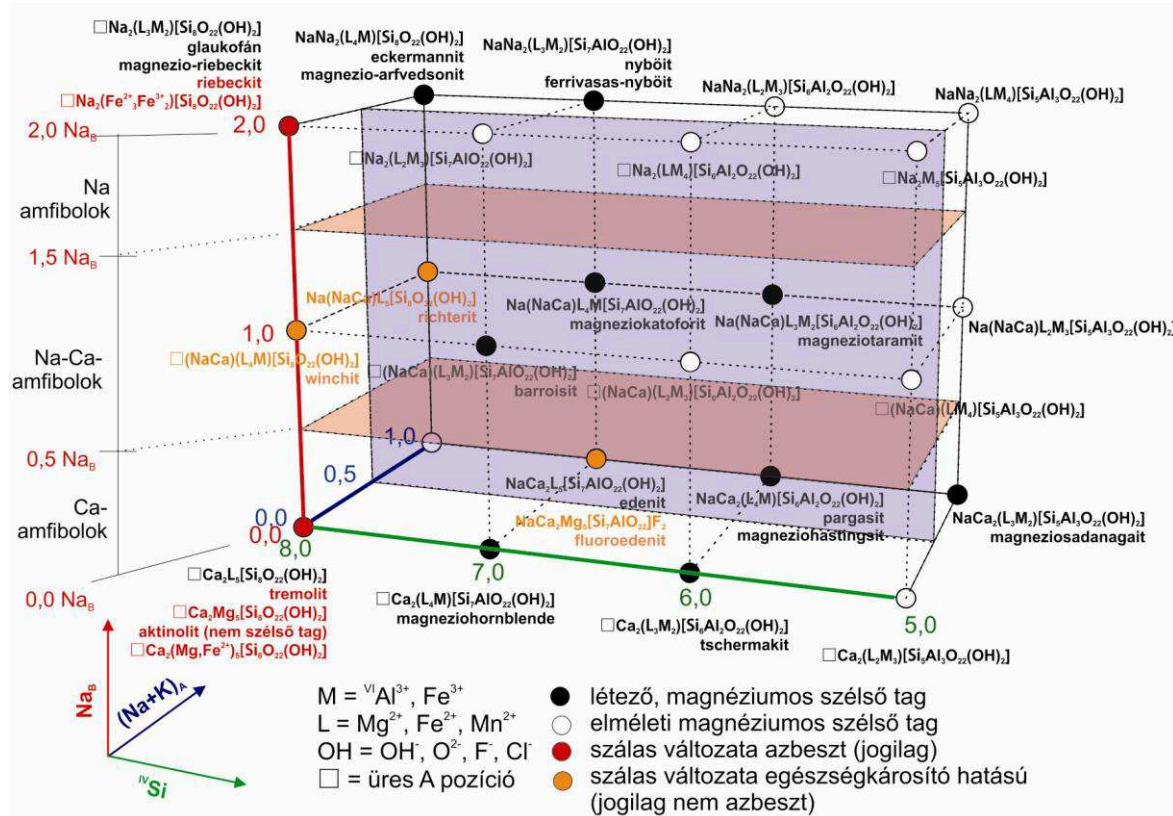
7.2. táblázat: Az amfibolok általános képlete és a helyettesítések az egyes kation (A, B, C, T) pozíciókban, illetve az anionpozíciókban (O, W). Nem csoda, hogy a lehetőségek nagy száma nyomán ma mintegy 80 amfibolfajt ismerünk. A kationok töltését csak a többféle oxidációs számmal előforduló fémeknél jelöltük

Amfibolcsoportok a B pozíció betöltöttsége alapján	Amfibol, melynek szálás változata jogilag azbeszt	Amfibol, melynek szálás változata jogilag nem azbeszt
1. Mg-Fe-Mn-Li-csoport: ^B (Mg,Fe,Mn,Li) ≥ 1,50 apfu	antofillit □ Mg ₃ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂ Mg/(Mg + Fe ²⁺) ≥ 0,50 apfu, Si > 7,00 apfu ^B Li < 1,00 apfu, ^C Li < 0,50 apfu (szimmetria: rombos, Pnma, illetve Pnmm, proto-antofillit) grunerit □ Fe ²⁺ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂ Mg/(Mg + Fe ²⁺) < 0,50 apfu Si > 7,00 apfu ^B Li < 1,00 apfu, ^C Li < 0,50 apfu (szimmetria: monoklin, C2/m, ritkábban P2/m)	
2. Ca-csoport: ^B (Mg,Fe ²⁺ ,Mn ²⁺ ,Li) ≤ 0,50 apfu ^B (Ca,Na) ≥ 1,00 apfu ^B Na < 0,50 apfu	tremolit □ Ca ₂ Mg ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂ 1 ≥ Mg/(Mg + Fe ²⁺) > 0,90 apfu Si > 7,50 apfu aktinolit □ Ca ₂ (Mg,Fe ²⁺) ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂ 0,90 ≥ Mg/(Mg + Fe ²⁺) > 0,50 apfu Si > 7,50 apfu	fluoroedenit NaCa ₂ Mg ₅ (Si,Al)O ₂₂ F ₂ ^B Ca ≥ 1,50 apfu, ^A (Na+K) ≥ 0,50 apfu Ti < 0,50 apfu Mg/(Mg + Fe ²⁺) ≥ 0,50 apfu
3. Na-Ca-csoport: ^B (Mg,Fe ²⁺ ,Mn ²⁺ ,Li) ≤ 0,50 apfu ^B (Ca,Na) ≥ 1,00 apfu 0,50 < ^B Na < 1,50 apfu		richterit □ Na(CaNa)Mg ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂ ^A (Na+K) ≥ 0,50 apfu, (Ca+ ^B Na) > 1,00 apfu Mg/(Mg + Fe ²⁺) ≥ 0,50 apfu winchit □ (CaNa)Mg ₄ (Al,Fe ³⁺)Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂ ^A (Na+K) < 0,50 apfu, (Ca+ ^B Na) > 1,00 apfu Mg/(Mg + Fe ²⁺) ≥ 0,50 apfu
4. Na-csoport: ^B (Mg,Fe ²⁺ ,Mn ²⁺ ,Li) ≤ 0,50 apfu ^B Na ≥ 1,50 apfu	riebeckit □ Na ₂ (Fe ²⁺ ,Fe ³⁺) ₃ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂ ^A (Na+K) < 0,50 apfu, ^{VI} Al < Fe ³⁺ apfu Li < 0,50 apfu ^{VI} Al + Fe ³⁺ + Mg + Fe ²⁺ > Mn ³⁺ + Mn ²⁺ apfu Mg/(Mg + Fe ²⁺) < 0,50 apfu Si > 7,50 apfu	magnezioriebeckit □ Na ₂ (Mg,Fe ³⁺) ₃ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂ ^A (Na+K) < 0,5 apfu, ^{VI} Al < Fe ³⁺ apfu Li < 0,50 apfu ^{VI} Al + Fe ³⁺ + Mg + Fe ²⁺ > Mn ³⁺ + Mn ²⁺ apfu Mg/(Mg + Fe ²⁺) ≥ 0,50 apfu Si > 7,50 apfu
5. Na-Ca-Mg-Fe-Mn-Li csoport (^B Li > 0,50 apfu): 0,50 < ^B (Mg,Fe ²⁺ ,Mn ²⁺ ,Li) < 1,50 apfu 0,50 ≤ ^B (Ca,Na) ≤ 1,50 apfu		

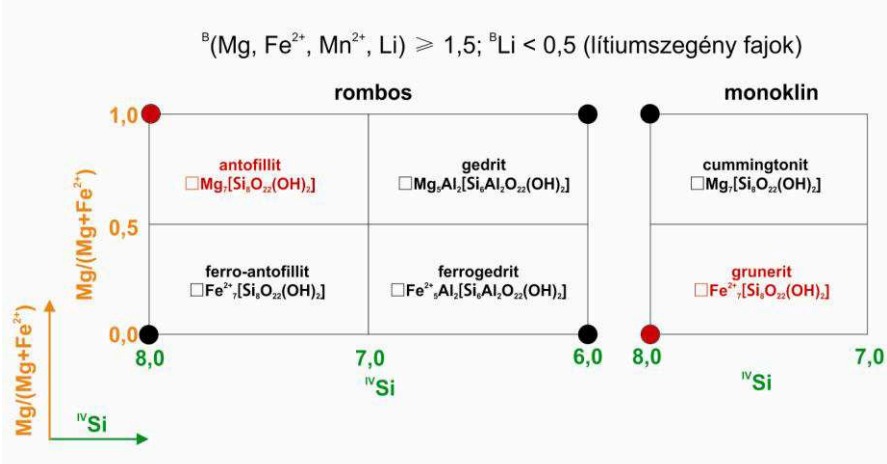
7.3. táblázat: A jelenlegi amfibol nevezéktan (Leake et al., 1997, módosította Leake et al., 2003) 5 fő amfibolcsoportja, a természetben szálás megjelenést is mutató, egészségkárosító hatással rendelkező, azbesztként szabályozott (piros) és nem szabályozott (narancssárga) amfibolfajokkal

Az amfibolazbeszt a legtipikusabb példa arra, hogy a szerkezet és kémiai összetétel önmagában nem határozza meg teljesen az ásványt, annak makroszkópos tulajdonságait. Amfibolazbeszt esetén a szálás alak, az extrém nagy fajlagos felület olyan makroszkópos tulajdonságokkal (pl. szakitószilárdság) ruházta fel az anyagot, amely pusztán a kristály-

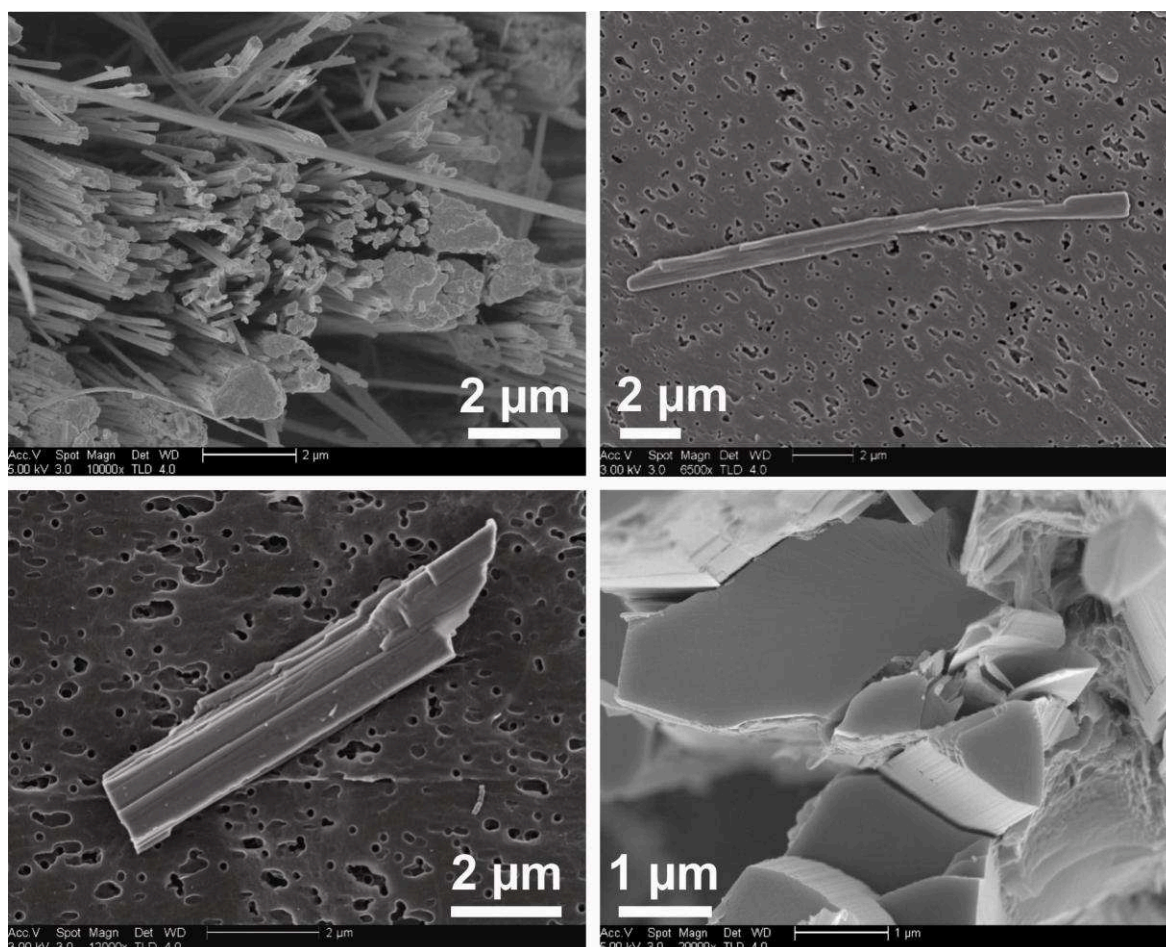
szerkezet és az összetétel alapján nem modellezhető/jóslható, és amely nem jellemző az ugyanolyan összetételű, de nem szálas, hanem oszlopos termetű amfibolok kristályokra. Az azbesztszálak és az egykristályok felületének összevetését az [1.1. számítási feladat](#) szolgálja.



7.6. ábra: Az amfibolok kémiai összetétel-tartományát ábrázoló tér (kivéve a lítiumtartalmú amfibolokat), [Leake et al. \(1997\)](#) alapján. Az ábra az egyszerűség kedvéért a „problémamentes” amfiboloknál csak a magnéziumgazdag szélső tagokat ábrázolja (fekete, illetve fehér körök). A szálas változatban azbesztiként szabályozott fajok pirossal, a jelenleg nem szabályozott, de szálas formában szintén egészségkárosító hatású fajokat narancssárgával adtuk meg



7.7. ábra: A 7.6. ábrán nem szereplő, lítiumtartalmú amfibolok Li-szegény csoportja [Leake et al. \(1997, 2003\)](#) alapján. A fajok közt két azbesztiként nyilvántartott faj is szerepel, érdekes, hogy a magnéziumdús antofillit szimmetriája rombos, míg a vasgazdag grunerit szimmetriája monoklin



7.8. ábra: FESEM felvételek azbesztes és változó mértékben nyúlt termetű amfibolszemcsékről. a) riebeckitaszbeszt, Ausztrália; b) „bisszolit” – tús, de még nem azbeszt amfibol, Ausztrália; c) tremolit, hasadási idom, Ala di Stura, Olaszország; d) antofillit, Grönland. Az R. J. Lee Group (USA) szíveségéből

Számítási feladat

Fajlagos felület: amfibolkristály és ugyanolyan térfogatú amfibolazbeszt szálköteg fajlagos felületének összevetése (1.1.)

A következő feladat azt szemlélteti, hogy az extrém vékony, szálak (=azbeszt) megjelenés milyen hatalmas fajlagos felületet biztosít a megszokott kristályalakokkal szemben (7.9. ábra). Nem csoda, hogy az azbesztet szűrőként is alkalmazták, pl. bor tisztítására.

Számítsuk ki egy amfibolkristály és vele azonos térfogatú amfibolazbeszt szálköteg felületét (A_{kr} , A_{ak} ; az alsó indexben a kr jelzés a kristályra, ak az azbeszt szálkötegre utal)!

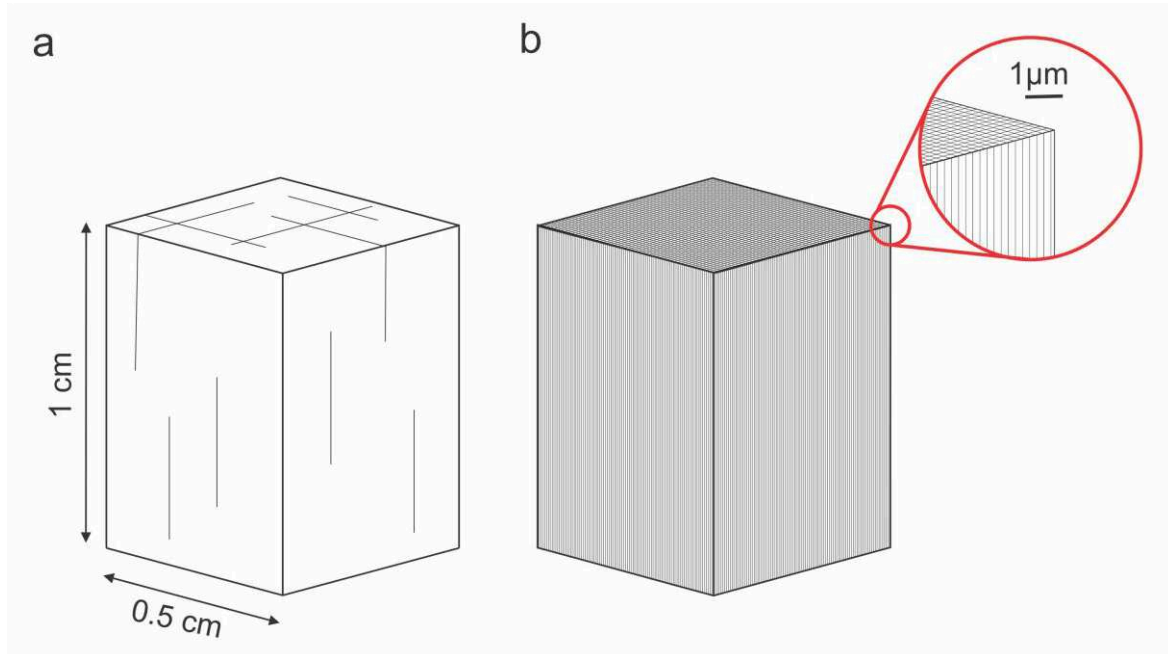
Adjuk meg a két felület arányát (A_{ak} / A_{kr})!

Adatok:

Az amfibolkristály legyen a lehető legegyszerűbb, rombusz alapú hasáb (rombos prizma és véglap kombinációja, 7.9.a. ábra). A kristályhasáb magassága $m_{kr}=1$ cm, a rombusz oldala $a_{kr}=0,5$ cm, a rombusz oldalai közti hegyesszög az amfibolok hasadási szögének kiegészítő szöge, azaz $\varphi=180^\circ-124^\circ=56^\circ$.

Az amfibolazbeszt-szálak ugyanilyen prizma alapú hasábok, magasságuk legyen szintén $m_a=1$ cm (az alsó indexben szereplő a jelzés az azbesztköteget felépítő elemi azbesztszállra utal, 7.9.b. ábra), csak a rombusz oldala kicsi (TEM felvételek alapján becsült): $a_a=0,2$ μm .

Figyelem! Az amfibolazbeszt-szálak nem hasadási idomok, hanem párhuzamosan egymás mellé nőtt vékony, hosszú amfibolkristályok! Sosem jelennek meg az ábrán szemléltetett nagyobb rombusz alapú hasábra rendeződve, csak a felületek összevetésére rendeztük őket ilyen alakzatba.



7.9. ábra: Illusztráció az 1.1. számítási feladathoz. a) Amfibol egykristály és b) vele azonos térfogatú, párhuzamosan egymás mellé nőtt amfibolazbeszt szálköteg

7.1.2 A krizotil

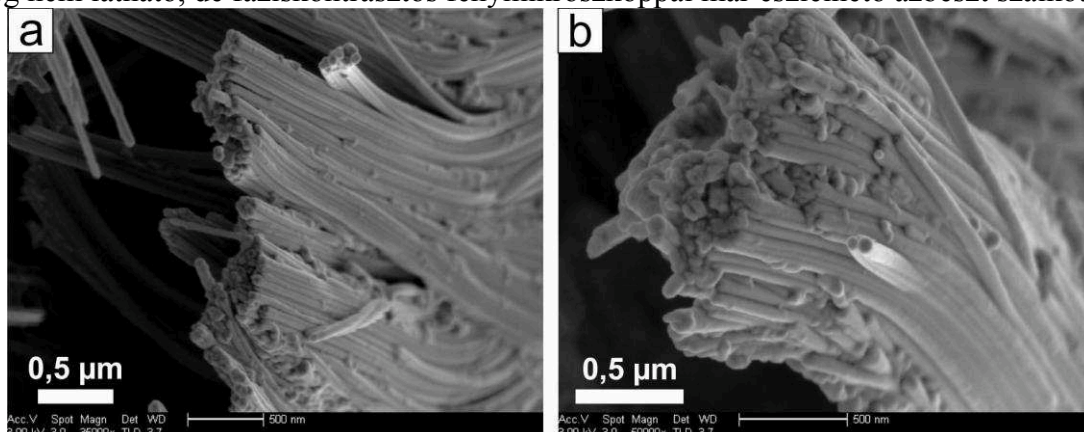
A krizotil⁶ a rétegszilikátok csoportjába tartozik, azon belül is a szerpentin csoportba.⁷ A szerpentin csoport ásványainak, így a krizotilnak is, az összetétele $Mg_3[Si_2O_5](OH)_4$, amely többféle szerkezettel párosul. A szerkezeti sokféleség abból adódik, hogy az összekapcsolódó tetraéder- (T) és oktaéderrétegek (O) között méretkülönbség van, amit különbözőképp lehet feloldani, a krizotil esetében éppen a rétegek megfelelő irányú feltekerésével (7.10.–7.12. ábra). A krizotil szerkezete tehát egyértelműen megmagyarázza a szálak megjelenést. A szálak belső átmérője a transzmissziós elektronmikroszkópos vizsgálatok alapján 60–80 Å (=6–8 nm) körüli, külső átmérője pedig nem haladja meg a néhány 100 Å-öt (néhány 10 nm-t; 7.12.b. ábra). Huntington és munkatársai (2008) krizotilazbeszt-szálak keresztmetszetét vizsgálva 0,05–0,06 μm (=500–600 Å) átlagos szálátmérőt állapítottak meg.

⁶ A krizotil több szerkezeti módosulattal rendelkezhet, megkülönböztetünk ortokrizotilt (rombos, krizotil- $2Or_{c1}$), parakrizotilt (rombos) és klinokrizotilt (monoklin, krizotil- $1M_{c1}$, illetve krizotil- $2M_{c1}$). Részben a közérthetőség kedvéért, részben pedig azért, mert sem a törvényekben, sem az orvosi kutatásokban stb. nem szerepel pontosabb orvosi besorolás, mi csak krizotilként hivatkozunk rá a továbbiakban.

⁷ A szerpentin csoportba tartozó ásványok a lizardit, antigorit, a krizotil és a poligonális szerpentin. A szerkezeti módosulatok sokszor összenőve jelennek meg, szerkezetileg feszegetve a kristály fogalmát is. A csoport ásványai szerkezeti változatosságuk miatt a mai napig az ásványtudományi szakemberek (mineralógusok) érdeklődésének középpontjában állnak.

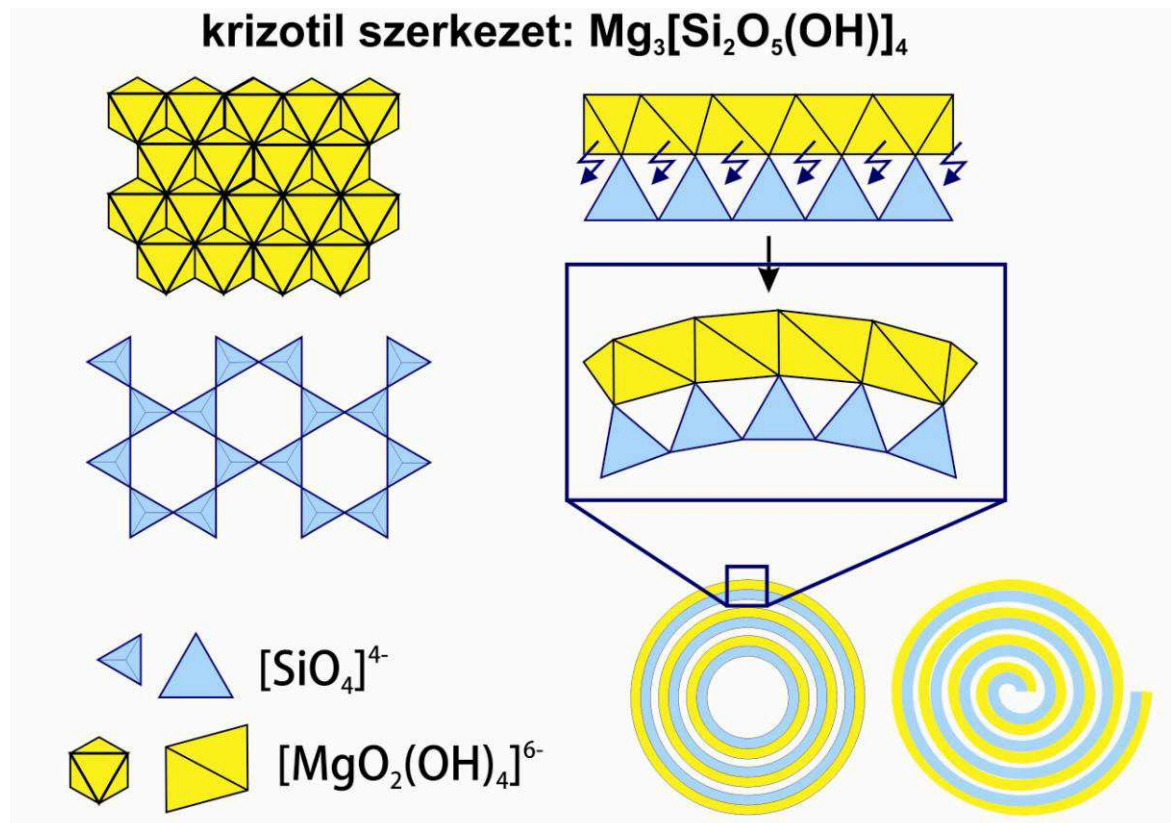
A polygonális szerpentin szintén szálas megjelenésű, de sokkal ritkább, mint a krizotil. A polygonális szerpentin-szálak vastagabbak a krizotilnál, átmérőjük a 150–500 nm-t is elérheti ([7.10.](#) és [7.12. ábra](#)).

Az [1.2. számítási feladat](#) azt szemlélteti, hogy hány elemi szálból áll a szabad szemmel még nem látható, de fáziskontrasztos fénymikroszkóppal már észlelhető azbeszt szálköteg.

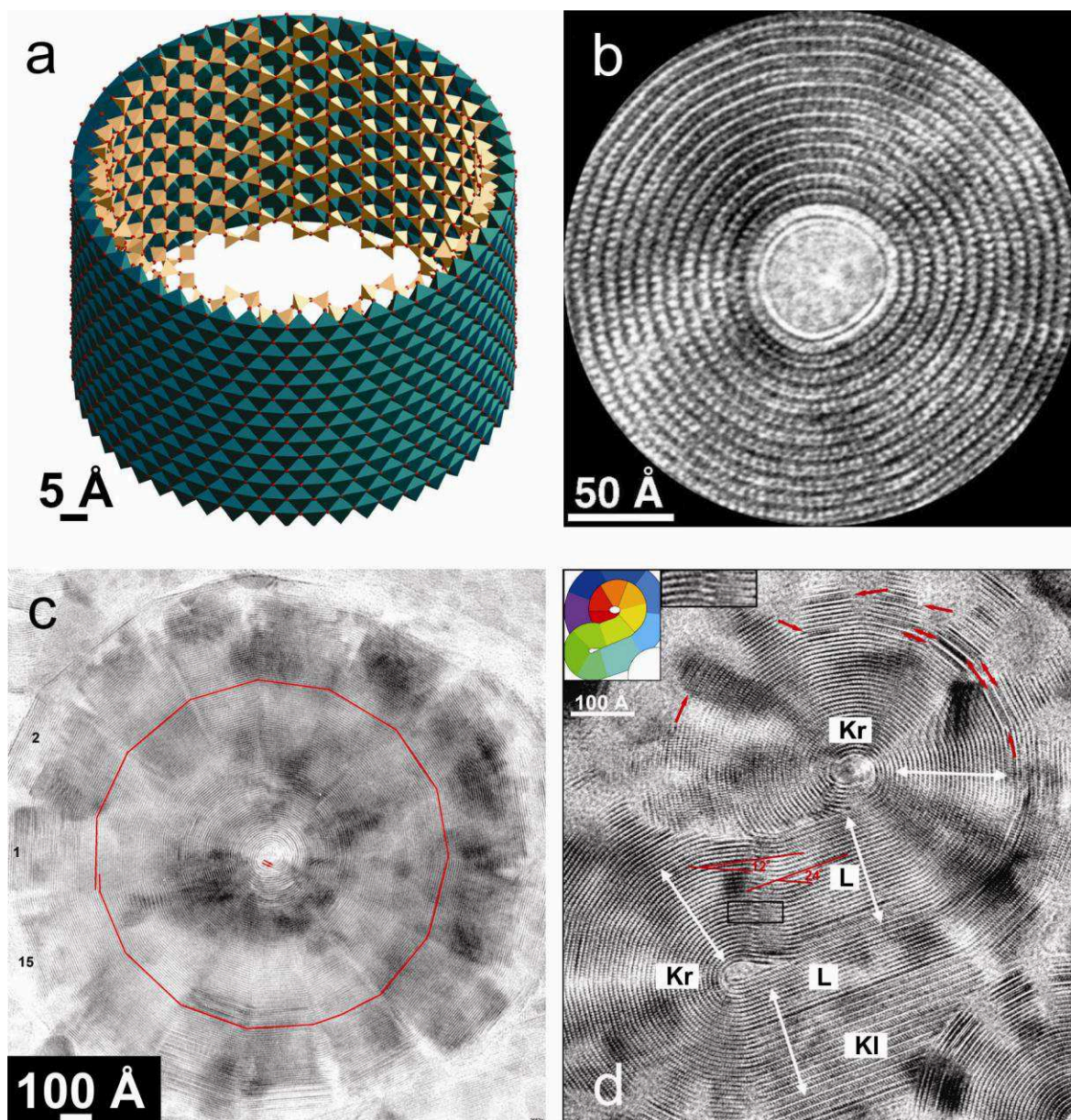


7.10. ábra. FESEM (téremissziós pásztázó elektronmikroszkópos) felvételek a NIST SRM 1866 azbeszt sztenderd⁸ krizotiljáról. A b) ábra közepén különösen jól látszik, hogy a krizotilszálak keresztmetszete kör alakú, és nem sokszög (azaz prizma és véglapok kombinációja metszetben), mint az amfiboloké ([7.8.a. ábra](#)). Az R.J. Lee Group (USA) szivességéből

⁸ NIST SRM: National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Material. Az Amerikai Sztenderd és Technológiai Intézet (NIST) megvásárolható sztenderd referenciaanyagokat (SRM) állít elő, tömeges azbesztekre a NIST SRM 1866, 1866A, 1866B és 1867, 1867A vonatkoztak (mára elfogytak a készletek). Az 1866-os sorszámú sztenderdek három, kereskedelemben található gyakori azbesztszálat tartalmaztak, kanadai krizotilt, illetve dél-afrikai amozitot (grunerit) és krokidolitot (riebeckit). Az 1867-es sorszámú sztenderdek három, kereskedelemben található ritka azbesztszálat tartalmaztak, indiai antofillitet, illetve amerikai aktinolitot (Virginia állam) és tremolitot (Kalifornia állam). Az ilyen sztenderdek a laboratóriumok munkáját segítik, a vizsgálatra beküldött anyagok összevethetők ezekkel a hitelesített sztenderdekkel. További információk: www.nist.gov.



7.11. ábra: A krizotil egyszerűsített szerkezeti felépítése. A tetraéderrétegeket kékkel ábrázolt $[SiO_4]^{4-}$ tetraéderek alkotják. Ha ezeket egy lapjukkal képzeletbeli asztal lapjára helyezzük, három csúcsukon keresztül további tetraéderekhez csatlakoznak, így hatos gyűrűkből álló végtelen réteget képeznek az asztallapon, negyedik csúcsuk pedig egy irányba (felfelé) néz. Az oktaéderréteget $[MgO_2(OH)_4]^{6-}$ összetételű, lapjaikkal érintkező, sárgával jelölt oktaéderek alkotják (az oktaéder középpontjában Mg^{2+} kation, a csúcsain négy OH^- és két O^{2-} anion foglal helyet). Az oktaéderréteg és a tetraéderréteg kapcsolódása az O csúcsokon keresztül valósul meg: a tetraéderek „felfelé” néző, más tetraéderhez nem kapcsolódó csúcsa egyben egy oktaéder egyik O csúcsa is. Mivel az oktaéderréteg a nagyobb, a tetraéderréteg feltekeredik, hogy az egy irányba néző csúcsok távolodjanak kicsit egymástól (mint a sün hátán a tüskék), és így adnak helyet a nagyobb oktaédereknek. A TO rétegpárokból az azbesztszalak többféleképpen is létrejöhetnek. A TO rétegpárok alkothatnak egymásba csúsztatott, mind nagyobb átmérőjű hengereket (koncentrikus felépítés, baloldali ábra), illetve felcsavarodhatnak spirálisan is, akár egyesével (jobb oldali ábra), akár több rétegpár együtt. A szálak lehetnek üregesek, ekkor a belsejük vagy üres, vagy amorf anyaggal kitöltött, de előfordulhat az is, hogy a szál belsejében nincs üreg. A krizotil szimmetriája rombos vagy monoklin



7.12. ábra: a) Krizotilhenger felépítése, Dódony István modellje (Dódony, 2007). Drapp szín jelöli az $[\text{SiO}_4]^{4-}$ tetraédereket, türkiz az $[\text{MgO}_2(\text{OH})_4]^{6-}$ oktaédereket, a piros golyók az O^{2-} , illetve OH^- anionokat. b) Az a) ábrán bemutatott, egymásba csúsztatott (koncentrikus) hengerekből álló krizotil, a száltengely felől nézve. c) Poligonális (=sokszögű) szerpentin, amely 15 szektorból („tartszeletből”) áll, és metszetben szabályos tizenötszöghöz hasonlít. A bemutatott krizotilszál (b) átmérője 240 \AA ($=0,024 \mu\text{m}$), míg a poligonális szerpentinyszálé (c) majdnem egy nagyságrenddel nagyobb, mintegy 1800 \AA ($=0,18 \mu\text{m}$). d) A képen látható szerpentinásványok (Kr – krizotil, L – lizardit) és a klorit (Kl) szerkezetek néhány 10 nm-es léptékben egymásba mennek át, feszegetve a hagyományos ásvány fogalmát.

b)–d): Dódony István HRTEM felvételei (Dódony, 2007). A vizsgált példány lelőhelye Texas, Lancaster megye, Pennyslvania állam, USA. Az ELTE TTK Természetráji Múzeumának gyűjteménye (leltári szám: BE24505)

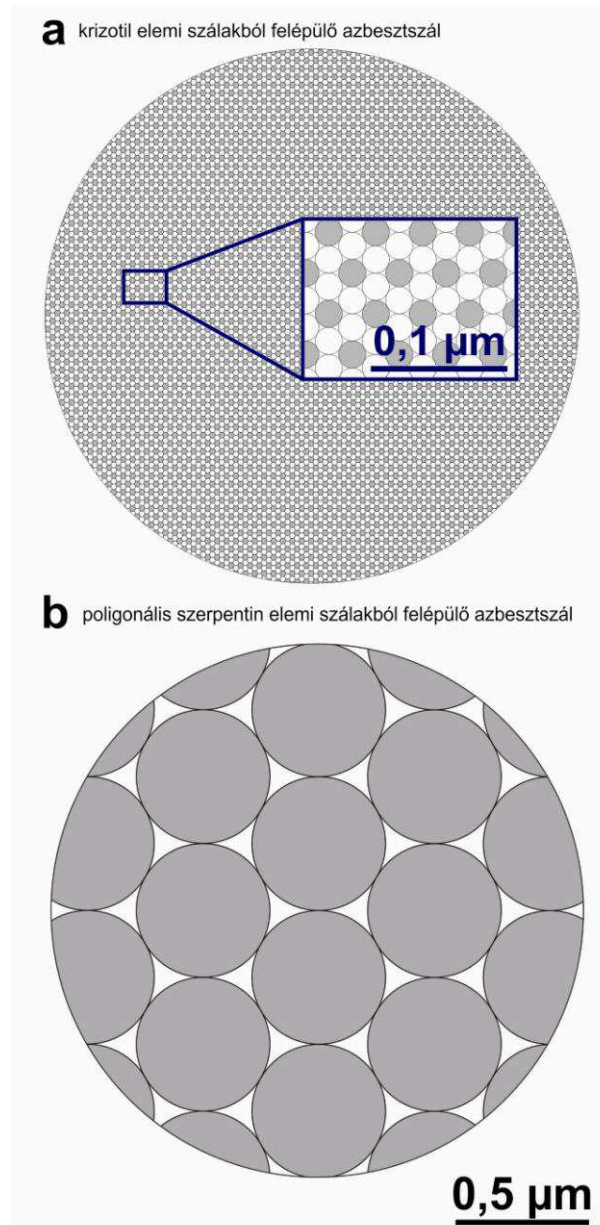
Számítási feladat**Azbeszt szálkötegek felépítése (1.2.)**

Az azbesztszál, ahogyan például a fáziskontrasztos mikroszkóppal a levegőt mintázó szűrő felületén a szálkoncentrációt mérő szakember látja, egy vékony szál (7.13.a. ábra), igazából viszont párhuzamos szálabból álló szálköteg, kicsit a drótkötélhez hasonlítható.

a) Modellezzünk egy $d_a=2\ \mu\text{m}$ átmérőjű „azbesztszálat”: hány darab $d_{ek}=200\ \text{Å}$ átmérőjű krizotil elemi szálabból épül fel?

b) Ugyanekkora azbesztszál hány db $d_{epsz}=500\ \text{nm}$ -es poligonális szerpentin szálabból áll?

A feladat megoldását a 7.13.b. ábra szemlélteti.



7.13. ábra: Illusztráció az 1.2. számítási feladathoz. a) Krizotil elemi szálabból ($d_{ek}=200\ \text{Å}$) felépülő, makroszkóposan $2\ \mu\text{m}$ átmérőjű „azbesztszál”. b) Poligonális szerpentin elemi szálabból ($d_{epsz}=500\ \text{nm}$, kör átmetszettel modellezett) felépülő, makroszkóposan $2\ \mu\text{m}$ átmérőjű „azbesztszál”

Az ásványtani kritérium tárgyalásának végén a következőket szeretnénk hangsúlyozni:

- Az orvosi kutatásokból a legtöbb esetben hiányzik az alkalmazott szálak megfelelő anyagvizsgálati dokumentációja. Az azbesztek egészségi hatásait vizsgáló munkákban mind a mai napig, olykor még kémiai összetételi adatok közlése esetén is az adott lelőhelyről közismert elnevezést használják, nem pedig az aktuális nevezéktan szerint sorolják be a tanulmányozott anyagot. A tremolit azbesztként nyilvántartott anyagok például gyakran aktinolitnak minősülnek az aktuális nevezéktan szerint (lásd pl. [Van Orden et al., 2009](#) munkáját). Ez a tremolit => aktinolit átsorolás esetén nem okoz gondot, hiszen mindkét faj szálás változata azbesztnak minősül, azonos szabályozás alá esik. **A megfelelő ásványtani háttérvizsgálatok hiánya ugyanakkor sok esetben kétségeket támaszt az azbesztek egészségre gyakorolt hatásának vizsgálati eredményeit illetően.**
- **Sok esetben az azbesztben több ásványfaj együtt jelenik meg, pl. a krizotil mellé társulhat tremolit is, amelynek már akár néhány százalékos jelenléte is lényegesen növeli az egészségkárosító hatást.**
- Az azbesztnak minősített ásványfajok mellett több amfibol (winchit, richterit, fluoroedenit) és egyéb szilikátásvány (pl. diopszid, antigorit, balangeroit, carlosturanit, erionit) is lehet azbesztszerű, szálás megjelenésű. Olykor ezekhez is társul az azbesztekéhez hasonló egészségkárosító hatás, kiemelt ebből a szempontból az erionit, egy szálás zeolit, amely elsőként törökországi falvakban okozott mezoteliómás megbetegedéseket (részleteket lásd az esettanulmányok között).
- **Az új kutatási eredmények jogszabályba foglalása mindig időt vesz igénybe, olykor évtizedeket késhet a tudományos eredmények megszületéséhez képest.**

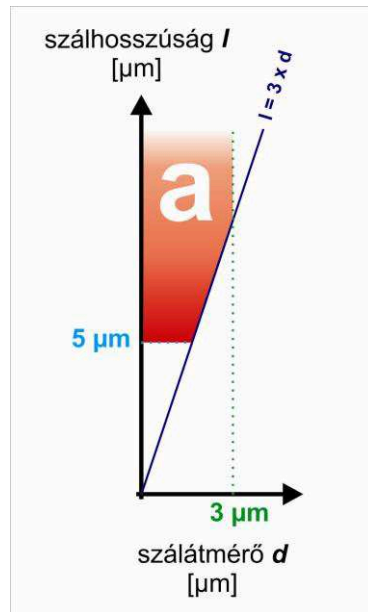
7.2 Az azbesztszál – alaki (morfológiai) kritérium

Az azbesztszál alaki definícióját az 1970-es évek vége felé próbálták először megfogalmazni, az Európai Unióban 1983-ban jelent meg a máig érvényes alaki definíció (83/477/EGK). A meghatározás az akkoriban az egészségre legkárosabbnak tartott szálak méretén, állatokon végzett kísérleteken, illetve azbeszt tartós belélegzésének szövődményeiben elhunytak tüdejében talált szálak vizsgálati eredményein, statisztikáin alapszik. Az Európában,⁹ így Magyarországon is érvényes szabályozás¹⁰ szerint alakját és méretét tekintve **azbesztszálnak minősül az a szál, amelynek hossza nagyobb, mint 5 µm, átmérője kisebb, mint 3 µm, és hossz:átmérő aránya (angolul *aspect ratio*) nagyobb, mint 3:1.** Az alaki kritérium grafikai megjelenítését a [7.14. ábra](#) tartalmazza.

Látni fogjuk, hogy az 1983-as európai jogszabály óta eltelt három évtizedben jelentősen differenciálódtak az azbesztekre vonatkozó ismeretek, az új ismeretek mégsem csatornázódtak be a szabályozásba. Ez is olyan terület, ahol szükség lehet a képzett földtudományi és környezettudományi szakemberek munkájára.

⁹ 2009/148/EK európai irányelv (a munkájuk során azbeszttel kapcsolatos kockázatoknak kitett munkavállalók védelméről). Alapja a WHO (*World Health Organization*) 1997-es, a levegő szálkoncentrációjának meghatározására javasolt módszere (ISBN 92 4 154496 1; PCM: fáziskontrasztos fénymikroszkópia).

¹⁰ 12/2006. (III. 23.) EüM rendelet az azbeszttel kapcsolatos kockázatoknak kitett munkavállalók védelméről, a rendelet szintén a WHO anyagra hivatkozik, hatályos változata egyben az 2009/148/EK európai irányelvnek való megfelelést is szolgálja.



7.14. ábra: Az azbesztszálak alaki (morfológiai) kritériumának grafikus megjelenítése. A vízszintes tengelyen a szálak átmérője (d), a függőleges tengelyen a szálak hossza (l) van feltüntetve, mikrométerben kifejezve. Mindhárom feltétel két részre osztja a síkot. Az $l > 5 \mu\text{m}$ feltétel a vízszintes világoskék pontozott vonal feletti félsíkot jelöli ki. A $d < 3 \mu\text{m}$ feltétel a függőleges zöld pontozott vonaltól balra eső félsíkot jelöli ki, míg az $l:d > 3:1$ feltétel az $l = 3 \times d$ sötétkék átlós egyenestől balra eső félsíkot jelöli ki. A három feltétel által határolt terület (pirossal színezve) adja meg az azbesztszálak mérettartományát

Megjegyzendő, hogy az átmérő kritérium ($d \leq 3 \mu\text{m}$) egyes országokban (pl. USA) nem szerepel a definícióban, ami azért zavaró, mert e kitétel nélkül a méret nem korlátos felülről, és így pl. a grafitceruza is teljesíti az azbesztszál alaki kritériumát.

Az alaki kritérium bizonytalanságát az okozza, hogy a nem szálak amfibolkristályokból is létrejöhetnek olyan kis szilánkok, hasadási idomok (angolul hasadási szilánk, azaz *cleavage fragment*, [7.8.c. ábra](#)), amelyek megfelelnek az alaki kritériumnak, mégsem nevezhetjük őket azbesztszálaknak, mert fizikai tulajdonságaik és fiziológiai (élőlényekre gyakorolt hatásuk, belélegzéskor) hatásuk nem azonos az azbesztszálakéval. A kristályszilánkok és az azbesztszálak elkülönítése azért fontos feladat, mert ha a kristályszilánkokat is azbesztszálaknak minősítjük, például levegőből vett pormintában, akkor durván felülbecsülhetjük a valós azbesztkoncentrációt, ennek pedig súlyos anyagi következményei lehetnek (azbesztmentesítés stb.).

Úgy tűnik, hogy méretüket, alakjukat és egyéb tulajdonságaikat tekintve a kristályszilánkok és az azbesztszálak azért elkülönülnek ([7.15. ábra](#), [Van Orden et al., 2009](#)), mivel a kristályszilánkok természetes úton nem aprózódnak bizonyos méret alá. Emellett születnek komplex megfigyeléseken alapuló kristályszilánk/azbesztszál elkülönítési eljárások is ([7.16. ábra](#), [Van Orden et al., 2008](#)).

Az azbesztszálak tipikus mérete az egyre szaporodó vizsgálatok alapján fokozatosan „lejjebb tolódik”: az azbesztszál tipikus átmérő egyre kisebb, a hossz-átmérő arány egyre nagyobb lesz.

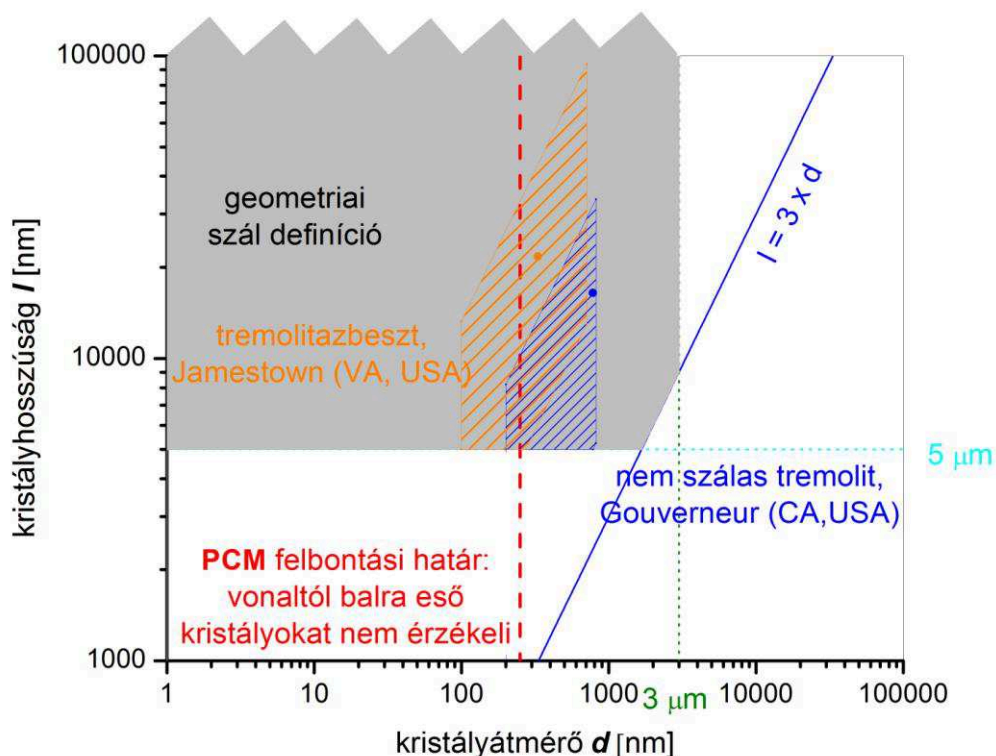
Az amerikai szövetségi környezetvédelmi szabályozás azbesztre vonatkozó része (40 CFR 763, az iskolai azbesztkockázat vizsgálatára vonatkozó előírásban) elrendeli a levegőminták transzmissziós elektronmikroszkópos vizsgálatát, és itt az azbesztszál definíciója $0,5 \mu\text{m}$ -nél hosszabb részecske, legalább 5:1 hossz-átmérő aránnyal, és párhuzamos olda-

lakkal. Az azbesztszálakat egyértelműen fizikai tulajdonságai, azaz hajlékonysága (*flexibility*) és a nagy húzószilárdsága (*tensile strength*) különíti el a merev kristályszilánkoktól.

Az Egyesült Államokban az építőanyagok azbeszttartalmának meghatározására kidolgozott (US)EPA/600/R-93/116 vizsgálati módszer ugyanakkor három tételben összegzi az azbeszt alaki definícióját. (1) Az azbesztszál hosszabb, mint 5 μm és hossz-átmérő aránya 20:1-től 100:1-ig terjed. (2) Igen vékony, általában 0,5 μm -nél kisebb átmérőjű szálacska (angolul *fibril*), és (3) az alábbiak közül legalább két tulajdonsággal rendelkező szálcsoport: párhuzamos szálak kötegekben; szálkötegek szétseprűződő/szétálló végekkel; egyedi szálak kúsa szövedéke; görbült szálak.

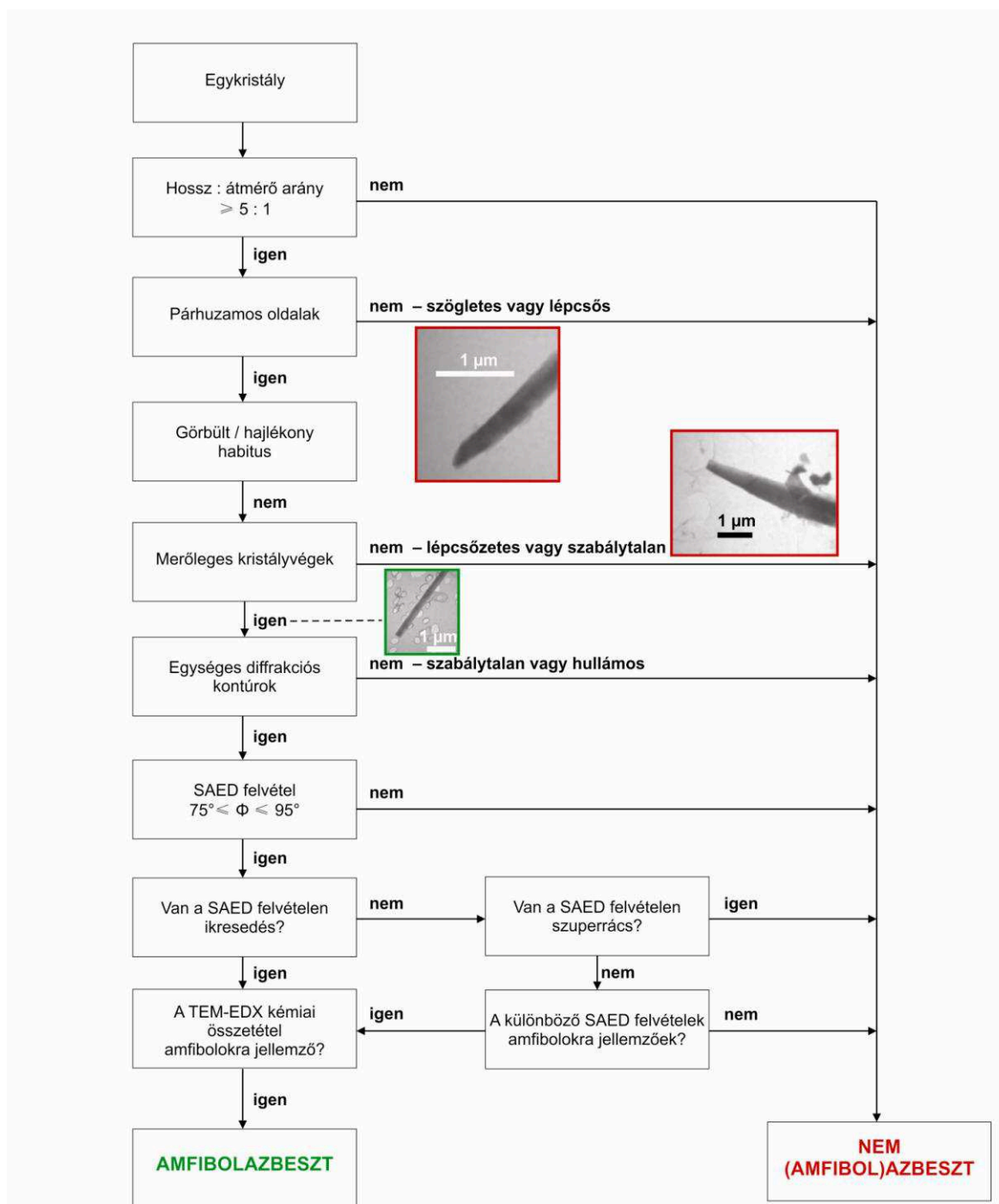
[Van Orden és munkatársai \(2009\)](#) szerint az azbesztszálak 90%-ának átmérője kisebb, mint 0,5 μm , így ez akár a felső átmérő határértékként is alkalmazható volna, megkönnyítendő a kristályszilánkok azbesztszál kategóriából való kizárását. Az európai és magyar szabályozáshoz képest (hosszúság nagyobb, mint 5 μm , átmérő kisebb, mint 3 μm , hossz-átmérő arány nagyobb, mint 3:1), tehát az amerikai módszerek a szálhossz megadásában nemigen térnek el, míg a felső átmérő korlát 0,5 μm -ig szűkülhet, az alsó hossz-átmérő arány pedig 20:1-ig is felnyúlhat (azbesztszálaknál ez az érték akár több száz is lehet).

A hasadási idomok, tús termetű kristályszilánkok és azbesztszálak elkülönítésének kérdése kizárólag amfibolok esetében merül fel, hiszen a krizotil szerkezetében kódolva van a nanoléptékű szálak megjelenés. Sok esetben még a hosszú évtizedek gyakorlatával rendelkező szakemberek számára is gondot okoz annak eldöntése, hogy a mikroszkópban látott részecske amfibol hasadási idom-e vagy azbesztszál ([Gunter et al., 2007](#)). Gyakran előfordul, hogy egy jól fejlett kristály szálakban végződik – egyik végéről azbesztköteg, másik végéről nézve kristály? A szerpentinek közé tartozó krizotil esetében viszont arra kell odafigyelni, hogy a szerpentinásványok (krizotil, lizardit, antigorit) hasonló röntgen pordiffraktogramot adnak, és avatatlan szemlélő – pusztán a röntgenfelvétel alapján – túlbecsülheti a szerpentinazbeszt jelenlétét (lásd a nyugat-magyarországi példát a [12.4. részben](#)).



7.15. ábra:

Tremolitzbeszt (narancssárga) és nem szál as tremolit szemcsék (kék) mérettartománya, [Van Orden et al. \(2009\)](#) TEM vizsgálatai alapján. A szerzők 173 (Jamestown), illetve 82 (Gouverneur) szemcseadatait mérték le TEM-mel, csak 5 μm -nél hosszabb kristályok esetében. A mérettartomány mezőkhöz az alsó és felső átmérő értékeket (10%<, illetve 90%< gyakoriság) és $d:l$ arányokat (10%<, illetve 90%< gyakoriság) vettük alapul. A két pöttyöt az átlagos d és $d:l$ értékekből képeztük. A két mező átfed, de nyilvánvaló, hogy a nem szál as kristályokra a nagyobb kristályszélesség, a kisebb hossz, és általában a kisebb $d:l$ arány jellemző. Szürke szín jelzi az európai és magyar joggyakorlatban alkalmazott száldefiníciót. Az elemi szál as egy része a levegőminták kiértékelésére használt fáziskontrasztos mikroszkópiával (PCM, részletesen lásd a [10.5. alfejezetet](#)) már nem „látható”, azonban a legtöbb esetben az amfibolazbeszt szálkötegek nem foszlódnak szét az elemi szál asig. Figyelem: a [7.11. ábrától](#) eltérően itt logaritmikus skálát alkalmaztunk mindkét tengelyen, a kisebb szemcseméret-tartományok jobb szemléltethetőségéért.



7.16. ábra: Amfibolazbeszt szálak (zöld) és nyúlt amfibol hasadási idomok (piros) transzmissziós elektronmikroszkópos (TEM) elkülönítésére szolgáló döntési séma [Van Orden et al. \(2008\)](#) alapján. Rövidítések: SAED: szelektált területű elektron diffrakció; EDX: energiadiszperzív röntgen spektrum (kémiai összetételt mér)

8. Az azbesztek egészségre gyakorolt hatása

Az azbesztek elsősorban a légzőszervrendszeren („belélegezve”), kisebb mértékben az emésztőszervrendszeren („lenyelve”) át juthatnak be az emberi szervezetbe (**8.1.–8.2. ábra**). Nem tartalmaznak toxikus elemeket (pl. nehézfémeket), így nem „mérgezők” a szó hagyományos értelmében; nem tartalmaznak radioaktív elemeket sem, így sugárveszélyt sem jelentenek.

A belélegzett szálacskák, csak úgy, mint a levegő, és általában a nem szálacskás porszemcsék, a garat-légcső-hörgő-hörgőcske útvonalon jutnak el a léghólyagokig, ahol a gázcsere zajlik. Lefelé a légutak egyre szűkülnek és többször elágaznak.

A porszemcsék levegőben való viselkedésének leírásához létrehoztak egy elméleti, méretet és alakot is magába foglaló jellemzőt: ez az aerodinamikai átmérő¹ (jelölje d_{ae}). A szemcsék tüdőbe jutásának hatékonysága a d_{ae} -vel fordítottan arányos, azaz a nagyobb szemcsékből kevesebb jut be a szervezetbe: a $d_{ae} > 50 \mu\text{m}$ szemcséknek csak 60%-a jut a szervezetbe, míg a $d_{ae} = 1 \mu\text{m}$ szemcsék 95%-a jut el a léghólyagok régiójába. Ennek oka, hogy a nagy szemcsék hamar kiülepednek a levegőből. A $d_{ae} > 50 \mu\text{m}$ méretű szemcsék végső ülepedési sebessége 7 cm/s (WHO/SDE/OEH/99.14), azaz egy ilyen porszemcsé az orrunk magasságából (150–180 cm) kb. 21–26 s alatt kiülepszik. A $d_{ae} = 1 \mu\text{m}$ méretű szemcsék végső ülepedési sebessége 0,03 mm/s, ugyanabból az orrmagasságból az ilyen szemcsék 14–17 óra alatt ülepsznek ki, tehát nagyobb az esély a belélegzésükre.

A levegővel a légzőszervrendszerbe jutó szemcsék annál messzebbre jutnak, minél kisebb d_{ae} -vel rendelkeznek. Mozgásuknak, illetve lerakódásuknak több útja van: a gravitációs ülepedés (angolul *gravitational settling*) csakúgy, mint a levegőben d_{ae} -től függ, a nagyobb szemcsé hamarabb kiülepszik gravitációsan. A nagy szemcsék könnyebben a légutak falának csapódnak (angolul *inertial impaction*), illetve az elágazó légutak elágazásain akadnak fenn (angolul *interception*). A belélegzett 15 μm aerodinamikai átmérőjű, vagy annál nagyobb szemcsék például legfeljebb a hörgőkig jutnak (**8.1. ábra**). A belélegzett 10 μm átmérőjű szemcsék kevesebb, mint 5%-a, az 5 μm átmérőjű szemcsék mintegy 20%-a, az 1 μm átmérőjű szemcsék kivétel nélkül eljutnak a léghólyagok régiójába. Az egészen kis szemcséknél ($d_{ae} < 0,5 \mu\text{m}$) a Brown-diffúzió (angolul *Brown diffusion*) jelentős: ekkor a gázmolekulák lökdösik, viszik magukkal a szemcséket.

A léghólyagok régiójában a $d_{ae} = 2 \mu\text{m}$ szemcsék esetén legnagyobb arányú a lerakódás, a kisebb szemcséknél a legtöbb lerakódási mechanizmus már nem hatékony, egyre nagyobb szerepet kap a kilélegzéssel való távozás. A legkisebb lerakódási arány a $d_{ae} = 0,5 \mu\text{m}$ szemcsékre jellemző, a még kisebb szemcsék már Brown-diffúzióval újra hatékonyabban rakódnak le a léghólyagok régiójában.

Az azbeszteken túl a belélegezhető szilárd szemcsék tekintetében két fogalmat érdemes még itt tisztázni: a PM₁₀ és a PM_{2,5} szemcséfrakciókat. A PM az angol *particulate matter*, azaz részecskékből álló anyag kifejezésre utal, a 10 és 2,5 pedig szemcseméret határokat. A PM₁₀ tehát a levegőben levő 10 μm alatti részecskék összessége, a PM_{2,5} pedig a levegőben levő 2,5 μm alatti részecskék összessége. Ezt a két frakciót egészségügyi hatás alapján emelték ki, nemzetközi konvenciók alapján. Ha újra megnézzük a **8.1. ábrát**, látjuk is, hogy miért: a 10 μm alatti szemcsék (PM₁₀) 50%-a túljut a gégen, és itt kezd

¹ Az aerodinamikai átmérő elméleti érték, amely az alakot is figyelembe veszi a levegőben való mozgásnál (itt ülepedésnél). Tetszőleges alakú és méretű részecske közelíthető szabályos gömb alakú, egységnyi sűrűségű részecskével, amely levegőben ugyanakkora sebességgel ülepedik, mint a vizsgált részecske. A gömb modellrészecske átmérője az aerodinamikai átmérő.

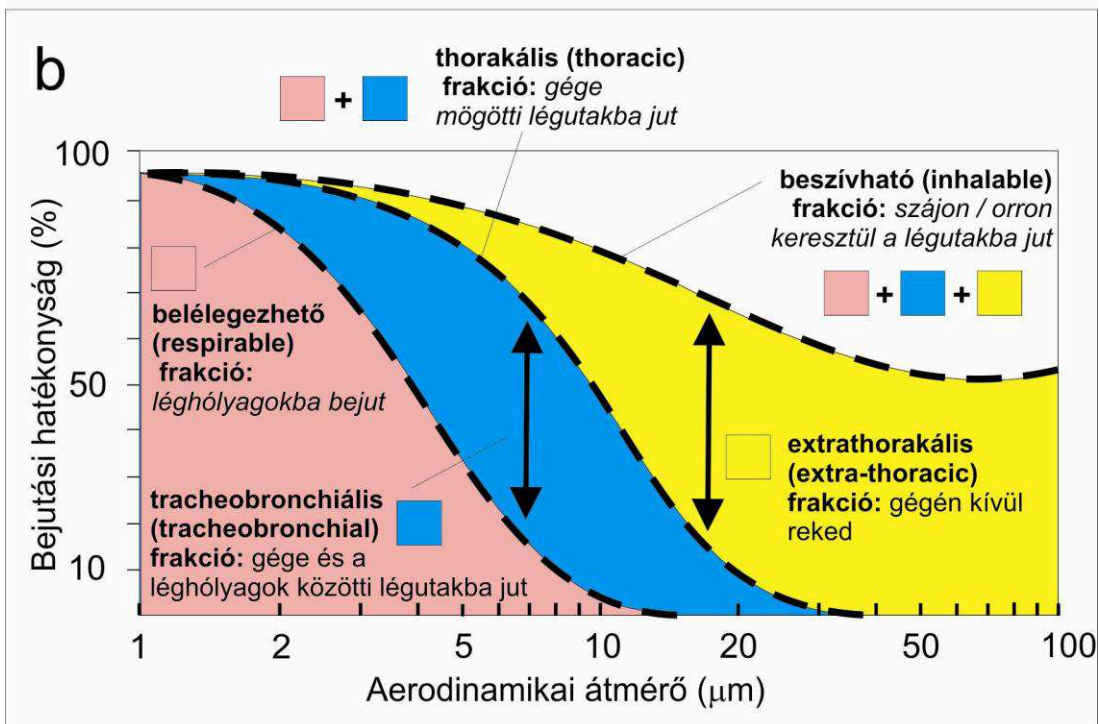
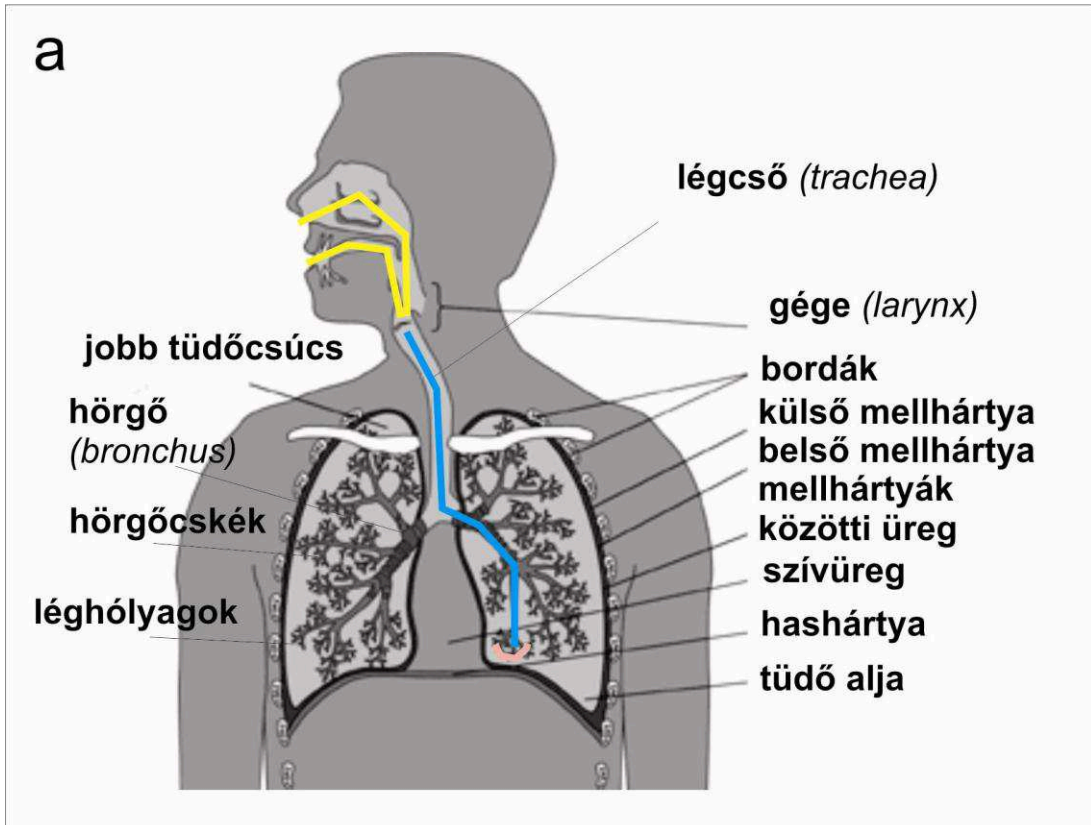
jelentőssé válni a léghólyagokig lejutó szemcsék hányada. A PM10 tehát nagyjából a thorakális frakciót képezi le. A 2,5 μm alatti szemcsék (PM2,5) esetében pedig a szemcsék 50%-a lejut a léghólyagok régiójába, azaz a PM2,5, ha kicsit lazábban is, de a belélegezhető frakciót képezi le.

Különböző típusú anyagok pora különböző szemcseméretű lehet, és a légzőszervrendszer más-más részén okozhat kockázatot. A legnagyobb méretű részecskéket is tartalmazó beszívható frakcióban egyes keményfák és ólomötvözetek pora lehet veszélyes, a thorakális frakcióban például a pamutpor okozhat problémát, a belélegezhető frakcióban a kvarcpor, fémek pora, ásványi szálak okozhatnak gondot (WHO/SDE/OEH/99.14).

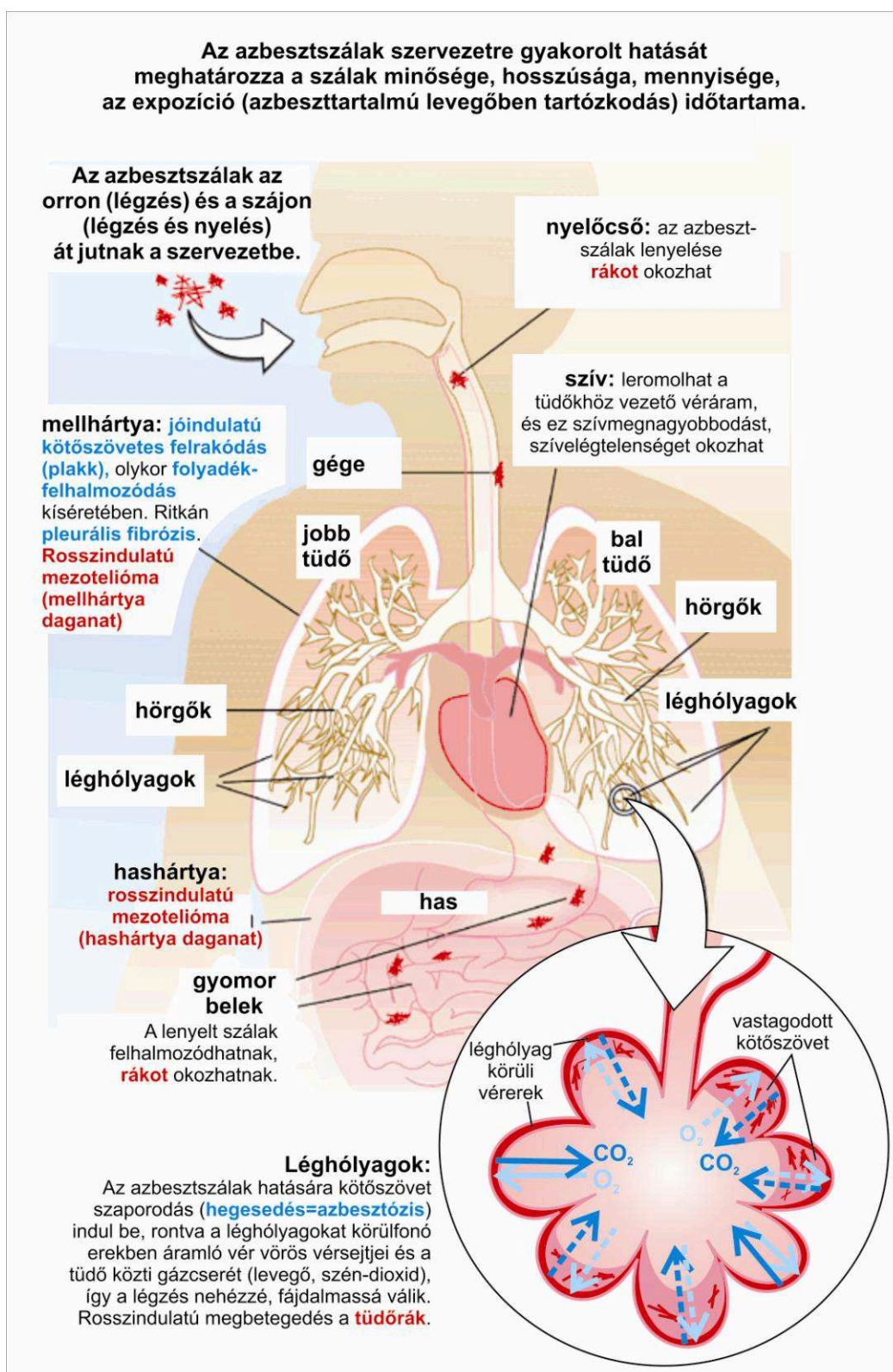
Számítási feladat

Porszemcsék tüdőbe jutásának hatékonysága a szemcseméret függvényében (1.3.)

- a) Adjuk meg a [8.1. ábra](#) segítségével, hogy a levegőben levő, egységesen 20 μm aerodinamikai átmérőjű kvarcsemcsékből mennyi (hány %) jut be a légzőszervrendszerbe, mennyi jut a gégéig, a gége és a léghólyagok közti légutakba, illetve a léghólyagokba?
- b) Mi a helyzet, ha a belélegzett szemcsék aerodinamikai átmérője ennek tizede, azaz 2 μm ?
- c) Mit mondhatunk ennek alapján, a nagyobb vagy a kisebb méretű szemcsék veszélyesebbek?



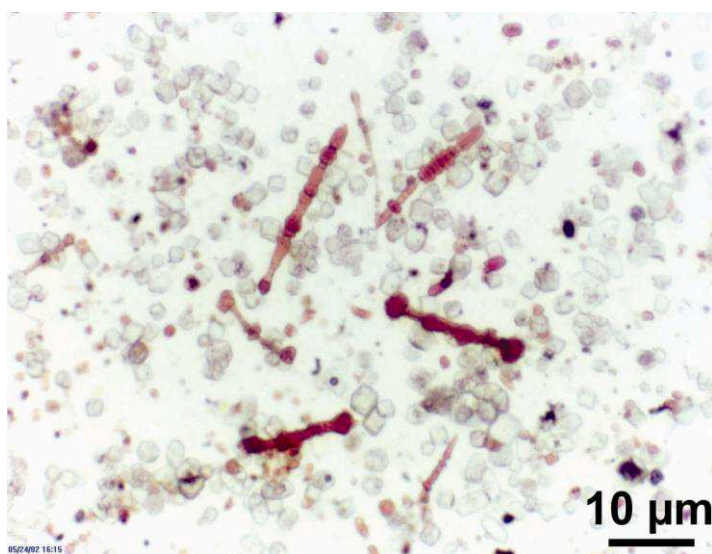
8.1. ábra: A belélegzett porszemcsék útja a légzőszervrendszerben, és a bejutási hatékonyság a szemcseméret (aerodinamikai átmérő) függvényében. Figyelem! Az ábrázolt szemcsék olyan kicsik ($<0,1$ mm), hogy szabad szemmel már nem láthatók. A nagy szemcsék kis bejutási hatékonyságának oka, hogy ezek a szemcsék gyorsan ülepednek ki a levegőből. A fontosabb kifejezéseknél az angol megfelelőt is megadtuk zárójelben



8.2. ábra: Az azbesztszálak útja a légző és emésztőszervrendszerben, a szálak által generált betegségekkel. Kék szín jelöli a nem daganatos, piros a rosszindulatú (daganatos) elváltozásokat

A léghólyagok kulcsszerepet játszanak a légzésben: a léghólyagok felszínén keresztül a belélegzett oxigén a tüdőből a vérbe jut, míg a szén-dioxid a vérből a tüdőbe kerül, és a kilégzéssel távozik. Ideális esetben a légzőszervrendszerben csak gázok fordulnak meg, így minden, a léghólyagokig lejutó szilárd szemcse idegen test, amely védekező mechanizmust vált ki a szervezetből. Ez ugyanúgy igaz az azbesztszálra, mint a házi por leggyakoribb alkotórészére, a kvarcra.

A szervezetnek többféle módszere van arra, hogy a belélegzett részecskéktől megszabaduljon. A védekező mechanizmusok sokfélék, függenek a szemcsék anyagától, méretétől, oldhatóságától. A légutakban felszaporodik a váladék (nyák), beburkolja a nagyobb részecskéket, így azokat könnyebb felköhögni. Ezen kívül a légutakat borító sejteken lévő csillók fölfelé, a tüdőből kifelé terelik őket. A tüdők léghólyagjaiban különleges falósejtek, az ún. makrofágok az idegen részecskék többségét bekebelezik, és feloldják őket, de legalábbis elszigetelik a szervezettől. Ha a porszemcse nem oldódik fel a tüdő enyhén savas körülményei közt, bejuthat a szövetekbe. A feloldhatatlan, kikerülhetetlen szemcsék felületén olykor vastartalmú fehérjekéreg² (8.3. ábra) képződik, ezzel igyekszik magát elszigetelni/távol tartani a szervezet az idegen anyagtól. A léghólyagoktól a tüdőn keresztül egészen a tüdők külső felszínéig is eljutnak az azbesztszálak: a tüdőt és a mellkasüreget borító mellhártyák közötti térbe.³ A tüdőből az azbesztszálak a test többi részébe a vérárammal vagy a nyirokcsomókon és a nyirokfolyadék keringési rendszerén keresztül jutnak el, a kisebb szemcsék (rövidebb szálak) a legmozgékonyabbak. Ezért a mellhártyák környékén a rövid azbesztszálak vannak túlsúlyban.



8.3. ábra: Vasas fehérjekéreggel bevont azbesztszálak (angolul *asbestos body* vagy *ferruginous body*),⁴ feloldott tüdőszövetből. Látszik, hogy a fehérjekéreg gyöngyszerűen, csomókban képződik a szálon (ferritin és hemosziderin fehérjék vesznek részt kialakításában). Gyakran csak a szál két végén alakul ki a kéreg, ekkor súlyzó alakú az „azbesztest”. A bevont szálak mérete általában 5–30 μm, a megadott lépték becsült. Kép forrása: wikipedia.org, S. Polo Kórház, Monfalcone (Olaszország) (http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/71/Lung_asbestos_bodies.jpg)

² A vasas fehérjekéreggel bevont szálakat angolul *asbestos body* vagy *ferruginous body* néven említi a szakirodalom.

³ A két mellhártya közötti teret folyadék tölti ki, csökkentendő a tüdők és a mellkasüreg belső fala közti sűrűsödést légzéskor.

⁴ A *ferruginous body* („vasas test”) kifejezés általános értelmű, hiszen más szemcsén, pl. zeoliton is létrejöhet a vasas fehérjekéreg. Amennyiben ismert, hogy a „vasas test” magjában milyen anyag van, azt jelzik a névben, pl. „azbesztest”, „zeolitest”.

A nagy tömegben, hosszú időn át a tüdőbe jutó porok a tüdőben **kötőszövet-szaporodást (fibrózis vagy rostos hegesedés)** idéznek elő. A megvastagodott kötőszövet miatt romlik a gázcsere a léghólyagok és a hólyagokat behálózó vérerek közt: csökken a légzési kapacitást (száraz köhögés, légszomj, csökkent terhelhetőség, mellkasi fájdalom tünetekkel). Ha a kötőszövet-szaporodást kvarcpor váltja ki, szilikózis⁵ a betegség neve, ha azbeszt, **azbesztózis**. Azbesztózis főként a léghólyagok régiójában (alsó tüdőlebeny) fordul elő. A mellhártyán (latinul *pleura*) leggyakrabban **jóindulatú (nem daganatos) kötőszövetes felrakódás (pleurális plakk)** fordul elő, ez érdemi egészségkárosodást nem jelent, csak jelzi az azbesztexpozíciót. A mellhártyák közötti térben kóros folyadékgyülem és ritkán a mellhártya rostos hegesedése (**pleurális fibrózis**) is előfordulhat az azbesztszálak hatására.

Az azbesztek által kiváltott védekező mechanizmusok nyomán gyulladáshoz vezető állapot alakul ki az élő szervezetben, sok olyan vegyület keletkezik, amely elősegíti a mutációt vagy a kóros sejtburjánzást, végső soron rákot okozva. Főként az amfibolazbeszt belélegzéséhez kötik a **mellhártyát és hashártyát érintő savóhártya daganatot (rosszindulatú mezotelióma)**. A **tüdőrákot** – sok egyéb tényező mellett – amfibol- és krizotilazbeszt is kiválthatja az orvosi kutatások szerint. A tüdőrák esélyét az azbesztpor belélegzésével párhuzamos dohányzás is növeli: az azbesztszálak nagy fajlagos felületén megkötődnek a cigarettafüstben megtalálható, rákkeltő policiklusos aromás szénhidrogének (PAH).

A léghólyagok régiójába lejutott porszemcsék orvosilag nem moshatók ki, legfeljebb oldódásuk révén csökkenhet mennyiségük (vagy a szervezet más régióiba való elszállítódás nyomán). Éppen ezért az azbeszthez kötődő betegségek nem gyógyulnak meg, és a legtöbb azbeszthez kötődő egészségkárosodás kezelésére nincs terápiás lehetőség. A betegség rosszabbodása (progresszió) főként az azbesztexpozíció kezdetén jellemző.

Magyarországon (az európai uniós szabályozással összhangban) a következő, azbesztexpozícióhoz kötődő foglalkozási eredetű betegségeket kell az egészségügyi hatóságoknak nyilvántartani: azbesztózis, mezotelióma (savóhártya daganat), azbesztexpozícióhoz köthető hörgő- és tüdőrák, a mellhártya légzésfunkció csökkenéssel együtt járó rostos hegesedése (pleurális fibrózis).

Az azbesztszálak hatását, az azbesztszálak jelenlétére az élő szervezet által adott védekezési válaszokat a mai napig vizsgálják. Vizsgálják az elhunytak tüdejében levő száltartalmat, vannak „in vitro” (azaz „üvegben” – petricsészében, modelledényben) és „in vivo” (azaz életben, kísérleti állatokon végzett) kísérletek. Sok adatot szolgáltatnak az azbesztnak kitett népesség (foglalkozásból adódóan azbeszttel kapcsolatba került csoportok, pl. azbesztfeldolgozó gyár munkásai, bányászok; természetes azbesztelőfordulás környezetében élők) statisztikus vizsgálati eredményei is.

Sokszor ellentmondóak a vizsgálatok eredményei. **Az azbesztek közül az amfibolazbesztek, és ezen belül is kiemelkedően a riebeckitazbeszt (krokidolit vagy kékazbeszt) rákkeltő hatása igazolt. A krizotil rákkeltő hatása máig kérdéses, ha van is, lényegesen kisebb az amfibolazbesztekénél. Ezzel együtt a Nemzetközi Rákkutatási Ügynökség (International Agency for Cancer Research, röviden IARC) nem tesz különbséget száltípusok között, és az azbeszt összes fajtáját a legkockázatosabb, 1-es**

⁵ A szilikózis a legrégebben ismert foglalkozási eredetű megbetegedés.

kategóriába⁶ sorolja (Group 1 – embereknél rákkeltő).⁷ Az IARC legfrissebb, azbesztek tárgyaló monográfiája (IARC 100C, 2012) szerint az azbesztexpozíció kiválthatja a következő ráktípusokat: mezotelióma (mell- és hashártyán jelentkező savóshártya daganat), tüdőrák, gégerák és petefészekrák. Az állásfoglalás szerint a garat-, gyomor-, vastagbél- és végbélrák szintén lehet az azbesztexpozíció következménye.

Az amfibolazbesztek nagyobb kockázata több dologból adódik:

Kémiai szempontból: a lényegesen eltérő kémiai összetétel és szerkezeti felépítés miatt az amfibolszálak tartósan fennmaradnak a tüdőben (modellszámítások szerint olyan lassan oldódnak, hogy e hatás csak 6–8 év után kezd észlelhetővé válni), míg a krizotil jobban oldódik (egy éven belül feloldódik még egy 1 µm átmérőjű szálköteg is). Így a krizotil mennyisége az idővel sokkal gyorsabban csökken a tüdőben.

Egyes amfibolfajokban az élettani szempontból érzékeny *alkáli fémek* (Na) a vegyület képletében is szereplő fő alkotók, hasonlóan a *vashoz* (elsősorban Fe²⁺), amelynek jelenléte káros hatású redox reakciókat vált ki a szervezetben. A *vasas fehérjekéreg* képződése is káros hatású, és elsősorban az amfibolszálakra jellemző. Ezzel szemben a krizotilban nincs alkáli fém, és nem kell számolnunk jelentős vas helyettesítéssel sem.

A *fizikai viselkedés* miatt is az amfibol a kockázatosabb. A léghólyagok régiójában a hosszabb azbesztszálak kártékonyabbak. A *falósejtek a rövidebb szálakat* képesek bekebelezni, és míg az amfibolazbeszt kötegek *hosszában foszlódnak* (így a szálak hossza nem csökken a tüdőben), a krizotilszálak *keresztben törnek*, ez a rövidülés pedig segíti a falósejtek munkáját.

⁶ Az IARC első, azbesztek rákkeltő hatását tárgyaló monográfiája 1973-ban jelent meg (2. kötet), további összefoglalók: 1977 (14. kötet), kiegészítés (7. kiegészítő kötet, 1987), 2012 (100C. kötet). A kiadványok a <http://monographs.iarc.fr/index.php> oldalon érhetők el.

⁷ Az IARC kategóriái (állatkísérletek adatai, illetve a vizsgált anyagnak kitett emberek adatai alapján): 1 – embereknél bizonyítottan rákkeltő; 2A – embereknél valószínűleg rákkeltő; 2B – embereknél lehet, hogy rákkeltő; 3 – emberekre gyakorolt rákkeltő hatás tekintetében nem besorolható; 4 – embereknél valószínűleg nem rákkeltő.

9. Azbeszt az épített környezetben

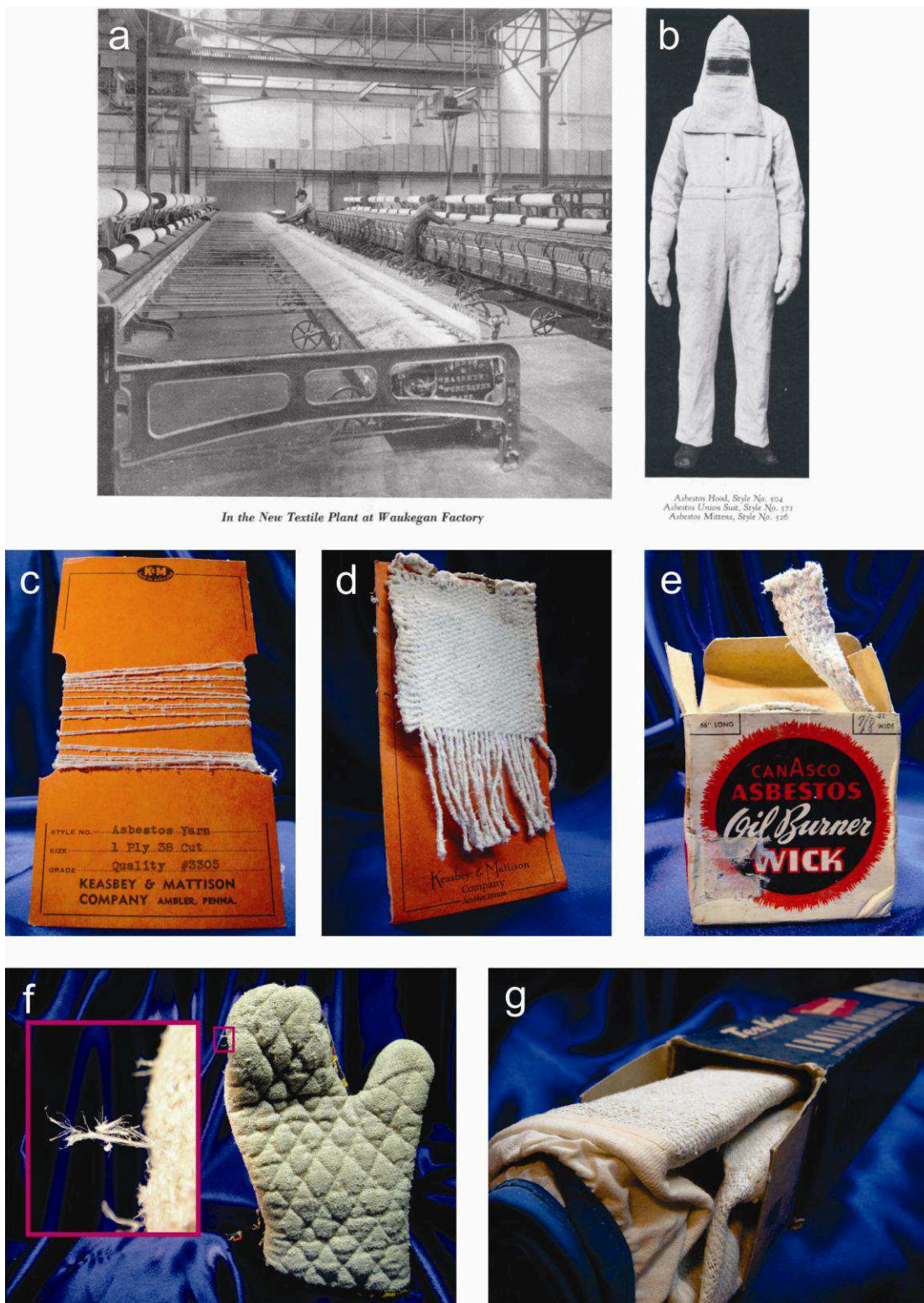
Az első ismert azbesztfelhasználás őskori, 6500 éves: i.e. 4500 körül, antofillitazbesztet kezdtek használni cserépedények megerősítésére a mai Finnország területén (Hillerdal, 2004). A technika egész Skandináviában és a mai Oroszország területén is elterjedt, és a későbbiekben krizotilazbeszt zsinórt is alkalmaztak a cserépedények tűz fölé lógatására. Az ókorban és a középkorban csak a legkézenfekvőbb módokon alkalmazták az azbesztet: lámpakanócot, terítőt és hamvasztási palástot készítettek belőle. A 17–18. században, Nagy Péter idejében az uráli krizotilt – rövid ideig, kis mennyiségben – a textilipar dolgozta fel. Az 1860-as években kezdett az azbesztfeldolgozó-ipar felvirágozni, a gőztechnológia elterjedése (=hőszigetelési, tűzvédelmi feladatok megjelenése), az észak-olasz azbesztbányák újrainyitása (a római kori bányászat után) és a québeci (Kanada) krizotilbányák termelése révén. A 19–20. század fordulóján megnyitották a dél-afrikai krokidolittelepeket, és nagy mennyiségben kezdték termelni az uráli krizotiltelepeket is. Néhány évvel később már a Transvaal vidéken (Dél-Afrika) is megindult az amozit bányászata.

A 20. század elejére az azbesztnek már több száz alkalmazása volt ismert. A legnagyobb mennyiségű azbesztet – a viszonylag speciális *vegyipari* (szűrők, diafragmák), *papíripari* (tűzálló karton, papír, [9.1. ábra](#)), *textilipari* (tűzálló fonál, zsinór, textil, tűzvédelmi ruházat, kesztyű, [9.2. ábra](#)) alkalmazások mellett – a *gépipar* (tömítések – [9.3. ábra](#), autó fékpofák, súrlódó alkatrészek, [9.4. ábra](#)) és az *építőipar* (azbesztcement palák, vízvezetékcsövek, tűzvédő, hang- és hőszigetelő lapok és burkolatok, azbeszt erősítésű burkolóanyagok, műanyag padlók, padlólapok; [9.4.–9.8.](#) és [10.1. ábrák](#)) használta/használja fel.

Ma már az Európai Unióban, így Magyarországon is tilos az azbeszt alkalmazása, így csak korábban beépített anyagokban találkozhatunk azbeszttel ([10.1. ábra](#)). Az egészségi kockázat szempontjából az azbesztet tartalmazó anyagokat két csoportba oszthatjuk: kis kötőanyag-tartalmú (szórt) azbeszt, illetve magas kötőanyag-tartalmú összetett anyagok, pl. azbesztcement termékek.



9.1. ábra: Azbesztkarton jellegű, hőszigetelő asbesztalkalmazások. Az asbesztkarton a kartonpapírhoz hasonló módon készül, a rövid, jól foszlatott, szennyeződésmentes asbesztszálak helyettesítik a papírgyártás cellulózrostját. Az asbeszttartalom 60–97%, a töltőanyag kaolin és a ragasztó keményítőszármazék (Frank, 1952). Az asbesztkartont gyártottak krizotilból és kékasbesztből is, utóbbi a savaknak jobban ellenállt. a) Azbesztkarton, hőszigetelőlap, Magyarországon is alkalmazták pl. tűzhely és fa konyhabútor elválasztására. b) Azbesztkarton szigetelés radiátor és fedőburkolata között. c) Fémperemmel ellátott krizotilazbeszt lábosalátét tűzhelyre, funkcióját tekintve az asbeszt-háléhoz hasonlítható. A nagyított részlet a sérült, száleresztő felszínt mutatja. d) Fémperemmel és talppal ellátott vasalóalátét, a vasalódeszkát védi a forró vasalótól. Ennek felszíne is eresztí a szálakat. A képek forrása: © Asbestorama – flickr.com



9.2. ábra: Azbeszttartalmú textiliák, jellemzően porképződési védelem nélkül. a) Azbeszttextil gyártósor a Johns-Manville cég 1928-as kiadványából (Waukegan, Illinois állam, USA). b) Tűzálló ruházat (kapucni, kezeslábas, kesztyű) a Keasbey & Mattison (K&M) katalógusából. c) Azbesztfonal termékminta, K&M. d) Azbeszttextil termékminta, K&M. e) Azbesztkanóc olajlámpásba. f) Konyhai tűzálló edényfogó. g) Hőálló vasalódeszka huzat. A képek forrása: © Asbestorama – flickr.com



9.3. ábra: Azbesztek gépipari alkalmazásai. a) Azbesztes tömitőgyűrű, dróterősítésű szőtt azbesztből, tipikusan gőzkazánok ellenőrzőnyílásánál alkalmazták. b) Azbesztes tömitőgyűrűk. c) Kékazbeszt (riebeckitazbeszt) tömitőgyűrű fém foglalattal. d) Kazánajtó, belső oldalán fehér azbesztbélés, a peremén rozsdásodó szőtt azbeszt tömitőszalag fut körbe (kinagyítva). e) Kazánajtó szakadt fehér azbesztzsinór tömitéssel. f) Elektromos vezeték (sodort rézhuzalköteg) fehér azbeszt szigeteléssel és fekete-sárga szőtt textil burkolattal. g) „Karbonit” (Carbonite) márkájú tömités, hosszú szálú krizotilazbeszt és grafit laza keveréke, csőelzáró szelepek házába való. A grafit síkosít, biztosítja a szelep könnyű elforgatását, és megfelelően elszigeteli a szelepet a nagynyomású folyadékoktól, gázoktól. h) Krizotilazbeszt tömitőzsinór épület dilatációs (tágulási) részében, a mállott zsinór rideg, porlódik. A b) és f) alkalmazások kivételével kiporzás elleni (felületi) védelmet nem tartalmazó azbesztalkalmazások. A képek forrása: © Asbestorama – flickr.com



9.4. ábra. a-b) Préselt aszbesztes fékbetétek; c) Tárcsafékbe való fékpofa, a dobozon figyelmeztetés-sel az aszbeszttartalomra és az aszbesztpor képződésének megelőzésére; d) Tekercselt dróterősítésű aszbesztszalag fékbetét. Az aszbesztes fék-, illetve súrlódó alkatrészek többnyire kompozit anyagok, az aszbeszt mellett tartalmazhatnak szerves gyantát, gumit, hőkezelt bitument, fémeket (akár drótok formájában). Az aszbeszttartalmú súrlódó alkatrészek lassabban melegednek, a fék egyenletesebben fog és csak nagyobb nyomáson keményedik fel, így az aszbesztes fékbetétek az aszbesztet nem tartalmazóknál jobb hatásfokúak. A súrlódó alkatrésszel érintkező mozgó alkatrészek is tartósabbak, nehezebben kopnak el. Aszbesztes fékbetétet használtak korábban személy- és tehergépjárművekben egyaránt. Frank (1952) jelzi, hogy 1924-ben az Amerikában font aszbesztszalag 75%-ából fékszalagokat gyártottak, 1950-ben pedig a gyártott aszbesztszalag-mennyiség kétszer körbeírta volna az Egenlítő-t. A probléma az volt, hogy fékezéskor az esetlegesen kiszabaduló szálak szennyezhetik a levegőt, illetve a gyártók és az autószerelők voltak nagyobb expozíciónak kitéve. A képek forrása:

© Asbestorama – flickr.com

9.1 Kis kötőanyag-tartalmú alkalmazások

Kis kötőanyag-tartalmú alkalmazás a **szórtaszbeszt-szigetelés**, amely 95–97% aszbesztet és 3–5% kötőanyagot tartalmaz. Ezek az anyagok porózusak, kis sűrűségűek, a magyar jogszabályok „alacsony, 1 g/cm³-nél kisebb sűrűségű, aszbeszttartalmú szigetelő vagy hangszigetelő anyagok” néven említik őket. A **szórtaszbeszt-szigetelés** elnevezés onnan származik, hogy a szigetelendő felületre szórópisztollyal vitték fel az aszbesztszalagokat, ahogyan a festéket, vakolatot is szokás. **Szórtaszbeszt-szigeteléseket nagyjából 1940-től az 1980-as évek közepéig alkalmaztak Magyarországon, a különböző aszbesztípusokat ilyenkor nem keverték, és egyaránt alkalmaztak riebeckit, amozitot, illetve krizotilt.** Az ilyen burkolatoknak többnyire nincs kiporzás elleni védelme, vagyis az aszbesztszalag a

légmozgás hatására azonnal szabadon a levegőbe jutnak, és az egészségre veszélyt jelentenek. Az ilyen alkalmazásoknál javasolt a burkolatok cseréje, vagy legalább a kiporzás elleni védelem biztosítása.

9.2 Nagy kötőanyag-tartalmú alkalmazások

A nagy kötőanyag-tartalmú alkalmazás leggyakoribb példája az **azbesztcement**¹ **síkpa-****la, hullámpala, vízvezetékcső.** Itt legfeljebb 8–10% azbesztet kevertek a 90–92% cement kötőanyaggal, a gyártási eljárás hasonlított a papírgyártáshoz (lásd később a [11.1. ábrát](#)). **Az azbesztcement termékekben, kissé eltérő tulajdonságaik miatt, sokáig együtt alkalmazták a krizotilt és a riebeckitet.**² Az azbesztszál szerepe itt a szakítószilárdság és a rugalmasság növelése volt. A magas kötőanyag-tartalom erősen csökkenti az azbesztszálak levegőbe jutásának esélyét, így még ha időről időre ki is szabadulhat egy-egy szál vagy szálköteg, a szálkoncentráció általában elhanyagolható. Az azbesztcement termékek cseréje elméletileg a cement tönkremenetelekor (=megnövekedett kiporzási esély) javasolt, a gyakorlatban azonban ezek a termékek rendkívül időtállóak, sok tíz év után is stabilak, így inkább csak a tető- vagy vízvezeték-felújításkor történik meg a csere, és jelentkezik a veszélyes hulladékként történő elhelyezés kötelezettsége.

¹ Az azbesztcement márkanéve, az eternit, a latin tartós, örökkévaló (*aeternus*) szóból fakad, utalva a termék hosszú élettartamára. A technológiát az osztrák Ludwig Hatschek fejlesztette ki, a technológiát 1900-ban szabadalmaztatta, a márkanévet 1903-ban védette le.

² Az azbesztcement termékekben Nyergesújfalun 1903–1983 között, Selypen 1971–1992 között alkalmazták együtt a krizotilt és a riebeckitet. A későbbiekben a riebeckitet műszállal és cellulózzal váltották ki, de krizotilt továbbra is alkalmaztak a gyártás során. 2005 óta minden szálcement termék azbesztmentesen, műszálakkal, cellulózzal készül Magyarországon.



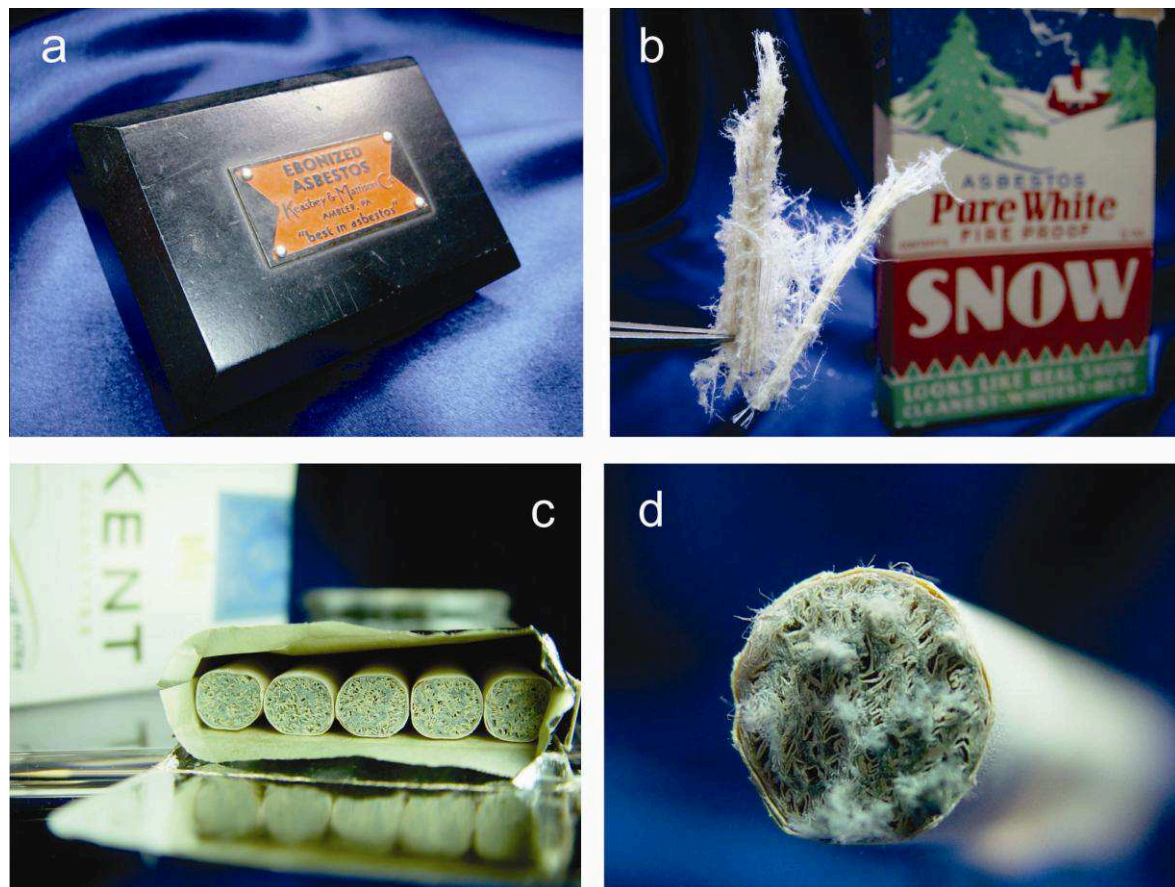
9.5. ábra: Különböző típusú azbesztszigetelések. a) Szórt krizotil hangszigetelés plafonon, az azbesztburkolat lazul, a peremen elválnak a habarcsztól. b) Szinpadi fehér tűzszigetelő azbeszttextil függöny, feltekert állapotban. Az anyag sérült, a kiszabaduló szálkötegek szennyezik a piros színházfüggönyt is. c) Azbesztpapír-szigetelés extrém hőmérsékleteknek (meleg és hideg) kitett laboratóriumi kísérleti üvegeszközön, krizotilból. d) 1968-as szórt azbeszt tűzvédelmi szigetelés szerkezeti vasgerendán, krizotilazbeszt tartalma kb. 25%. e) Azbesztpapír hőszigetelés kazán szellőzővezeték körül. f) Gőzvezetékek hőszigetelésére tervezett, kb. 85% magnéziát (MgO, magas olvadáspontú, fehér, porlódó, tűzálló anyag) és 15% azbesztet (krizotil és amozit) tartalmazó csőburkolat. A mállékony burkolat két félből áll össze, és az egészet vékony vászonburkolat veszi körül (a léptékként használt kocka éle 2,54 cm). g) Málló felszínű, laboratóriumi azbesztháló: melegítésnél a melegítendő üvegedényt erre teszik, hogy ne érje a Bunsen-égő közvetlen hője. Mai azbesztmentes utódai sokszor kerámiaszállal készülnek. A képek forrása: © Asbestorama – flickr.com



9.6. ábra: Nagy kötőanyag-tartalmú, azbesztes kompozit építőanyagok. a) Gruneritazbeszt (amozit vagy barnaazbeszt) szálkötegeket tartalmazó álmennyezeti panel. Az azbesztest ásványgyapotba ágyazták, a panelt rózsaszín festékburkolat borítja. b) Zománcborítású azbesztcement lap, csempeutánszat. c) Azbeszttartalmú műanyag padlólapok 1962-ből. d) Márványhatású beltéri azbesztcement burkolólapok. e) Linóleumpadló, sötét színű azbesztpapír hátlappal. A műanyagpadló szakszerűtlen cseréjekor az azbesztpapír porlódhat, szennyezheti a környezetet. Előfordulhat az is, hogy nem maga a műanyagpadló, hanem a ragasztóanyag tartalmaz azbesztest, nyilván tűzvédelmi célból. f) Azbesztcement zsindegy, a peremén kitüremkedő krizotilazbeszt szálkötegekkel. g) Texturált felületű (famintázatot utánozó) azbesztcement falburkoló lap. Az azbesztszálkötegek jól láthatóan a lap felszínén is kiállnak az alapanyagból. h) Kenhető aszfalt tetőszigetelés, „hosszú szálú kanadai azbeszttel” (=feltehetően krizotil). i) Kazán- és kályhaépítéshez való azbeszttartalmú cement. A képek forrása: © Asbestorama – flickr.com



9.7. ábra: Azbesztcement termékek. a) Krizotil- és riebeckitazbesztet egyaránt tartalmazó azbesztcement cső, a nagyítás a tört felszínből kiálló riebeckitazbeszt szálköteget mutatja. b) Durva kidolgozású, kőzetből hasított tetőfedő palára emlékeztető azbesztcement tetőfedő pala, a durva kidolgozás miatt a peremeken a szokásosnál könnyebben szabadulhatnak ki az azbesztszálak a cement kötőanyagból. c) Azbesztcement síkpala, eternit márkanéven, utalva a termék tartóságára (a latin aeternus szó jelentése tartós, végtelen, örökkévaló). d) Azbesztcement pala, a címke tanúsága szerint tűzálló, „gyakorlatilag elpusztíthatatlan”. Nem a megszokott módon, elemi szálcement rétegek egymásra rakásával készült, hanem egyben, az azbesztcement formába préselésével. e) Budapesten évtizedeket szolgált ivóvíz nyomócsövek. f) Azbesztcement virágédény. g) Azbesztcement hullámpalával borított épület a felhagyott krizotilazbeszt bányában (King mine, Thetford Mines, Kanada). h-i) Krizotilazbesztet tartalmazó festetlen (h) és festett (i) síkpala raklapon, az azbesztre figyelmeztető jelzéssel a nyergesújfalui eternitgyárban, 2000-ben. A képek forrása: a-d) és g): © Asbestorama – flickr.com; e-f), h-i): Tóth Erzsébet



9.8. ábra: Különleges asbesztalkalmazások. a) Azbeszt erősítésű, vulkanizált kemény gumi, ebonit. Mechanikailag ellenálló, tűzálló és elektromos szigetelő tulajdonságai miatt az azbesztet tartalmazó ebonitból gyártottak elektromos kapcsolótábla alapokat, elektromos kapcsolókat, elektromos szigetelő tulajdonságú alkatrészeket. A képen látható bemutató darab papírnehézék lehetett. b) Tűzálló műhó, karácsonyi dekorációs célra (karácsonyfára, koszorúra, kirakatba stb.). 100% szabad azbeszt, készült krizotilból és gruneritazbesztből is (amozit, inkább bézs színű) c-d) Riebeckit azbesztet (kékazbeszt vagy krokidolit) tartalmazó cigarettaszűrő, cellulóz-acetát és krepp papír alapon. Kent márkájú cigarettában alkalmazták ezt a szűrőt 1952–56 között, kihasználva az azbeszt nagy fajlagos felületéhez kötődő jó szűrő tulajdonságát. Az azbesztet még légzésvédő maszk szűrőiben is alkalmazták olykor, az igen apró szilárd szennyezőanyagok kiszűrésére. A képek és az információk forrása: © Asbestorama – flickr.com

10. Az azbeszt jogi vonatkozásai

10.1 Alkalmazás

Az Európai Unióban tilos az azbesztásványok bányászata, alkalmazása, beépítése. Magyarországon 1992-ben tiltották be az amfibolazbeszt, 2005-ben pedig a krizotil (szerpentinazbeszt) alkalmazását. A korábbi évtizedekben az importált azbesztet három településen: Nyergesújfalun (eternitgyár – azbesztcement palák, csövek), Selypen (azbesztcement nyomócsövek, csőidomok) és Kisvárdán (azbeszttartalmú fékbetétek) dolgozták fel nagyobb mennyiségben.

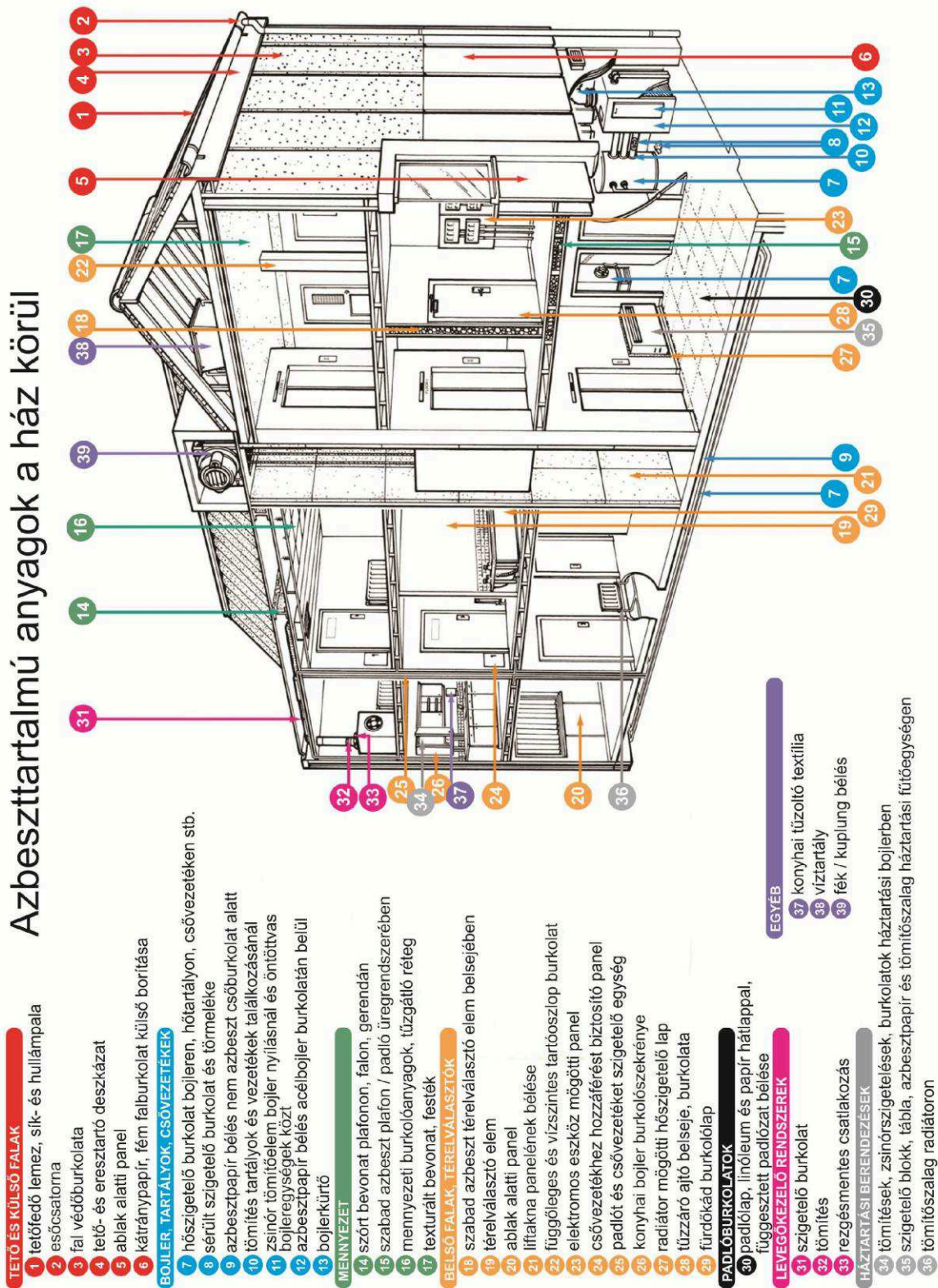
10.2 Eltávolítás az épített környezetből

A már beépített azbesztekre ([10.1. ábra](#)) nincs kötelező érvényű szabályozásunk. A beépített azbesztek egy része teljesen kötött formájú, így ha nem bontjuk, fúrjuk, daraboljuk őket, gyakorlatilag nem jelentenek veszélyt, nem kerülhetnek a levegőbe. Más részükhöz azonban könnyen porlódik, levegőbe jut, ezzel tényleges kockázatot jelent az ott élő/dolgozó embereknek.

Az azbeszttartalmú szigetelések bontását (azbesztmentesítés) csak hatósági engedéllyel rendelkező cég végezheti, a kiporzást megakadályozó óvintézkedések mellett.

10.1. ábra (a következő oldalon): Összefoglaló ábra az azbesztalkalmazásokról: hol találkozhatunk beépített azbeszttel 20. századi épületekben? Magyarországon a leggyakoribb alkalmazások az azbesztcement termékek: sík-, illetve hullámpala a tetőn; csövek, pl. nyomócsőként vagy esőcsatornaként; a szórt szigetelés pl. hőszállító csöveken, hő/hangszigetelő, illetve tűzvédelmi bevonatként garázsban, lépcsőházban, közműcsatornában; azbesztlap kályhák és kazánok közelében. Az ábra angol azbesztmentesítő cégek tájékoztatója alapján készült, így olyan alkalmazásokat is tartalmaz, amilyenekkel Magyarországon csak ritkán találkozhatunk

Azbesztartalmú anyagok a ház körül



10.3 Azbeszttartalmú hulladékok és elhelyezésük

Az azbeszttartalmú hulladék veszélyes hulladék ([10.1. táblázat](#)), elhelyezése csak kijelölt hulladéklerakókban lehetséges. A könnyen porló és a kevésbé porlódó hulladék egyformán veszélyes hulladéknak minősül, jóllehet utóbbi környezeti kockázata jóval kisebb. Mind a beépített, mind a hulladékként kezelt azbeszttel jelzéssel kell ellátni ([10.2. ábra](#)).

Lerakás szempontjából szerencsére különbség van a porlódó és kötött azbeszt között (20/2006. (IV. 5.) KvVM rendelet). Porlódó azbeszttel tartalmazó hulladék csak veszélyes hulladékok számára kialakított (C típusú) hulladéklerakón¹ helyezhető el. Az azbeszttel kívül más veszélyes anyagot nem tartalmazó építési-bontási hulladék (azbeszttartalmú szigetelőanyag, EWC kód² 170601 és azbeszttartalmú építőanyag, EWC kód 170605), amennyiben benne az azbeszt polimerrel burkolt, vagy szálait kötőanyag tartja össze, lerakható B1b (és B3) kategóriájú lerakókon is, de csak külön medencében, megfelelő óvintézkedések mellett.³

Az azbeszttartalmú hulladékok elhelyezési lehetőségeiről a hulladékok EWC kódjának ismeretében a <http://okir.kvvm.hu/kezelelo/> oldalon tájékozódhatunk, amely nyilvántartja a veszélyes és nem veszélyes hulladékokra vonatkozó kezelési engedélyeket (hol, mely cég, milyen hulladékot vehet át és kezelhet).

¹ Magyarországon a 20/2006. (IV. 5.) KvVM rendelet a hulladéklerakókat három kategóriába (A – B – C) sorolja.

Az A típusú lerakó inert hulladék lerakására szolgál.

A B típusú lerakó nem veszélyes hulladék lerakására szolgál, két alkategóriával: B1b – szerves, nem veszélyes hulladék, és előkezelt, stabil, nem reakcióképes és nem veszélyes hulladékként kezelhető, eredetileg veszélyes hulladék; B3 – vegyes összetételű (szerves és szerves) nem veszélyes hulladék.

A C típusú lerakó veszélyes hulladékok elhelyezésére szolgál. Az egyre erősebb fokozatú lerakók (A – B1b – B3 – C) természetesen befogadhatják a gyengébb kategóriájú lerakókba való hulladékokat is.

² Az EWC kód (*European waste catalogue*, azaz európai hulladékkatalógus) a hulladékok azonosítására szolgál, felépítését a 10.1. táblázat ismerteti.

³ Idézet a 20/2006. (IV. 5.) KvVM rendeletről (a hulladéklerakással, valamint a hulladéklerakóval kapcsolatos egyes szabályokról és feltételekről):

„2.2.2. Azbeszttartalmú hulladék lerakása B1b alkategóriába sorolt hulladéklerakón

Azbeszttel tartalmazó építési-bontási hulladék B1b alkategóriájú hulladéklerakón vizsgálat nélkül átvehető, ha a hulladék az azbeszttel kívül más veszélyes összetevőt nem tartalmaz és az azbeszt polimerrel burkolt, vagy szálait kötőanyag tartja össze.

Azbeszttel tartalmazó építési-bontási hulladék kizárólag az azbeszthulladék számára kialakított külön medencében rakható le, a következő feltételekkel:

a) az azbeszt szálak szóródásának elkerülése érdekében biztosítani kell az egyes lerakott hulladékszállítmányok azonnali takarását. Minden egyes tömörítési művelet előtt, megfelelő további réteggel kell a takarást elvégezni;

b) nem lehet az azbeszthulladék lerakására épített medencén olyan mechanikai műveletet (pl. lyukak fúrása) végezni, amely az azbesztszálak szétszóródását eredményezheti;

c) az azbeszthulladékot tartalmazó medence lezárása után a medence helyére vonatkozó helyszínrajzot meg kell őrizni;

d) a hulladéklerakó bezárása után, a lakosság biztonsága érdekében, óvintézkedéseket kell hozni a terület használatának korlátozására.”

EWC kód	Megnevezés
06	Szervetlen kémiai folyamatokból származó hulladékok
06 07	Halogének termeléséből, kisereléséből, forgalmazásából és felhasználásából, valamint halogén vegyületekkel végzett műveletekből származó hulladékok
06 07 01*	Elektrolízisből származó azbeszttartalmú hulladékok
06 13	Közelebről nem meghatározott, szervetlen kémiai folyamatokból származó hulladékok
06 13 04*	Azbeszt feldolgozásának hulladéka
10	Termikus gyártásfolyamatokból származó hulladékok
10 13	Cement, mész és gipsz, valamint az ezekből előállított gyártmányok és termékek gyártásából származó hulladékok
10 13 09*	Azbesztcement gyártásakor keletkező, azbesztet tartalmazó szilárd hulladékok
15	Hulladékká vált csomagolóanyagok; közelebről nem meghatározott abszorbensek, törlőkendők, szűrőanyagok és védőruházat
15 01	Csomagolási hulladékok (beleértve a válogatottan gyűjtött települési csomagolási hulladékokat)
15 01 11*	Veszélyes, szilárd porózus mátrixot (pl. azbesztet) tartalmazó fémből készült csomagolási hulladékok, ide értve a kiürült hajtógázos palackokat
16	A jegyzékben közelebről nem meghatározott hulladékok
16 01	A közlekedés (szállítás) különböző területeiről származó kiselejtezett járművek (ideértve a terepjáró járműveket is), azok bontásból, valamint a járművek karbantartásából származó hulladékok (kivéve 13, 14, 16 06 és 16 08)
16 01 11*	Azbesztet tartalmazó súrlódóbetétek
16 02	Elektromos és elektronikus berendezések hulladékai
16 02 12*	Azbesztet tartalmazó használatból kivont berendezések
17	Építési és bontási hulladékok (beleértve a szennyezett területekről kitermelt földet is)
17 06	Szigetelőanyagokat és azbesztet tartalmazó építőanyagok
17 06 01*	Azbeszttartalmú szigetelőanyagok
17 06 05*	Azbesztet tartalmazó építőanyagok

10.1. táblázat: Kivonat a Hulladékjegyzékből (16/2001. (VII. 18.) KöM rendelet a hulladékok jegyzékéről). A hulladékokat hat számjegyből álló kóddal (EWC kód, EWC – European waste catalogue, azaz európai hulladékkatalógus) látják el, az első két jegy a hulladék főcsoportra, a második kettő a hulladék alcsoportra utal. A táblázat jelzi az azbeszttartalmú hulladékok magasabb hierarchiáját is. A hulladékjegyzékben * jelöli a veszélyes hulladékokat



10.2. ábra: Az azbesztek jelenlétére figyelmeztető jelzés a 44/2000. (XII. 27.) EüM rendelet szerint. A rendelet azt is kiköti, hogy a legveszélyesebb azbesztet (riebeckitazbeszt) tartalmazó anyagnál az „azbesztet tartalmaz” feliratot „krokidolitot/kékazbesztet tartalmaz” felírra kell módosítani. A jelzés minimális mérete 5 cm×2,5 cm (A jelzés alakja, színezése és szövege megfelel az 1907/2006/EK (2006. 12. 18.) rendeletben foglaltaknak is.¹)

¹ Az EU-s rendelet hivatalos magyar fordításában: „Az azbesztpor belélegzése ártalmas az egészségre.”

10.4 Azbesztre vonatkozó határértékek a környezetben

Hazánkban – a geológiai felépítésből adódóan – nincs nagyméretű természetes azbeszt-előfordulás, a levegőbe, talajba és vizekbe tehát nem kerülhetnek azbesztszálak a felszínen levő kőzetek aprózódásából, mállásából. A környezetbe tehát azbesztszálak csak antropogén úton, azaz emberi hatásra juthatnak, azbeszttartalmú alkalmazásokból (pl. málló szigetelések, azbesztcement termékek, régen autók fékpofájából, fékezőkor). A különböző környezetek közül (pl. víz, talaj) az azbeszttartalom tekintetében kizárólag a levegőre vannak megállapított határértékek.

Levegő azbesztkoncentrációjára háromféle határérték van: környezeti határérték (levegő terheltségi szint), tisztasági határérték és munkavédelmi határérték (**10.2. táblázat**). A levegőre vonatkozó **környezeti határérték $0,001 \text{ rost/cm}^3 = 1\ 000 \text{ rost/m}^3$** szállkoncentráció.² A tisztasági és munkavédelmi határértékek az azbesztekkel kapcsolatos egyetlen megengedett tevékenységhez, az azbesztmentesítéshez kötődnek.³ Ha egy helyiségben a porlódó szigetelést eltávolítják, a mentesítés utáni azbesztszál-koncentrációra vonatkozó **tisztasági határérték $0,01 \text{ rost/cm}^3 = 10\ 000 \text{ rost/m}^3$** . Azbeszteltávolítás során a légzésvédő eszköz (porvédő maszk) viselését a **8 órára vonatkoztatott $0,1 \text{ rost/cm}^3 = 100\ 000 \text{ rost/m}^3$ munkavédelmi határérték** túllépése esetén írják elő.⁴

	rost / cm ³	rost/dm ³ (rost/l)	rost/m ³
környezeti	0,001	1	1000
tisztasági	0,01	10	10 000
munkavédelmi	0,1	100	100 000

10.2. táblázat: A levegőre vonatkozó magyarországi azbesztkoncentráció határértékek, különböző mértékegységekben kifejezve. A jogszabályok a rost/cm³ mértékegységet használják, bár életszerűbb a rostkoncentrációt egész számokban kifejező mértékegységek használata.

10.5 Levegő azbeszttartalmának meghatározása

A levegő az a közeg, amelyből leggyorsabban, a legnagyobb mennyiségben az emberi szervezetbe juthatnak az azbesztszálak, ezért a levegő azbeszttartalmát a legfontosabb meghatározni.

A levegő azbesztszál-koncentrációjának mintavételezését és mérését csak akkreditált laboratórium végezheti, az akkreditált laboratóriumok a <http://www.nat.hu/adatbazis/> honlapon kereshetők. Azbesztmérést Magyarországon csak néhány (<10) laboratórium, köztük a korábbi Országos Munkahigiénés és Foglalkozás-egészségügyi Intézet (OMFI), jelenleg a Nemzeti Munkaügyi Hivatal főosztálya végezhet. A Nemzeti Akkreditáló Testület (NAT) akkreditálja és ellenőrzi a hazánkban azbesztmérésre szakosodó laboratóriumokat. A leve-

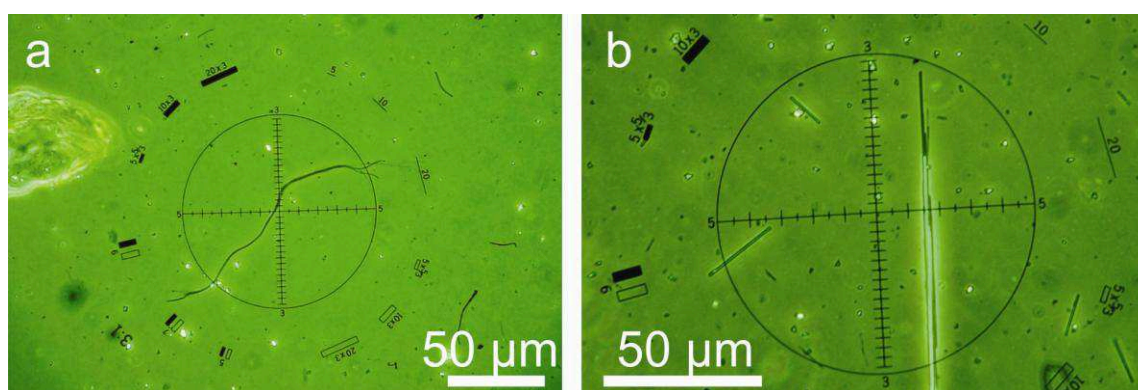
² A 4/2011. (I. 14.) VM rendelet (A levegő terheltségi szint határértékeiről és a helyhez kötött légszennyező pontforrások kibocsátási határértékeiről). Az azbeszttel a rendelet a legveszélyesebb (I. veszélyességi fokozat: különösen veszélyes) légszennyező anyagok közé sorolja. Megjegyzésre érdemes, hogy e rendelet – valószínűleg szerkesztési hiba folytán – azbesztként **csak az amfibolazbeszteket jelöli meg, a krizotilt nem!**

³ 12/2006. (III. 23.) EüM rendelet az azbeszttel kapcsolatos kockázatoknak kitett munkavállalók védelméről.

⁴ A $0,1 \text{ rost/cm}^3$ munkavédelmi (maszkviselési) határérték azonos USA-ban elfogadott határértékkal, de ott differenciáltabb a megközelítés: a határérték 8 órás munkaidőre átlagolt határérték, és a fél órára vonatkoztatott maximális túllépés is meg van határozva 1 rost/cm^3 -ben (ez tízszerese a 8 órára vonatkoztatott átlagnak; 29 CFR 1910.1001 OSHA, azaz *Occupational Safety and Health Standards* szabvány).

gő azbeszttartalmának mérése szigorú szabályokhoz kötött, az akkreditált laboratóriumoknak rendszeresen körvizsgálatokon kell részt venniük.

A levegő azbeszttartalmának vizsgálatához végzett mintavételezéskor a levegőt 25 mm átmérőjű, kevert cellulóz-észter (angolul *mixed cellulose ester*, röviden *MCE*) filteren szívják keresztül. A filter maga egy vékony, kerek papírlaphoz hasonlít, rajta négyzetháló, amely majd a kiértékelést segíti. A levegőszívási sebesség és a mintavétel időtartama a porterhelés függvénye, a cél az, hogy se túl kevés, se túl sok részecske ne kerüljön a filterre, előbbi esetben a kis számú észlelés, utóbbi esetben az egymást fedő szemcsék miatt lehet a számszámlálás hibával terhelt. A mintavételt követően a filter üveglapra kerül, acetongőzöléssel anyagát feloldják, egy csepp triacetint tesznek rá, majd üveglemezzel lefedik. A biológiai metszethez vagy kőzettani vékonycsiszolóhoz hasonlítható preparátumot ezután nagy nagyítású (400×), fáziskontrasztos fénymikroszkópiával (angolul *phase contrast microscopy*, röviden *PCM*) elemzik (10.3.–10.4. ábra).



10.3. ábra: Fáziskontrasztos mikroszkópi felvételek referenciamintákról, zöld interferenciaszűrővel: a) krizotilazbeszt, b) gruneritazbeszt (amozit vagy barnaazbeszt). Mindkét ábrán látható a Walton-Beckett számolómező, a kör átmérője 100 µm, a rajta látható vízszintes skála osztása 5 µm, a függőlegesé 3 µm. A kör alakú mezőn kívül a rostok méretének becslését segítő léptékek is találhatóak. A skála és a lépték is a levegőfiltert értékelő szakember munkáját segíti: az értékelőnek azt kell eldönteni, hogy a látótérben, a körön belül látható szál teljesíti-e méretét tekintve az azbesztszál alaki kritériumát (hossz > 5 µm, átmérő < 3 µm, hossz:átmérő > 3:1). Ha igen, megszámlálja a körön belüli rostokat. A krizotilazbeszt göndörödő-hajló szálkötegeket formáz, szétseprűződő szálvégekkel, az amfibolazbesztek mindig merev, egyenes szálkötegeket formáznak párhuzamos szálakra foszló, a végeken szétseprűződő szálkötegekkel. Figyelem! Egyik esetben sem látjuk az elemi szálakat, a látszólag egyedi szálak is elemi szálak ezreiből álló szálkötegek. A képek forrása:

© Asbestorama – flickr.com

A módszer lényege (az OSHA ID-160 számszámlálási módszer útmutatása alapján), hogy a filter területének meghatározott részén megszámlálják az azbeszt alaki követelményeinek megfelelő szálakat. Ehhez a mikroszkóp látóterébe egy ún. Walton–Beckett-hálót építenek be. Ez nem más, mint egy 50 µm átmérőjű kör, melyen belül meg kell számolni a szálvégeket. A megfelelő méretű szálak azonosításában a körön kívüli méretjelzők segítenek. A körön belüli szálvégek számát számoljuk, ezt kettővel osztva kapjuk meg az egy Walton-Beckett mezőbe (számoló mező) eső szálak számát. A filter kiértékelésekor a mezőn levő rostok számlálása 100 rostig vagy 100 mezőig tart, ha emberi levegővétel van, azaz a filteren emberi légzés szívja keresztül a levegőt, illetve 100 mezőig stacionárius mintavételnél (álló helyzetű mintavető, gépi levegőszívás adott szívási sebesség mellett). A kapott eredményt a

filter teljes területére normálva, és az átszívott levegő térfogatának ismeretében kiszámítjuk a levegőben levő szálak mennyiségét:

$$C = (N \times A_f) / (V \times n \times A_{WB} \times 1000),$$

ahol

C : a levegő szálkonzentrációja, rost/cm³-ben,

N : a regisztrált rostok száma,

A_f : a filter hasznos területe mm²-ben kifejezve, (25 mm-es filternél 385 mm²),

V : a mintavétel során átszívott levegő mennyisége, dm³-ben kifejezve ($V=v \times t$, ahol v a levegőszívási sebesség, dm³/perc-ben kifejezve, t a mintavételi idő, percben kifejezve),⁵

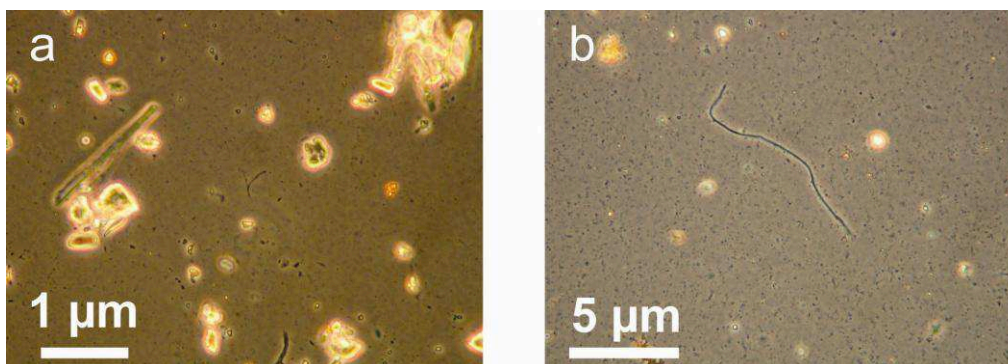
n : a vizsgált számolómezők (Walton-Beckett mezők) száma,

A_{WB} : a számolómező területe, mm²-ben kifejezve (itt 0,00785 mm²).

A nevezőbe épített 1000-es szorzó a dm³ => cm³ átszámítást szolgálja.

Figyelem! A módszer nem az azbesztszálak levegőbeni koncentrációját adja meg, hanem a megfelelő méretű rostokét, így nem minőségi, csak mennyiségi információt adó elemzési módszer. Az így kapott koncentráció felső korlátnak tekintendő az azbesztszál-koncentrációra vonatkozóan, hiszen nemcsak azbeszt, hanem más típusú szál is lehet a filteren.

A gyakorlott szakember alak és optikai tulajdonságok alapján a szerpentin- és az amfibolazbeszteket meg tudja különböztetni egymástól, és megismeri az egyéb szálak anyagok fő típusait is (pl. a szerves szálak, üvegszál, wollastonit stb.). Az eljárás sok türelmet és nagy gyakorlatot igényel. Az OSHA ID-160 szálszámítási módszer csak nagyon indokolt (jogi) esetekben javasolja a szálak közötti különbséget tevő PCM szálszámítást, és kevert száltípusok jelenléte esetén előnyben részesíti azokat a módszereket, amelyek különbséget tesznek a száltípusok között (SEM, TEM).



10.4. ábra: Fáziskontrasztos mikroszkópi felvételek kevert cellulóz-észter szűrős levegőmintáról. a) Korláće (Brvenik, Szerbia), egykori azbesztbánya. A képen a világos, szabálytalan alakú porszemcsék mellett baloldalt van egy nagyobb, oszlopos szemcse és több kisebb krizotilrost is, méretüket tekintve azonban ezek nem érik el az azbesztszál minimális hosszát. b) Kotraž (Stragari, Szerbia), egykori azbesztbánya. A kép közepén krizotilszál, amely teljesíti az azbeszt méretkövetelményeit. A két kép is jelzi, hogy az egyéb porszemcsék sokszor megnehezíthetik a rostsámolást, a levegőminták kiértékelését. Fotó: Tóth Erzsébet

Szálaazonosítási kérdés esetén a levegőt szennyező azbeszttartalmú anyagokból mintát vesznek, és a szálakat megfelelő törésmutatójú folyadékba ágyazva, diszperziós üzemmódban vizsgálják a fénymikroszkóppal (polarizációs fénymikroszkópia, PM, [10.5.–10.6. ábra](#)). Ekkor a kü-

⁵ Figyelem: az 1000 szorzó a dm³ => cm³ szorzó miatt van beépítve, tehát a levegőtérfogatot dm³-ben (l) adjuk meg, a kapott koncentráció pedig rost/cm³ lesz.

lönböző azbesztfajták optikai tulajdonságaik alapján jobban elkülönülnek, pontosabban meghatározhatók, ez a módszer tehát minőségi analitikai módszer. Megjegyezzük, hogy ilyenkor már az optikai (fénymikroszkóp) gyakorlati felbontási határa közelében járunk.

A magyarországi szabályozás⁶ levegővizsgálatnál előírja a PCM pásztázó elektronmikroszkópiával (SEM+EDX) való ellenőrzését is. A SEM+EDX egyrészt a vékonyabb szálat is észreveszi, mert nagyobb nagyításra képes, másrészt a gyorsan beszerezhető kémiai információ az azbesztípus pontosabb meghatározásában is segít. A SEM+EDX módszer alkalmazása a németajkú országokban terjedt el, másutt inkább a transzmissziós elektronmikroszkópiát (TEM) alkalmazzák. A nagyobb nagyításból adódóan több szálát látunk, így SEM és TEM vizsgálat esetén a PCM-mel meghatározottnál nagyobb koncentrációt kapunk. A különböző módszerekkel mért koncentrációk összevetésére vezették be a *fáziskontrasztos mikroszkópiával egyenértékű szálkoncentráció* fogalmát (*PCMe: phase contrast microscopy equivalent*).

A PCM elterjedt módszer, megfelelő gyakorlatú kezelő mellett gyors, termelékeny. A mikroszkóp szállítható, nem úgy, mint a nagyfeszültséget, vákuumot, detektorhűtést igénylő SEM és TEM, tehát szükség esetén a mentesítés helyszínére is kitelepíthető, ha gyors eredményre van szükség. A PCM észlelési határa, azaz, hogy milyen vékony szálát vesz még észre a módszer, kb. 0,25 μm .⁷ Fontos tudnunk azonban, hogy az azbesztszálak, -szálkötegek átmérője ennél kisebb is lehet, mind az amfiboloknál, mind a krizotilnál. E szálátmérő környékén van az egészségre legveszélyesebbnek tartott szálméret is („vékony, hosszú azbesztszál”), tehát fontos, hogy ebben a mérettartományban is jól lehessen szálkoncentrációt mérni.

Magyarországon egyelőre a PCM és a SEM(+EDX) alkalmazásokat használják levegőminták elemzésére. Az angolszász országokban rutinszerűen használják a kémiai és szerkezeti adatokat egyszerre szolgáltatni képes ATEM(+SAED) módszert, itt azonban a szálak hosszúságának megadása jelenthet gondot, épp a túl nagy nagyítás miatt. Elterjedőben van a SEM egy fejlettebb változata (FESEM: téremissziós pásztázó elektronmikroszkóp), amely szinte eléri a TEM felbontását, ugyanakkor részletes, háromdimenziós alaki információt is szolgáltat. Ez utóbbi pedig az amfiboloknál a hosszú hasadási szilánkok és az elsődlegesen szálasan kristályosodott azbeszt elkülönítésében kiemelten fontos, főleg olyan országokban (USA), ahol évente dollár-milliárdokat költenek azbesztmentesítésre, illetve azbesztes környezetek rehabilitációjára.

Számítási feladat

Azbesztszálakra vett levegőminta kiértékelése fáziskontrasztos mikroszkópiával (PCM). (1.4.)

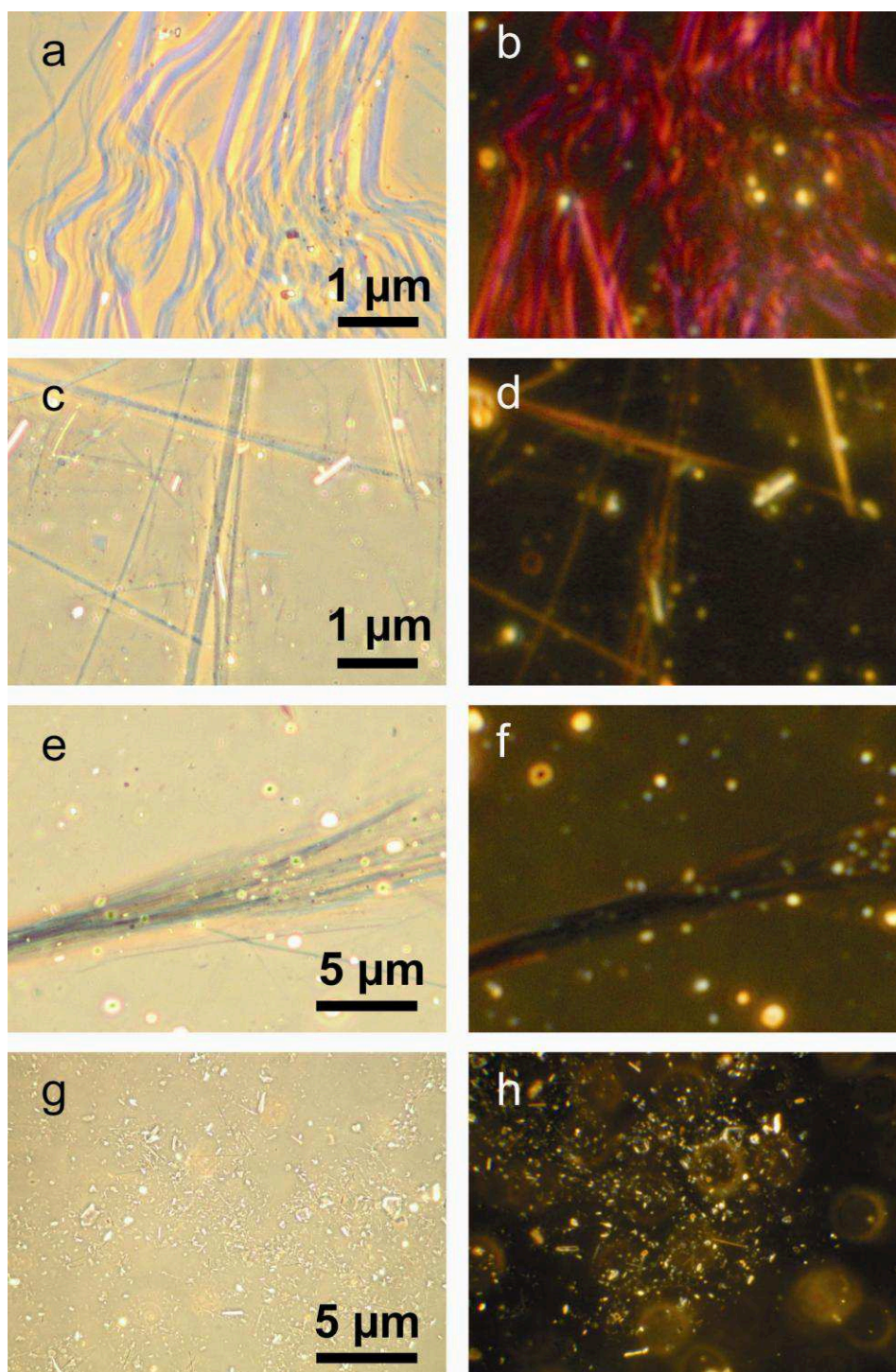
A mérést azbeszttartalmú szigetelés eltávolítása után végezték egy irodaépületben, stacionárius mintavétellel. A mintavétel során a levegő átszívási sebessége 6 l/perc volt, a mintavétel időtartama pedig 150 perc.

- Számítsuk ki, hogy 200 számolómező átnézésével a 25 mm átmérőjű filter mekkora területét vizsgáltuk át? Adjuk meg, hogy ez a teljes filterterület mekkora hányada!
- A levegőminta kiértékelésekor összesen 36 rostot számoltunk meg. Számítsuk ki a mintázott levegő rostkoncentrációját a megadott összefüggés alapján.

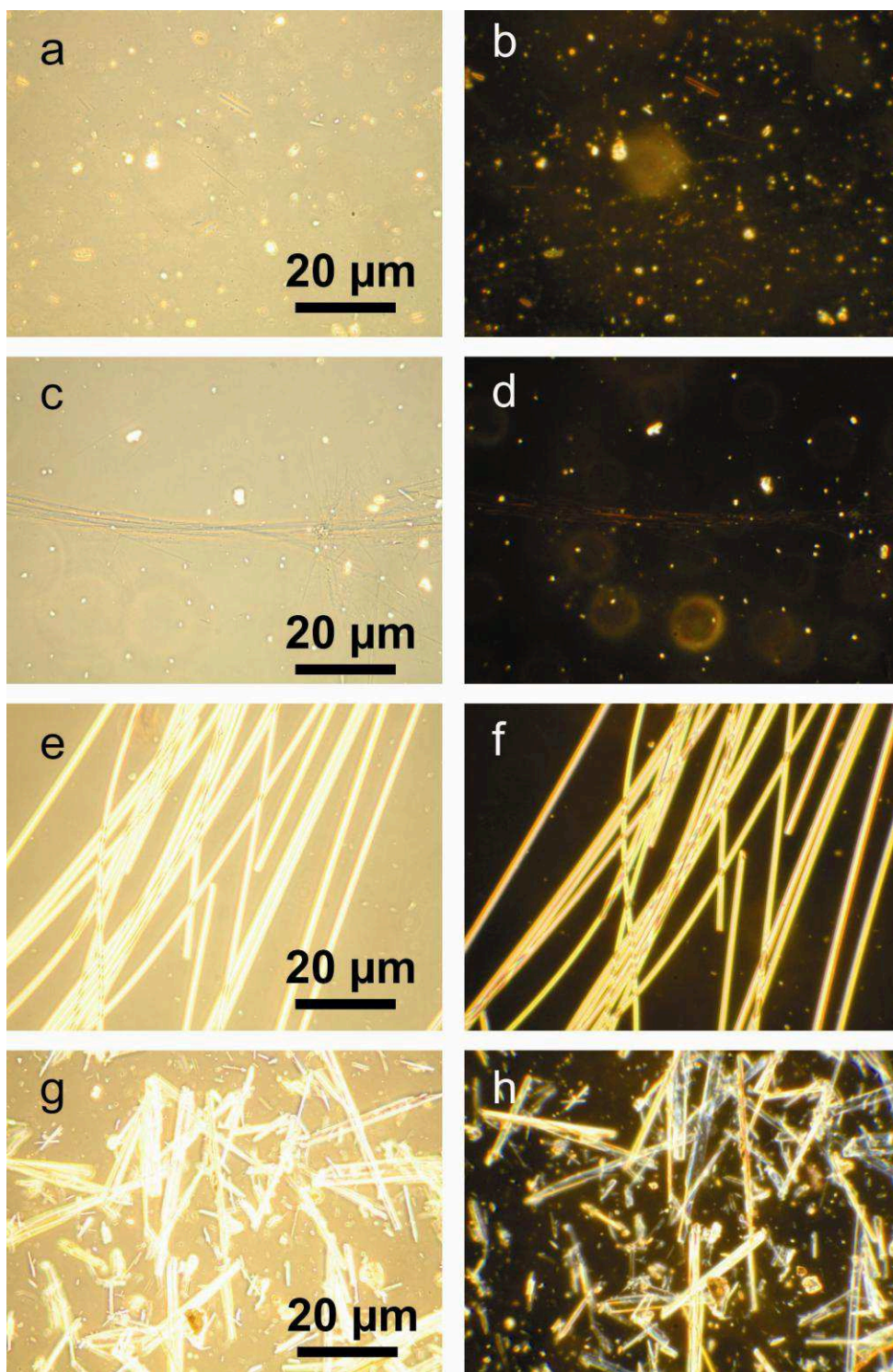
⁶ 4/2011. (I. 14.) VM rendelet.

⁷ Ez a kimutatási határ könnyen végiggondolható, ha tudjuk, hogy az emberi szem felbontóképessége nagyjából 0,1 mm. A vonalzó milliméterskáláját még mindenki jól látja, két egyenlő részre még fel is tudjuk osztani ceruzával, ennek negyed-ötödrésze (legfeljebb 0,1 mm), amit a legjobb szemű ember segédeszköz nélkül még észlelni tud. A PCM nagyítása 400 \times . Ha az 0,1 mm-t osztjuk 400-zal („kicsinyítünk”), 0,25 μm -t kapunk, ez a legvékonyabb szál, amit még észreveszünk a PCM-ben. Kicsit vékonyabb, de hosszú szálat a gyakorlott laboratóriumi munkatárs még esetenként észrevesz, de ez már nem tervezhető.

- c) Mekkora a mérés hibája, ha a vizsgálat során a szálszámlálási pontosságunk ± 2 szál?
 d) Értékeljük az eredményt a magyarországi határértékek alapján (környezeti, tisztasági és munkavédelmi határértékek)!



10.5. ábra. Azbeszt típusok megfelelő törésmutatójú folyadékba ágyazva. Baloldalt fáziskontrasztos, jobboldalt diszperziós fotó (angolul central stop dispersion staining color image). a-b) Krizotilazbeszt, jellegzetesen görbülő szálakkal. c-d) Gruneritazbeszt (barnaazbeszt vagy amozit). e-f) Riebeckitazbeszt (kékazbeszt vagy krokidolit). g-h) Antofillitazbeszt



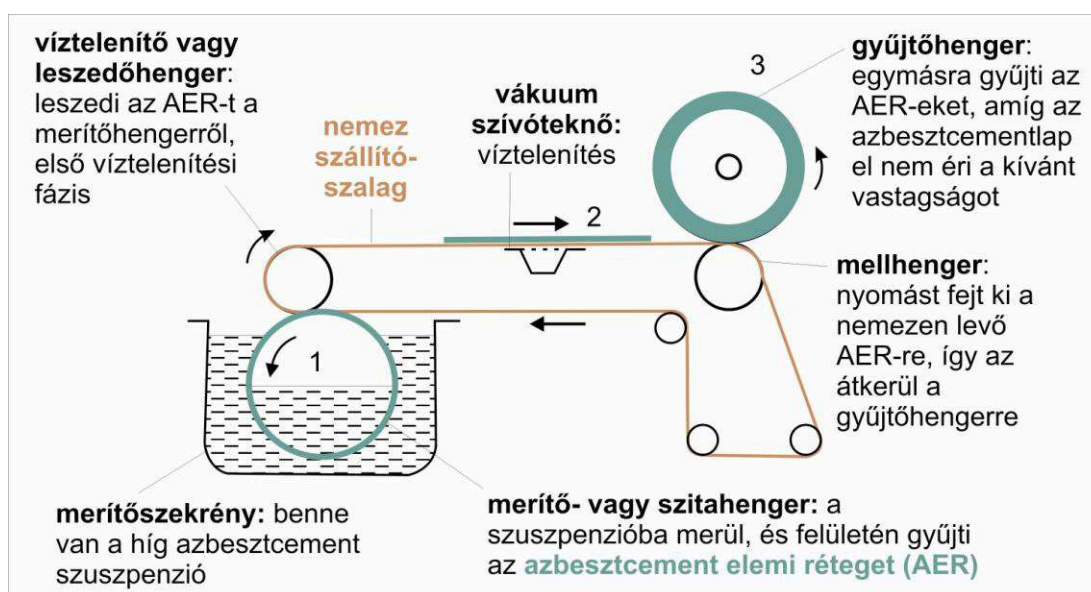
10.6. ábra. Azbesztípusok és helyettesítő anyagok megfelelő törésmutatójú folyadékba ágyazva. Baloldalt fáziskontrasztos, jobboldalt diszperziós fotó (angolul central stop dispersion staining color image). a-b) Tremolitazbeszt. c-d) Aktinolitazbeszt. e-f) Üveggyapot (mesterséges szál), jellegzetesen vastagabb az azbeszteknél. g-h) Wollastonit ($\text{Ca}_3[\text{SiO}_3]_3^{\text{triklin}}$) – azbeszt kiváltására (főleg szálerősítésű kerámiában, műanyagban) használt szálak megjelenésű szilikátásvány, egyelőre nem szabályozott egészségügyi szempontból (3-as IARC kategória: emberekre gyakorolt rákkeltő hatás tekintetében nem besorolható)

11. Azbesztcement termékek előállítása, a gyártás és a felhasználás környezeti kockázata (Esettanulmányok 1.)

11.1. Azbesztcement termékek előállítása, a gyártás környezeti kockázata

Ugyan az Európai Unióban már sehol nem állítanak elő azbesztcement termékeket ([7.3. ábra](#), [9.7. ábra](#)), azonban a környezeti ásványtani szakember számára két dolog is indokolja a gyártási technológia ismeretét. Egyrészt szerte a világban még mindig évente kétmillió tonnánál nagyobb mennyiségben bányásznak azbesztet és dolgoznak fel főként azbesztcementként, például a velünk szomszédos Ukrajnában is. Emellett a már beépített azbesztek viselkedésének előrejelzésekor is fontos tudni, hogy hogyan készültek ezek a termékek.

Azbesztcement-termékek előállítása azbeszt, cement és víz különböző arányú szuszpenziójából történik, a leggyakoribb gyártási módszer a 60–90% vizet felhasználó nedves, merítőhengeres eljárás (Kincsem és Opoczky, 1982). A szuszpenzió (vagyis azbesztet és cementszemcséket tartalmazó szürke, tejszerű lé) elkészítéséhez először vékony szálkötegekre foszlatják az azbesztet, vizes (és előtte esetleg száraz) közegben, hogy a szálak és a cementszemcsék között megfelelő kapcsolat jöhessen majd létre. Az azbeszt-víz szuszpenzióhoz adagolják a cementet. A kész zagy a nagykeverőbe kerül, annak feladata a gyártósor ellátása ([11.1. ábra](#)). A szuszpenzió koncentrációja 18–20% a nagykeverőben.



11.1. ábra: Az azbeszt- és egyéb szálcement termékek gyártási vázlat, Kincsem és Opoczky (1982) nyomán. A merítőszekrény tartalmazza a híg azbesztcement szuszpenziót. Ebben forog a merítőhenger vagy szitahenger, amelynek palástját sűrű szita alkotja (1). A forgás során a víz átáramlik a henger szitafelületén, ahol az azbesztcement folyamatos réteget képez. Ez az elemi réteg. Mivel a szálak többnyire egyik végükkel kapcsolódnak először a merítőhengerhez, azok bizonyos mértékig forgásirányba rendeződnek az elemi rétegben. A merítőhengerről az elemi réteg végtelenített nemezre kerül. A nemez elhalad egy vákuum-szívóteknő fölött, itt víztelenítik először az elemi réteget (2). Ezután az elemi réteg két henger között áthaladva a nemezről a gyűjtőhengerre kerül (3), kihengerlődik és így tovább víztelenedik. A gyűjtőhengerre kerülő réteg nedvességtartalma még 25–40%. A gyűjtőhengeren többrétegű lemezt képeznek az egymásra rakódó elemi rétegek. Ha a többrétegű lemez elérte a kívánt vastagságot, egy vágóberendezés alakító irányban elvágja és lefejt a hengerről. A többrétegű azbesztlapból készülhet a továbbiakban síkpa-
la, hullámpala vagy cső.

A Ludwig Hatschek által szabadalmaztatott, a papíriparból átvett eljárás lényege az, hogy a nagy felületű és szűrőképességű szálal anyag – az azbeszt – felületét szemcsés anyaggal – a cementtel – telítik, ezt kimerítve elemi réteget alkotnak, majd az egymásra rakódott rétegeket összesajtoltva lemezt formáznak (**11.1. ábra**). A lemezből készülhet síklemez, hullámpala, cső vagy akár kültéri virágedény is a továbbiakban. A terméket a kialakítás után hidraulikus préssel tovább víztelenítik, és néhány órát 50–70 °C-on érlelik, elősegítendő a szilárdulást. Az érlelés után az azbesztcement termék víztartalma még 10% körüli. A cement szabvány szerinti teljes kötése nagyjából további egy hónapot vesz igénybe, ez idő alatt párás közegben tárolják a készterméket.

A gyártás során azbesztpor főként az azbeszt gyártósorra juttatásánál és száraz foszlatásánál (görgős malomban), illetve a késztermék végső, kézi megmunkálása (vágás, lyukfúrás, csővégek esztergálása stb.) során keletkezett/keletkezik. Maga az azbesztcement előállítás a szuszpenzióból végig vizes, porszegény környezetben történik.

A modernebb azbesztfoszlatási technológiák vizes közeget alkalmaztak: a papíriparból átvett *hollandikádas* foszlatásnál a kádban szuszpenzióként körbeáramló azbesztet egy pengékkel ellátott forgódob foszlatja, míg a hidrofoszlatók az áramló víz mechanikai hatását használják fel a szálkötegek elválasztására. A foszlatáshoz, illetve a gyártáshoz használt víz is környezetszennyezés forrása lehet.

A 20. században sokáig nem fordítottak megfelelő figyelmet a munkavédelemre, a portmentes munkahelyre. Az azbesztfeldolgozó üzemek munkásai sokszor szenvedtek az azbeszt egészségkárosító hatásától.

Azbesztcementet ma már nem gyártanak az Európai Unióban, de ugyanezzel a technológiával, engedélyezett helyettesítő szálak (pl. cellulóz) felhasználásával, gyártanak szálcement termékeket a mai napig. Általában több szálal használnak egyszerre, pl. cellulózt és polivinil-alkoholt (PVA).

11.2. Azbesztcement termékek korróziója, és az ehhez kapcsolódó környezeti kockázat

Az azbesztcement termékek környezeti kockázata abból adódhat, hogy a cement mállásával az azbesztszálak kiszabadulnak a cementből. Az azbesztcement palákat kívülről az időjárás viszontagságai érik. Az esőcsatornákat kívülről az időjárás, belülről az átfolyó esővíz (lágú víz)¹ erodálhatja. Az azbesztcementből a kültéri levegőbe jutó azbesztszálak nem tudnak koncentrálni, ezért komoly környezeti kockázatot nem jelentenek.

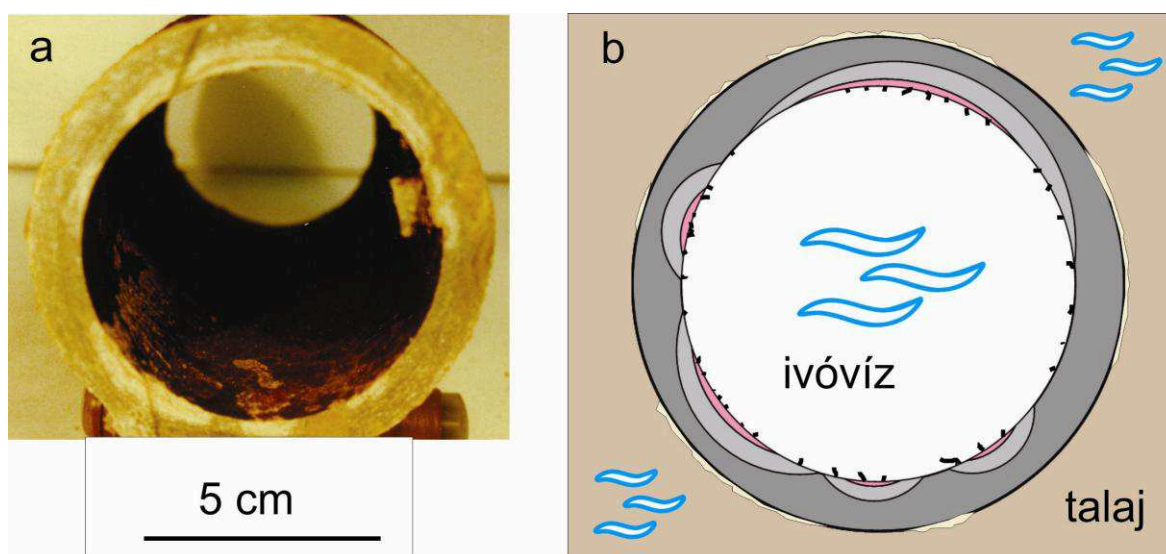
A talajba fektetett csöveket kívülről a talajnedvesség, belülről pedig a szállított folyadék támadhatja meg. Az ivóvízbe jutó szálak bekerülhetnek az emberi szervezetbe is, ezért fontos, hogy ismerjük a csövekben lejátszódó ásvány átalakulási, -képződési folyamatokat, és a kiszabaduló azbeszt egészségi kockázatát.

11.2.1. Magyarországi tapasztalatok: azbesztcement vízvezetékcső ásvány átalakulási és -képződési folyamatai

Magyarországon azbesztcementet 1903–2005 között állítottak elő (**9.7.h-i. ábra**). Azbesztcement csöveket, csőidomokat a 20. század első felében Nyergesújfalun, illetve 1971-től Selypen gyártottak, részben hazai felhasználásra, részben exportra, a szomszédos országokba. Az azbesztcement csöveket használták vízvezetéknek, szennyvízcsatorna-csőnek és csapadékvíz elvezetésére, esőcsatornának is. Az eternitcső előnye tartóssága mellett a nagy szakítószilárdság: a meglévő útburkolatot a csőfektetés miatt nem kellett felbontani, a cső-

¹ A lágú víz oldóképessége nagyobb, mint az ionokban gazdagabb vezetékes vízé.

vet át lehetett nyomni az út felszíne alatt, emellett jól bírta a nyomás alatti folyadékszállítás (a vezetékes ivóvíz nyomás alatt van a csőrendszerben, a szennyvíz és az esővíz nem). Megvizsgáltuk egy 44 évet szolgált vízvezetékcső korrózióját. A vízvezetékcső a budai II. kerületben (Pesthidegkúton) szolgált 1956–2000 között. Itt az ivóvíz kemény,² és 750 kPa nyomáson (a légnyomás hét és félszeresén) szállítódik a vezetékben. A csövet az ivóvíz jobban megtámadta, mint a talajnedvesség/talajoldatok (11.2. ábra). A talaj felől védő ásványkéreg alakult ki a cső felszínén, amely a cső 80%-át beburkolja. Ugyanakkor a cementet belülről megtámadta az ivóvíz: a cement egy része feloldódott, a visszamaradó azbesztszálakból pedig sűrű szövedék (11.3. ábra) jött létre a cső belső felszínén. A vizsgált csőben csak szerpentinazbesztet találtunk. A szövedéket és a cső belső felszínét a vízből kivált, porszerű, sötétbarna kéreg borítja. A cső a belső felszíntől kiindulva zónásan át is alakult (11.2. ábra).



11.2. ábra: 44 évet üzemben levő vízvezetékcső, keresztmetszeti fotó (a) és vázlatos rajz üzemi állapotban, az átalakulási zónákkal

A cső összetételét, elváltozásait az ásványtan és az anyagtudományok rutin módszereivel vizsgáltuk. A cső egyes zónáinak ásványos összetételét röntgen pordiffrakcióval (röviden XPD, 11.4. ábra) határoztuk meg. A csőből vékonycsiszolatot³ készítettünk, és ezt áteső fényes polarizációs mikroszkóppal, valamint energiadiszipatív röntgen spektrométerrel ellátott pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM+EDX) vizsgáltuk. A vizsgálatok eredményeit a következőkben foglalhatjuk össze:

A cső felszínét kívülről 80%-ban borítja sárgás, változó vastagságú (max. 1 mm) ásványkéreg, amely főképp kalcitból áll, de benne maximum 1 mm-es, saját alakú gipszkristályok

² Kemény víz: kalcium (Ca^{2+}), magnézium (Mg^{2+}) kationokat, valamint hidrokarbonát (HCO_3^-), esetleg szulfát (SO_4^{2-}) és klorid (Cl^-) anionokat nagyobb mennyiségben tartalmazó víz. Minél több az oldott ionok mennyisége a vízben, annál hajlamosabb a víz a vízkőképzésre (többnyire fehér, kalcium-karbonát, CaCO_3 anyagú lerakódás meleg vizet használó készülékekben, pl. mosógép, vízforraló, vasaló).

³ A vékonycsiszolat egy kb. 30 μm (=0,03 mm) vastagságú szelet, amely készülhet bármilyen szilárd anyagból, legyen az természetes (pl. ásvány, kőzet, csont) vagy mesterséges (pl. beton, vakolat, azbesztcement). Ilyen vastagságban a legtöbb anyag már átlátszó/áttetsző, így vizsgálható átvilágító optikai mikroszkóp segítségével. A gyakorlatban előbb egy kb. mm-vastag szeletet vágnak a vizsgálandó anyagból, ezt simára csiszolják, majd műgyantával üveglapra ragasztják. Ezután a szeletet a kívánt vastagságra vékonyítják, vágással vagy csiszolással, végül a felületet egészen simára polírozzák.

is található. Kevés lemosható agyagrarakódás (illit, kaolinit) is megfigyelhető rajta. A külső ásványkérget a talajoldatok cementálták. Alatta a cső anyaga üde, átalakulatlan, sötétszürke.

A cső belső felszínén a kötőanyag kioldódása nyomán változó vastagságú, max. 1–2 mm vastag azbesztszövet maradt vissza (**11.3. ábra**), amelyet barna, viszonylag nehezen lekaparható, igen finomszemcsés lerakódás borít. A lerakódás anyaga rosszul kristályos vas-oxihidroxid és némi kvarc. A cső a belső felszíne felől foltokban átalakult: a rózsaszín, leginkább mállott zónát kevésbé mállott, világosszürke udvar övezi. A vörös, leginkább átalakult szakaszoknál legvastagabb a belső azbesztszövet. A vörös átalakulás 1–2 mm vastag, a világosszürke udvar 3 mm, a sötétszürke gyűrű (az átalakulatlan, üde cement) 6–10 mm.



11.3. ábra: Szálszövet az azbesztcement cső mállott belső felszínén. Környezeti pásztázó elektronmikroszkópos felvétel, visszaszórt elektronkép

A megkötött cementben üde állapotban hidratálatlan és hidratált kalcium-szilikátok, kalcium-vas-aluminátok és kalcium-hidroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, ásvány megfelelője a portlandit) található. Az ivóvízben oldott szén-dioxid hatására a hidratált kalcium-szilikátok (több lépésben, amorf kovagél keletkezése mellett) és a kalcium-hidroxid kalcium-karbonáttá alakultak. Meglepő módon kétféle CaCO_3 módosulat is van a vizsgált csőben, a természetben ritka, metastabil hexagonális módosulat, a vaterit ($\text{CaCO}_3^{\text{hex}}$; a rózsaszín és világosszürke zónában) és a legstabilabb trigonális módosulat, a kalcit ($\text{CaCO}_3^{\text{trig}}$; mind a mállott, rózsaszín és világosszürke zónákban, mind az üde, sötétszürke cementben).

Mivel az azbesztcement palák korróziója jóval gyengébb, mint a nyomócsöveké, ezek egészségi kockázata a szálak gyengébb kiszabadulási esélye és a szálak levegőbeni azonali szétszóródása nyomán elhanyagolható.

11.2.2. Azbesztcement vízvezeték csőrendszer bizonyított vízszennyezése és annak egészségre gyakorolt hatása

Woodstock városában (New York állam, USA) bizonyított ivóvízszennyezés hosszú idejű nyomon követése után, 2004-ben zártak le egy állami vizsgálatot (New York State Department of Health, 2004), amely nem mutatott ki a helyi lakosság körében ivóvíz azbesztszennyezéséhez köthető megnövekedett rákkockázatot.

A tanulmány zárójelentése szerint Woodstockban egy 1985-ös vízellátási szünet után derült ki, hogy a helyi, az 1950-es évek második felében üzembe helyezett azbesztcement csőrendszer „kézzel foghatóan” azbeszttel szennyezi az ivóvizet: a vízellátás helyreállítása után nyomáscsökkenést érzékeltek, ennek oka pedig az volt, hogy a vízellátás helyreállításkor, valószínűleg a nyomás hirtelen megnövekedésével a csövek belső felületén felszaporodott azbesztszövetek nagy tömegben elszabadult, és csapszűrőket és zuhanyrózsákat tömött el.

A helyi, erősen korrozív víz, a magyar példához hasonlóan, de annál nyilván erőteljesebb módon elbontotta az azbesztcement csöveket, és az azbesztszálak kiszabadulását eredményezte.

Egy 1976-os archív vízminta vizsgálatából kiderült, hogy már 9 évvel korábban is volt azbeszt az ivóvízben. A tanulmány szerint nem kizárt, hogy 1960 óta tartalmazott többkevesebb azbesztszálát az ivóvíz, ami azt jelenti, hogy a helyi lakosság akár 25 éven keresztül is ihatta az azbeszttartalmú vizet. 1985-ben a legnagyobb mért szálkoncentráció Woodstock vezetékes vízében 304,5 millió rost/l volt. A tapasztalatok nyomán a lakosságot eltanácsolták a helyi víz fogyasztásától a vízvezetékrendszer teljes cseréjéig, amit 1986-ra befejeztek, és 1987-ben feloldották a vezetékes víz fogyasztásának tilalmát. A helyi vizet 1960–1986 közt fogyasztó lakosság (kb. 3000 fő) egészségi állapotát (a rákos megbetegedéseket) visszamenőlegesen is, az 1980–1998 időszakra rögzítette egy erre a célra felállított bizottság. A vizsgálati időszakban és a vizsgált lakosság körében nem tapasztaltak emelkedést a rákos megbetegedések gyakoriságában, a vizsgálatot ezért a 2004-es jelentéssel lezárták.

12. Szálas szilikátok akaratlan felhasználásához kötődő környezeti kockázat (Esettanulmányok 2.)

A következőkben röviden olyan szálas, azbesztszerű (angolul *asbestiform*) megjelenést (is) mutató szilikátásványokat ismertetünk, amelyeket önállóan nem alkalmaztak ipari nyersanyagként, de más ipari nyersanyagok alárendelt, észrevétlenül jelen lévő alkotóiként okoztak/okoznak környezeti egészségi problémákat.

Az utolsó példa Magyarországról származik, akaratlan krizotilazbeszt alkalmazáshoz kötődik, és jó példája a környezeti kockázat túlbecslésének, illetve a probléma racionális, és gazdaságilag is megvalósítható megoldásának.

12.1. Fluoroedenit (amfibol, Biancavilla, Szicília, Olaszország)

A fluoroedenit amfibolt az Etna vulkáni kőzeteiből írták le, jól fejlett kristályos és szálas formában egyaránt ([Gianfagna és Oberti, 2001](#); [Gianfagna et al., 2007](#)). A ritkaságnak számító, újonnan leírt ásvány szálas változata méretét tekintve megfelel az azbeszt morfológiai kritériumának (a szálak hossza $> 10 \mu\text{m}$, átmérője $< 1 \mu\text{m}$, [Gianfagna et al., 2003](#)). A morzsálódóbb lávakőzetet, amely a szálas amfibolt is tartalmazza, könnyebb fejteni, őrlni, ezért helyi építési célokra bányászták. E kőzet porterheléséhez kötik a környéken (Biancavilla) a rosszindulatú mezotelióma (a mellhártyán jelentkező savóshártya daganat) megjelenését ([Paoletti et al., 2000](#); [Burrigato et al., 2005](#); [Bruni et al., 2006](#)).



12.1. ábra: Figyelmeztető tábla Biancavilla környékén. Szövege nagyjából: Tilos a belépés! A beléggzéssel egészséget károsító fluoroedenit van jelen a területen. Frank de Wit felvétele

A kőanyagot felhasználták házépítésnél, a zúzott kőből (murvából) burkolatlan utak készültek, a kőrleményt habarcsba és vakolatba is belekeverték. A kőbányászat és kőfelhasználás az 1960–70-es években volt a legintenzívebb ([Bruni et al., 2006](#)). A lakosságot tehát nemcsak a kőfejtéssel járó por, hanem a murvás, aszfalozatlan utak pora, a beépített kőanyagból kiszabaduló amfibolszálak, a kötőrmeléktől amfibolszálakkal szennyezett habarcs és vakolat is terhelte. A levegőben a legmagasabb szálkoncentrációt az aszfalozatlan utak közelében mérték ([Bruni et al., 2006](#), $0,02 \text{ szál/cm}^3$, ez meghaladja nemcsak a hatályos magyar környezeti ($0,001 \text{ szál/cm}^3$), hanem a tisztasági határértéket is ($0,01 \text{ szál/cm}^3$). Mára a morzsálódó lávakőzet kőfejtőit bezárták, az utakat aszfalozzák, eltávolítják a por-

lódó építőanyagokat az 1950–1990 közt épült épületekből, és a veszélyes körzetekben a figyelmeztető táblákat helyezték el ([12.1. ábra](#)).

12.2. Winchit, richterit (amfibol, Libby, Montana állam, USA)

Libby (Montana állam, USA) környezetében hőszigetelésre alkalmas vermikulitot¹ bányásztak az 1920-as évek elejétől 1990-ig. A vermikulit külsőre a csillámokhoz hasonlít, olykor több cm-es, hatszög alakú lemezkötegeket formáz, és magas az olvadáspontja. Hirtelen hevítésre térfogatának többszörösére duzzad, így porózus, jó hőszigetelő, könnyű technológiai anyagot kapunk, ezt töltötték a födémekbe tetőtér beépítésnél ([12.2. ábra](#)).

A vermikulit bányászata és feldolgozása során keletkezett portól megbetegedtek a bányászok, a feldolgozó munkások és a helyi lakosság is. A megbetegedések nyomán 1999-ben részletes ásványtani vizsgálatok indultak. Kiderült, hogy Libbyben a vermikulit mellett alárendelten (1–5%) amfibol is volt, szálas és nem szálas egyaránt.

A vermikulit mellé társuló amfibolt előbb tremolitnak tartották, a legújabb vizsgálatok szerint, a jelenleg érvényes amfibol nevezéktan alapján ([7.6. ábra](#), [Leake et al., 1997](#)) viszont az azbeszt megjelenésű amfibol túlnyomórészt winchit,² illetve richterit³ és csak igen kis részben tremolit ([12.2. ábra](#)). Ezáltal az az abszurd helyzet áll elő, hogy az egészségi szempontból nyilvánvalóan amfibolazbesztként kockázatot jelentő anyag jogi szempontból nem azbeszt!

Egyes adatok szerint a portól kapott betegségbe eddig 400 ember halt bele, és további 1750 szenved a szálas amfibolokhoz köthető légúti megbetegedésekben. 2011 szeptemberében, arra hivatkozva, hogy „az állam tudott a szálló por egészségkárosító hatásáról”, egy bíró 43 millió dollár kártérítést ítélt meg az olykor 10 éve pereskedő, 1000-nél is több károsultnak. Az érintett terület 2002 óta *Superfund*⁴ terület: a vermikulitbányászat okán felszínre került, és a környezetet, a lakosságot veszélyeztető azbesztszennyezés eltakarítása eddig 370 millió dollárba került, és még évekig eltarthat.

A vermikulitot másutt a mai napig bányásszák és használják szigetelőanyagként, a világ többi lelőhelyén egyelőre nem merült fel szálas amfibol hozzákeveredése.

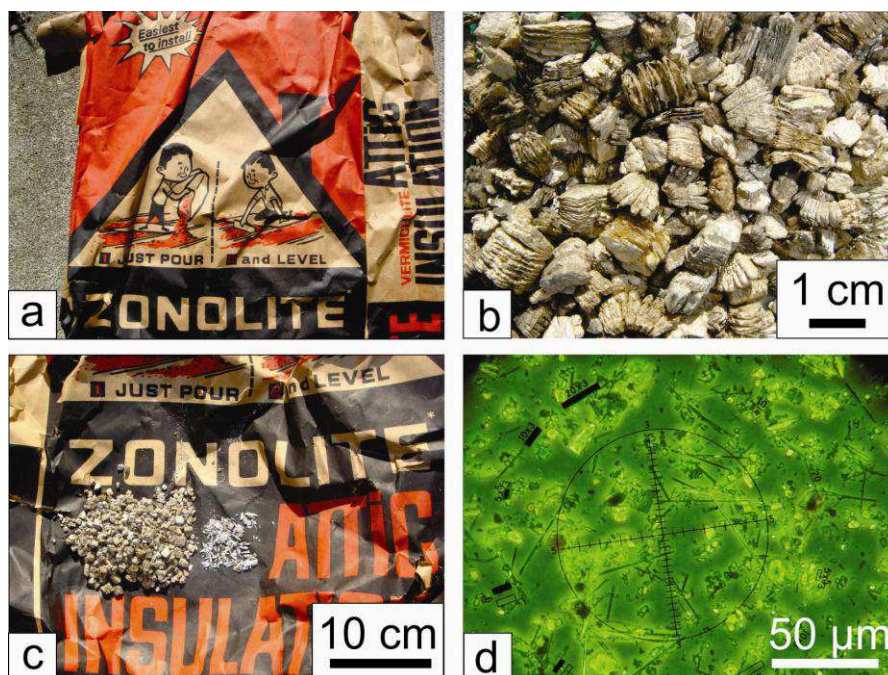
Ugyanakkor az „azbeszttartalmú” vermikulitot szintén 1. kategóriájú rákkeltő anyagként tartja nyilván az IARC.

¹ A vermikulit a biotit és a flogopit nevű csillámok mállásával vagy hidrotermás átalakulásával keletkező 2:1 (TOTI) rétegszilikát, rétegeközi (interlamináris, I) terében hidratált kationok vannak, hozzávetőleges összetétele $M_{0,6-0,9}(Mg, Fe^{3+}, Al)_3[(Si, Al)_4O_{10}](OH)_2 \times 4H_2O^{mon}$, ahol M=K, Ca, Na, Mg.

² $\square(Ca, Na)Mg_4(Al, Fe^{3+})[Si_8O_{22}](OH)_2^{mon}$.

³ $Na(Ca, Na)Mg_5[Si_8O_{22}](OH)_2^{mon}$.

⁴ A *Superfund* az Amerikai Egyesült Államok egy szövetségi törvényének egyszerűbb, hétköznapi neve. A törvény az 1980-as *Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act* (röviden *CERCLA*, jelentése nagyjából: Az átfogó környezeti felelősségről, kompenzációról és anyagi felelősségvállalásról szóló törvény), amelynek célja a veszélyes anyagokkal szennyezett területek megtisztítása. A törvény felhatalmazza az *Environmental Protection Agency*-t (EPA, Környezetvédelmi Ügynökség) a szennyezett területek felmérésére. A felmérés alapján a kiemelten szennyezett terület felkerülhet a Nemzeti Prioritási Listára (*National Priority List*, röviden *NPL*), az ilyen terület neve *Superfund Site* (Superfund terület), és hosszútávú kárelhárítási / környezeti rehabilitációs programot igényel. A törvény felhatalmazta az EPA-t, hogy amennyiben ez lehetséges, a szennyezésért felelősökre terhelje a kárelhárítást (vagy annak költségeit). Amennyiben a felelősök nem elérhetők, vagy anyagilag nem vonhatók felelősségre, az EPA végzi a kárelhárítást és a hosszú távú környezeti rehabilitációt egy elkülönített pénzügyi alapból. Ez az alap kezdetben az olajiparra és vegyiparra kivetett speciális adókból jött létre, de ma már egyéb forrásokra szorul. 2012-ben az USA prioritási listája kb. 1300 Superfund területet tartalmaz.



12.2. ábra: Hevített vermikulit szigetelőanyag, Zonolit márkanevvel. a) Csomagolás, felhasználási javaslattal: csak be kell tölteni a födémbe és elegyengetni. b) A duzzasztott, hatszög alakú vermikulit lemezkötegek. c) Vermikulit, és a mellette 1–5%-ban előforduló, fehér tűs-prizmás természetű amfibolok (winchit, richterit). A képen látható amfibolmennyiséget nagyjából 4 liternyi beépített szigetelésből válogatták ki. d) Zonolitszigetelést bontó munkás 30 perces szálexpozícióját vizsgáló (aktivitás közben vett) levegőminta filter fáziskontrasztos mikroszkópi felvétele, Walton-Beckett számlálómezővel (a háttér a zöld interferenciaszűrőtől zöld). A szabad szemmel nem látható azbesztszálak mellett sok más porszemcse is van a mintában. A képek és az információ forrása:

© Asbestorama – flickr.com

12.3. Erionit (zeolit, Kappadokia, Törökország)

Az erionit egy zeolításvány,⁵ az azbesztekéhez hasonló, azaz azbesztszerű (angolul *asbestiform*) szálas megjelenéssel (12.3.–12.4. ábra). Zeolitokra jellemző üreges szerkezete, abszorpciós és ioncserélőképessége, kémiai (katalitikus) aktivitása miatt egy időben bányászták is, katalizátorként szénhidrogének krakkolására használták. Leggyakrabban vulkáni tufák sós tavakban való átalakulásával keletkezik. Sokszor más zeolitokkal együtt fordul elő, így egy időben más zeolitok bányászata kapcsán bányászok is belélegezhettek porát.

Az 1970-es évek végén figyeltek rá, hogy a törökországi Kappadokia három falujában rendkívül magas volt a mellhártyán és hashártyán előforduló rosszindulatú mezoteliómás megbetegedések száma (Baris & Grandjean, 2006). Kiderült, hogy a helyi lakosság a környéken előforduló vulkáni tufába pincéket vájt, a kivájt kőanyagot pedig építőanyagként

⁵ A zeolításványok állványszilikátok, bennük $[\text{SiO}_4]^{4-}$ (és kisebb részben $[\text{AlO}_4]^{5-}$) tetraéderekből háromdimenziós, negatív töltésű, üreges szerkezetű váz jön létre. Az üregrendszerben kationok és vízmolekulák foglalnak helyet. A zeolításványok a környezetvédelemben és a vegyiparban is fontos szerepet játszanak, velük analóg szerkezetű anyagokat mesterségesen is nagy mennyiségben állítanak elő.

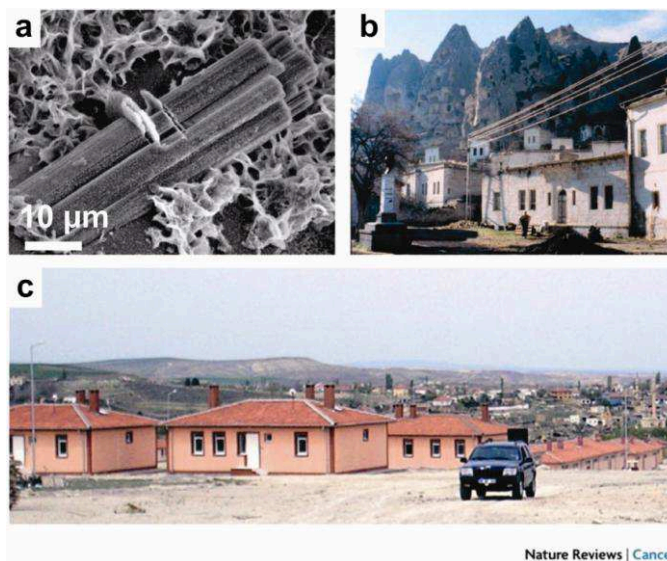
A jelenlegi zeolit nevezéktan (Coombs et al., 1997; magyarul Papp, 1999) az erionit sor általános összetételét így adja meg: $\text{K}_2(\text{Na}, \text{Ca}_{0,5})_8[\text{Al}_{10}\text{Si}_{26}\text{O}_{72}] \times 30\text{H}_2\text{O}^{\text{hex}}$, a soron belül három fajt különít el a domináns kation szerint, ezek az erionit-K, erionit-Na és erionit-Ca.

használta (házépítés). A vulkáni tufában előforduló erionit szálai a levegőbe jutottak, és így a lakosok belélegezték azt (alárendelt mennyiségű tremolit- és krizotilszál mellett).

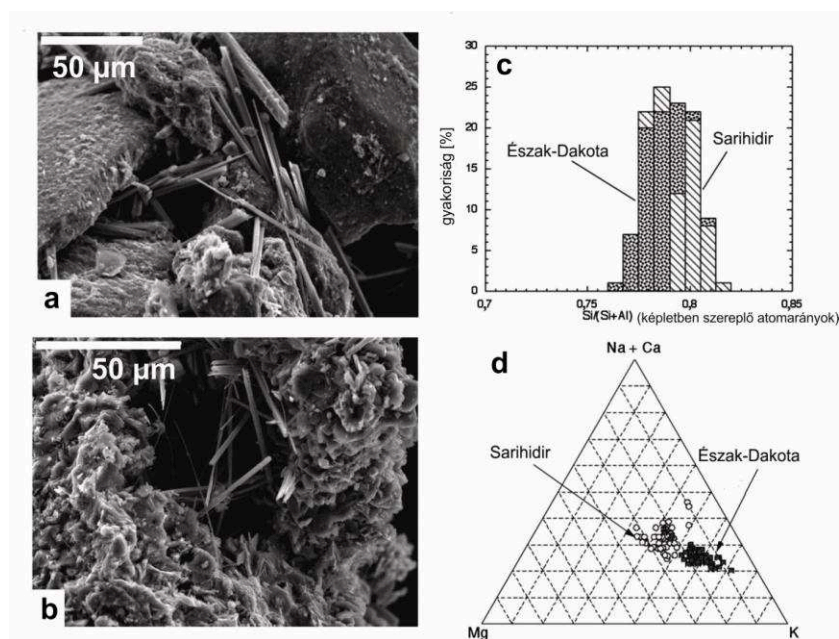
A többnyire azbesztekhez kötődő légúti megbetegedések többsége előfordult a lakosságban: tüdőszöveti fibrózis (kötőszövet szaporodás), mellhártya plakkok, kóros folyadékfelhalmozódás, és a rosszindulatú mell- és hashártyadaganat (mezotelióma). A tüdőben ugyanakkor a leggyakoribb szál az erionit volt, sokszor az azbeszteknel ismertetett vasas fehérjekéreggel bevonva.

Mára az érintett török falvak lakossága elvándorlás miatt megfogyatkozott, az egyik falut pedig áttelepítették, házaikat erionitmentes kőanyagból építve fel. Az erionit környezeti expozíciója tehát súlyosan veszélyeztetheti az egészséget. [Carbone et al. \(2007\)](#) ugyanakkor genetikai fogékonyságot is kimutatott a lakosság bizonyos részében az ásványi szálak okozta megbetegedésekre. Az USA-ban erionittartalmú tufák természetes kibúvása (a kőzet és a rajta képződött talaj), illetve murvás útborításként való akaratlan alkalmazása okoz 2006 óta aggodalmakat, elsősorban Észak-Dakota államban. Az első vizsgálatok szerint ([Carbone et al., 2011](#), [12.4. ábra](#)) a beltéri, kültéri és út melletti, aktivitás alapú északdakotai levegőmintákban a szálkoncentráció összevethető olyan török falvakéval, ahol a lakosok 6,25% mezoteliómában hunyt el. Mezeteliómás megbetegedésekről, illetve ahhoz köthető halálozási arányról Észak-Dakotában egyelőre nincs adat, de továbbra is folynak a vizsgálatok.

Az erionit CAS azonosítója 66733-21-9, az IARC az 1-es kategóriába sorolja (embereknél bizonyítottan rákkeltő, rákkeltő hatás tekintetében nagyságrendekkel rosszabb a legveszélyesebb azbesztfajtánál, a riebeckitazbesztnél is).



12.3. ábra: Erionit – környezeti egészségügyi probléma a törökországi Kappadokiában. a) Erionit szálkötegek pásztázó elektronmikroszkópos felvételen. A szálkötegek átmérője 5 µm, az egyedi szálaké 0,5 µm. b) Karain faluja: a házakat helyi kőzettömbökből építették, a közeli hegyet is alkotó, erionittartalmú vulkáni tufából. c) Téglából és cementből épített házak az új faluban, a háttérben a régi falu háza látszanak. Az új falut az utak aszfaltozása (kiporzás elleni védelem) után vehették csak birtokba a helyi lakosok. A képek forrása: © [Carbone et al. \(2007\)](#): *Nature Reviews Cancer* 7, 147–154. (doi:10.1038/nrc2068)



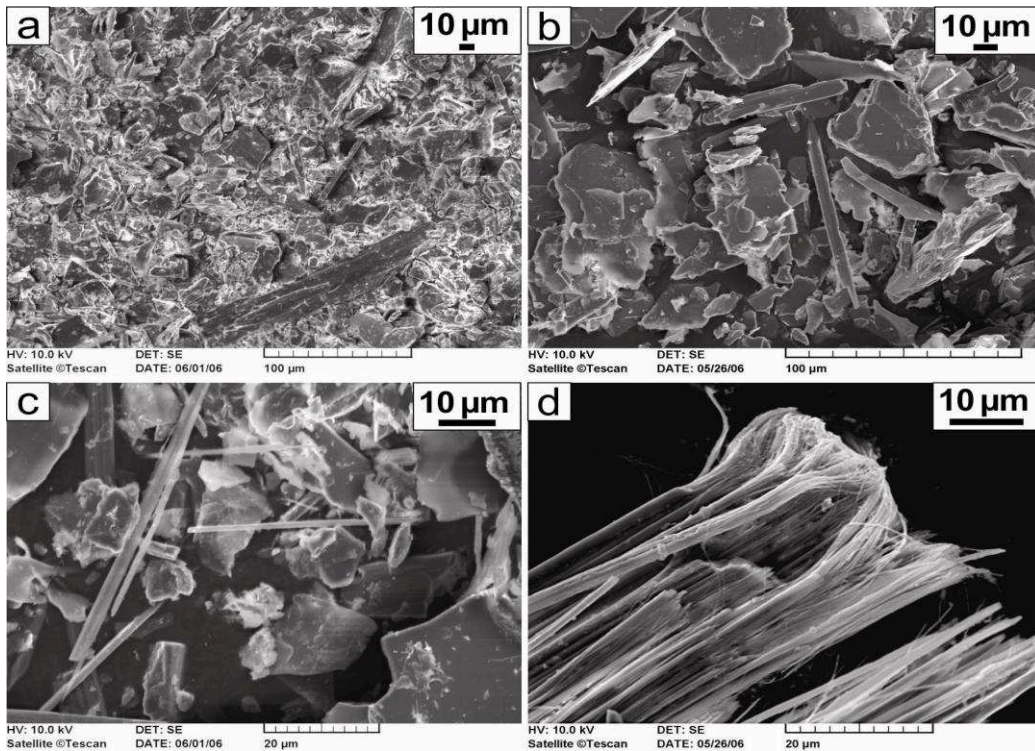
12.4. ábra: Erionit – a kappadokiai (Sarihidir falu, Törökország) és az észak-dakotai (USA) erionit alakú (a-b) és kémiai összehasonlítása (c-d). Pásztyázó elektronmikroszkópos felvételek: a) erionit, Észak-Dakota, b) erionit, Kappadokia. A szálak mérete hasonló, a maximális hossz 50 μm körüli, az átmérő gyakorta kisebb, mint 1 μm . c) A két lelőhely erionitja Si-Al arány tekintetében gyakorlatilag átfed. d) A két erionit a kationtartalmát tekintve kicsit eltér, az észak-dakotai mintákban kissé több a kálium. A képek forrása: [Carbone et al. \(2011\)](http://www.pnas.org/content/108/33/13618), PNAS, 108: 13618–13623.

(<http://www.pnas.org/content/108/33/13618>)

12.4. Akaratlan azbesztalkalmazáshoz kötődő környezeti kockázat (Nem mind azbeszt, ami szerpentin!)

Olykor előfordul, hogy egy ásványi nyersanyagban kis mennyiségben azbesztnek minősített, illetve egészségi problémát jelentő szálás ásványok is jelen vannak. Példa volt erre a vermikulitban levő amfibol, a richterit és a winchit (Libby, Montana, USA), az építőanyagként hasznosított tufában a fluoroedenit (amfibol) vagy az erionit (zeolit).

Magyarországon hasonló azbesztes probléma 2006-ban merült fel. A nyugati határ mentén, egy kis településen útburkolásra a szomszédos Ausztriából, egy szerpentinbányából hoztak zúzott követ. Bár a kőanyag nem volt szálás megjelenésű, esőben állaga kellemetlen volt, bizalmatlanságot ébresztett a lakosságban a közzel szemben. Amikor azután, néhány hét múlva (ami azbesztkitettségek esetén eleve túl rövid idő bármilyen súlyos betegségi szövődmény kialakulásához!) az egyik helyi lakos macskája hirtelen elpusztult, bevizsgáltatták a kőzetet egy hivatalos általános anyagvizsgálati laboratóriummal. Itt megállapították, hogy a minták „43% krizotilt” és a környezeti határértéket meghaladó mennyiségű nikkelt és krómot tartalmaznak. Az adatok (magas azbeszt- és nehézfém-tartalom) lakossági hisztériához vezettek.



12.5. ábra: Pásztázó elektronmikroszkópos felvételek (szekunder elektronképek) a nyugat-magyarországi településen lerakott, szerpentinít anyagú útalapból. a) A közettörmelék jellegzetes áttekintő képe: kevés oszlopos szemcsé, a szemcsék többsége nem mutat nyúlt vagy szálas alakot. b) Oszlopos szemcsék, hasadási szilánkok vagy kristálytöredékek, melyek átmérője meghaladja a szálátmért felső korlátját ($5\ \mu\text{m}$). c) Tűs kristályok, amelyek megfelelnek a morfológiai száldefiníciónak ($d < 3\ \mu\text{m}$, $l > 5\ \mu\text{m}$; $l:d \geq 3 > 1$). d) Valódi krizotilazbeszt szálköteg részlete. A tipikus szálátmért nagyságrendileg $0,1\ \mu\text{m}$, az elhajló szálvég a krizotilazbeszt sajátossága. Csak alárendelten volt jelen a vizsgált mintákban. Pekker Péter felvételei

A célzott szakértelmet és megfelelő komplex műszerparkot felhasználó környezeti ásványtani újvizsgálat során kiderült, hogy a „43% krizotil” helyett valójában kb. ugyanennyi nem szálas szerpentinásvány alkotja a kőzetet (12.5.a-b. ábra). Olykor tűs szemcsék (12.5.c. ábra), és szálas, azbesztszerű krizotil (12.5.d. ábra) is megjelennek egyes mintákban, de csak alárendelten. A kapott ásványtani és geokémiai eredmények általában jellemzők a főként szerpentinásványokból álló természetes szerpentinít kőzetre, amelyen falvak és városok százai állnak az Alpokban, minden különösebb környezeti kockázat nélkül. (Megjegyzendő, hogy a nikkel és a króm kötött formában, az élőlények számára nem felvehető módon van jelen itt.)

A kapott adatok megnyugtatták a lakosságot, az önkormányzatot. Nem kellett jelentős forrásokat felhasználni az útburkolat teljes cseréjére. Az azbesztszálakat tartalmazó burkolati részeknél megmérték a levegőbe kerülő szálkonzentrációt, amely jóval a hazai környezeti határérték ($0,001\ \text{rost}/\text{cm}^3$) alatt volt. Ennek ellenére, a biztonság kedvéért, előírták, hogy még több évig évente többször mérni kell a levegő száltartalmát (monitorozás), és a lakosság megnyugtatósára egyes részekben előre hozták a későbbi évekre tervezett kiporzás elleni védőréteg megépítését.

Ez az eset is jelzi, hogy szerpentinásványok esetében nem kerülhető meg a szerpentin csoporton belüli pontos, ásványfaj szintű azonosítás (szerkezeti információ; XRD/SAED) és a pontos alakú információ (SEM/TEM) megszerzése, csak így mérhetjük fel a valódi azbesztkockázatot.

13. Azbesztelőfordulások környezeti kockázata (Esettanulmányok 3.)

A nagy azbesztelőfordulások kevés, viszonylag jól behatárolható geológiai folyamathoz kötődnek. A leggyakrabban alkalmazott, és leginkább veszélyes amfibolazbesztek, a riebeckitazbeszt (kékazbeszt, krokidolit) és a grunerit (barnaazbeszt, amozit) nagy tömegben több milliárd éves, sávos vasércformációkban (angolul *banded iron formation*, röviden *BIF*) fordulnak elő, ezekből bányászták őket Afrikában és Ausztráliában. A *BIF*-eket létrehozó geológiai folyamatok csak a Föld történetének korai szakaszára voltak jellemzők.

A krizotil- és a tremolitazbeszt leggyakrabban óceáni kéregdarab-maradványokban, úgynevezett ofiolitokban fordul elő. Ilyen ofiolitok minden nagy hegységképződési folyamatban keletkezhetnek, Magyarország környezetében jelen vannak az Alpokban, a Kárpátok egyes részein és a Dinaridákban is. Magyarország szerencsés helyzetben van, kockázatot jelentő azbesztelőfordulás ugyanis nincs hazánkban.

Az azbesztet tartalmazó kőzetek sokszor kibukkannak a felszínre, ilyenkor a víz és a szél, a fagy felszínpusztító, erodáló hatása aprózhatja a kőzetet, szabaddá teheti a szálakat, melyek bekerülhetnek a levegőbe, a talajba és a vizekbe is. Az ember életterének kialakításával, energia- és nyersanyagigényei kielégítésével olykor igen nagy léptékben alakítja a felszínt (néhány négyzetmétertől a több négyzetkilométerig), és közben bolygathatja, feltárhatja az azbeszt-tartalmú kőzeteket, fokozva a szálak kiszabadulásának esélyét. Erre példa lehet útépitéskor a friss útbevágás, a házépítés, ahol a sziklákba belevágnak, víztározók építése a hegyekben, de akár a mezőgazdasági tevékenység, vagy az erdőirtás is, amelynek nyomán esetleg erodálódik a talajréteg, és a felszínre kerül az alapkőzet. Az élővilágra és az emberre a kockázatot leginkább a levegőbe kerülő azbesztrostok jelentik. A környezeti azbeszt-kockázat elkerülésének legegyszerűbb módja, ha az ember nem él ilyen területen. Nyilvánvaló, hogy ez a fajta környezettudatosság korábban nem létezett, és ezért a meglevő, problémás emberi életterekben, pl. több száz éves hegyi falvaknál a kockázatot fel kell mérni, és lehetőség szerint minimalizálni kell. Lakott területen célszerű a kitett, erodálódó kőzet-felszínnek talajréteggel, esetleg más anyagú kőzettörmelékekkel, betonnal való takarása.

13.1 Példák az Egyesült Államokból: a Sumas-folyó völgye (Északi-Kaszád-hegység, Washington állam, USA)

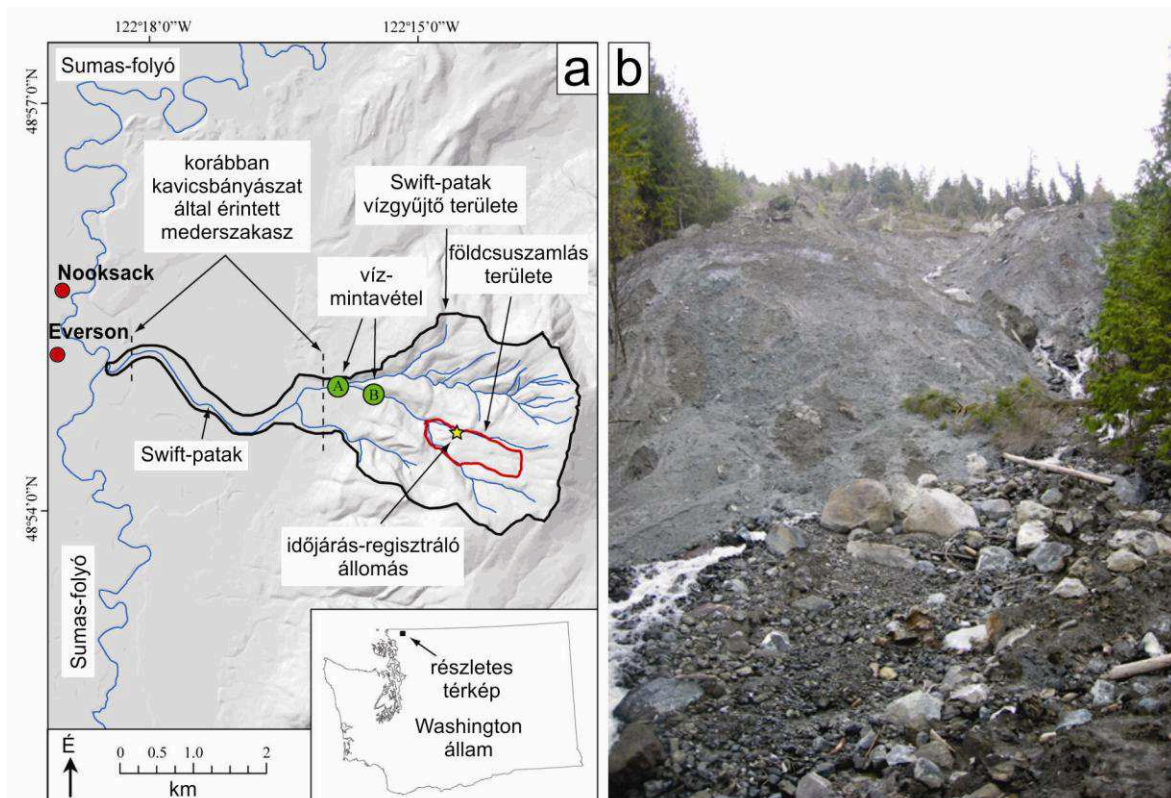
Az Amerikai Egyesült Államokban az azbesztelőfordulások környezeti kockázatának, csakúgy, mint az azbeszt egészségi kockázatának, sokkal inkább tudatában vannak az emberek. Sokkal nagyobb az azbesztek övező hisztéria, hírverés, és a kutatásokba, mentesítésbe ölt pénz is, úgy a beépített azbeszt, mint a természetes előfordulások esetében. Igaz, hogy az USA keleti és nyugati oldalán végighúzó, óriási hegláncok miatt sok a főként óceáni kéreg eredetű, magmás vagy metamorf kőzettest, ezek az USA területének mintegy harmadán a felszínen vannak ([Lee et al., 2008](#); [Strohmeier et al., 2010](#)). Állandó érdeklődés és vizsgálatok, illetve olykor óriási összegeket felemésztő rehabilitáció tárgyát képezik a nyugati hegyvonulatban El Dorado megye (Kalifornia állam), New Idria (Kalifornia állam), Libby (Montana állam), illetve újabban a Sumas-hegy és a Sumas-folyó völgye (Washington állam). Amfiboloknál a pusztán mérethatárokat figyelembe vevő megközelítés, a hasadási szilánkok és tényleges azbesztszálak elkülönítése nélkül, dollármilliárdokat jelenthet a környezeti kockázat felmérésében és a környezeti rehabilitációban (egész iskolákat képesek átköltöztetni, újraépíteni vélt azbesztkockázat kapcsán).

A részletesebben ismertető Sumas-hegy és környéke bányászattól nem érintett terület, itt geológiai és klimatikus hatások együttese vezetett az azbesztet tartalmazó kőzetek foko-

zott kibúvásához, eróziójához. A Sumas-hegy az USA északnyugati peremén, Washington államban található, a kanadai határ közelében.

A Sumas-hegy az Északi-Kaskád-hegység nyugati frontján elhelyezkedő gerinc, kb. 1000 m magas, nyugati oldalán a Swift-patak gyűjti a vizet, amely a Sumas-folyóba torkollik (13.1. ábra). Az Északi-Kaskád-hegységet áttolódott kéregdarabok, többek között óceáni kéregdarabok, szerpentinitesedett ultrabázikus kőzetek alkotják. Ilyen, tektonikusan elnyírt, gyengített szerpentinitből áll a Sumas-hegy nyugati oldala is. Az Északi-Kaskád-hegység magasabb hegycsúcsain ma is található gleccserek, ezért nyilvánvaló, hogy a Sumas-hegy kőzeteit is érte a jégkorszakban a gleccserek általi erózió. A felszínen mozgó jég törte, maga alá gyűrte, maga alatt vonszolta, illetve jégbe fagyva szállította a kőzettörmelékeket. A jég felszínpusztító munkájának eredménye az osztályozatlan jégüledék vagy till, amely változó szemcseméretű, az agyagfinomságú szemcséktől a durva kőgörgöttegig mindenféle méretű, főként szerpentinit anyagú kőzettörmelék tartalmazhat. A till a hegy lábánál és oldalán halmozódott fel, gyengített felszín alakítva ki. A Sumas-hegy az óceán felől érkező nedves légtömegek útjában az első hegyvonulat, ezért a hegy nyugati oldalán rendszeres a felhő- és csapadékképződés, a lefolyó vizek pedig erősítik az eróziót.

A hegyet felépítő, lemezmozgások által gyengített, elnyírt, meredek dőlésű szerpentiniten tehát a jégerózió hatására instabil törmelékletű keletkezett, amelyen a mai csapadékos klíma hatására földcsuszamlásnak kedvező körülmények jöttek létre.



13.1. ábra: A Sumas-hegy nyugati oldalán található földcsuszamlás földrajzi elhelyezkedése (a) és a földcsuszamlás talpa (b). A 2010-es népszámlálás adatai szerint a legközelebbi két település, Nooksack és Everson lakossága 1338 fő, illetve 2481 fő, tehát legkevesebb 3800 főt érint a környezeti probléma.

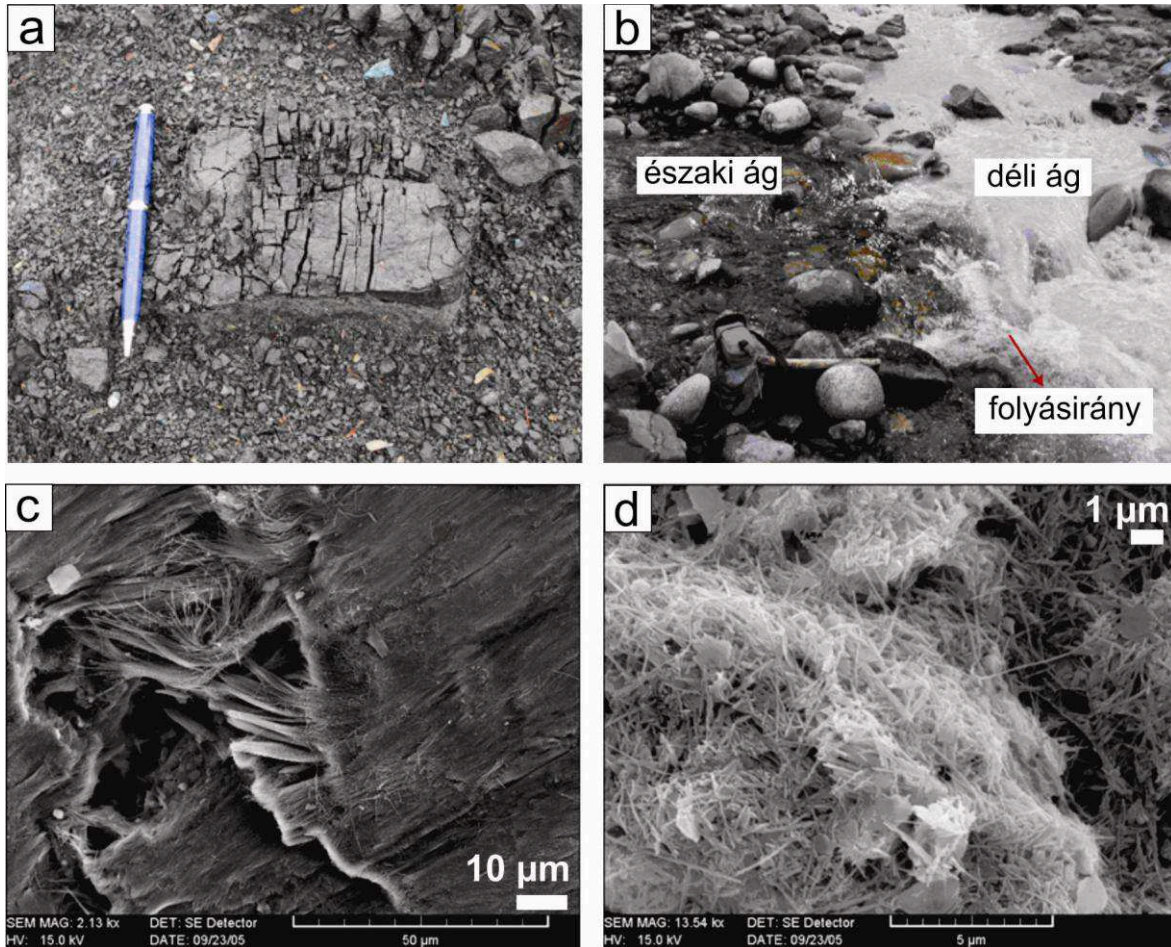
Forrás: Scott Linneman (<http://serc.carleton.edu/vignettes/collection/25472.html>)

Az 1930-as években a heves esőzések miatt a Swift-patak elmosta egy idős földcsuszamlás törmelékét, amely újraindította a földcsuszamlást. Jelenleg egy kb. 1,5 km×0,5 km-es területen csúszik a törmelék, évi 4,5–5 m-es lejtőirányú elmozdulással. A mozgást jól szemlélteti a Western Washington University Landscape Observatory (<http://landslide.geol.wvu.edu/>) által 2,5 éven keresztül rögzített fotókból készült video (<http://www.wvu.edu/landscapeobservatory/landslideCam.shtml>; **1. animáció**). A csúszás következtében évente több mint 91 000 m³ törmelék¹ mos el a Swift-patak. A hordalék eléri a Sumas-folyót, és áradáskor szétterül a folyóparti lakott, illetve mezőgazdasági művelés alatt álló területeken. A Swift-patak medrét régebben rendszeresen kotorták, hogy megakadályozzák az árvizeket. A hordalék azbeszttartalma (**13.2. ábra**) miatt azonban felhagytak a kotrással. 2009 januárjában a Sumas-folyó megáradt, és házak pincéit öntötte el, üledékplett borított az ártérben levő telkekre, mezőgazdasági területekre. Az üledékben természetesen azbeszt is van: 2009 májusában a Sumas-folyó parti üledékeiben mért legmagasabb azbesztkoncentráció 25% volt, a Swift-patakban a szálkoncentráció 1200–1500 millió rost/l, a Sumas-folyóban 60–880 millió rost/l volt (Wroble, 2011). Az azbeszt döntően krizotil, de néhány helyen, igen alárendelt mennyiségben aktinolitot is találtak.



1. animáció: A Sumas-hegy lejtőtörmelékének mozgása, 2,5 éven keresztül naponta készült fényképek sorozatából készített animáció. A "Data missing" (azaz hiányzó adatok) felirat a téli, hóval borított időszakot jelzi. Jól látható, hogy a teljes talajtakaró és a növényzet is csúszik lefelé a lejtőn. Forrás: Western Washington University Landscape Observatory

¹ Ez a térfogat egy kb. 45 m élhosszúságú kocka térfogata, nagyjából megegyezik az ELTE TTK lágymányosi déli tömbjének térfogatával.

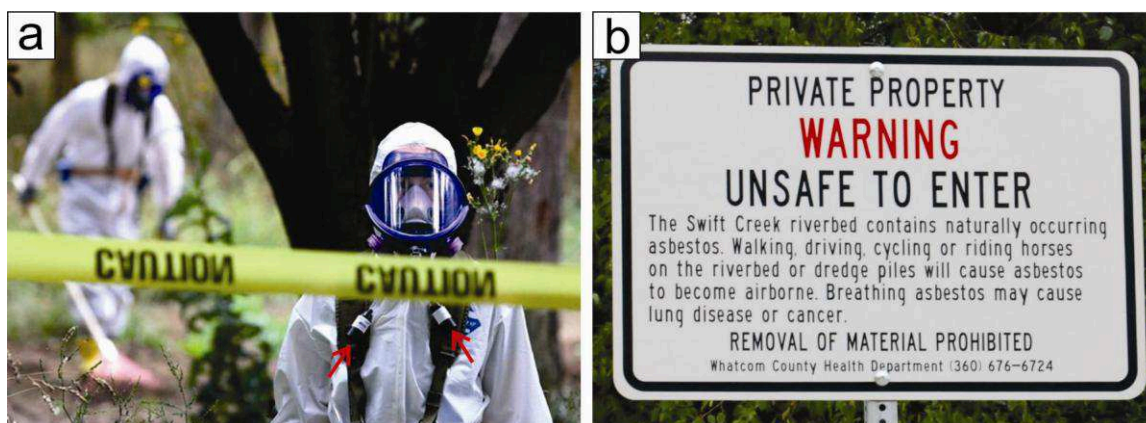


13.2. ábra: a) Málló szerpentinittömb friss földcsuszamlás üledékben. b) A Swift-patak két ágának összefolyása, a déli ág a törmelékfolyás erodált anyagától zavaros. Málló szerpentiniszemcse (c), és főként krizotil szálkötegekből álló agyag szemcseméretű üledék a patakágyból (d), pásztázó elektronmikroszkópos felvételek (visszaszórt elektronkép).

Forrás: Scott Linneman (<http://serc.carleton.edu/vignettes/collection/25472.html>)

Az erózió nyomán tehát az azbesztszál-koncentráció megnő a folyóvízben, a folyó üledékeiben, az azzal keveredő talajban, az üledék száradása és kiporzása nyomán pedig a levegőben is lehet szálkoncentráció-növekedésre számítani. Másfél évvel az áradást követően a vizek szálkoncentrációja jelentősen csökkent, 10 millió rost/l alá (két nagyságrenddel kisebb, mint az áradás után). Az ártéri üledékek azbeszttartalma 10–15% volt. A levegőt kétféleképp mintázták: álló (stacionárius) mintavevővel, illetve a helyi emberek szabadtéri tevékenységeit (pl. kertészkedés) modellezve.² Az aktivitás-alapú levegőmintázás (13.3. ábra) mindig magasabb koncentrációt eredményezett, mint a stacionárius. A folyó által terített üledék mozgatása, áthelyezése (összegyűjtés, kocsira rakás, lerakás, szétterítés) közben a mért szálkoncentráció ($1\text{--}2\text{ rost/cm}^3$) meghaladta az USA-ban engedélyezett határértéket ($0,1\text{ rost/cm}^3$), a többi tevékenység (séta, gereblyezés, fűnyírás) nem eredményezett határértéket túllépő azbesztexpozíciót.

² Ez a mintavételezési módszer angolul *activity based sampling*, röviden *ABS*.



13.3. ábra: a) Hatásvadász sajtóillusztráció: elhatároló sárga műanyagszalag mögött az USA környezetvédelmi hivatalának munkatársai végeznek aktivitás alapú levegőmintázást, valahol a Sumas-folyó mentén. A szakemberek teljes azbeszt elleni védőöltözetben vannak, piros nyilak jelzik a levegő mintavevő filtert. A háttérben az azbesztes talajon végzett gereblyezés közbeni azbesztexpozíciót tesztelik. Forrás: Ken Lambert (The Seattle Times). b) A kiporzással járó egészségi kockázatra figyelmeztető tábla. Szövege: „Magántulajdon. Vigyázat! A belépés nem biztonságos. A Swift-patak ágya természetes azbesztet tartalmaz. A patakágyon, illetve a kotort üledékhalmokon járás, autózás, kerékpározás és lovaglás azbesztszálak levegőbe jutását eredményezi. Az azbeszt belélegzése tüdőbetegséget vagy rákot okoz. Az anyag (értsd: törmelék, hordalék, talaj) eltávolítása tilos. Whatcom megye Egészségügyi Hatósága” Forrás: Ezekiel Hugh

West és Patrick (2010) a lakosság megbetegedési statisztikáit is tanulmányozták: 12 400 érintett lakos adatait alapul véve (2000-es népszámlálási adatok alapján), az 1992–2006 között diagnosztizált tüdő- és hörgőrák, valamint mezotelióma megbetegedéseket vizsgálták. A megbetegedések gyakorisága kisebb volt az államra és az USA-ra jellemző átlagnál, azaz a megbetegedési statisztikákban nem volt érzékelhető a környezeti expozíció hatása (a lakosság alacsony száma miatt az eredményben lehet némi bizonytalanság).

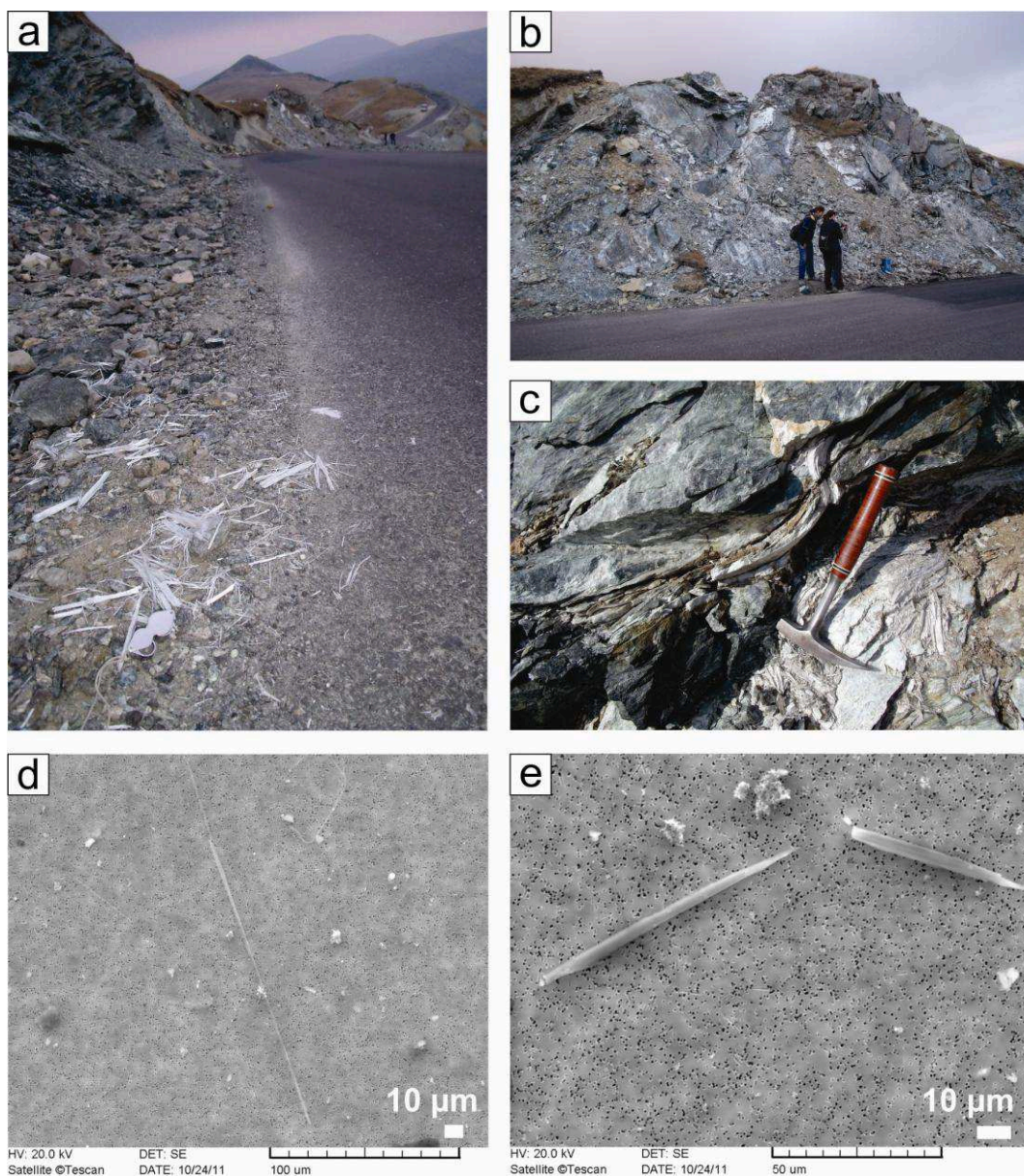
A 2006–2010 időszak mérési eredményeinek (Wroble, 2011) ismeretében a lakosságot arra biztatják, hogy áradáskor a lehetőségekhez mérten akadályozzák meg az üledék földjükre jutását. Az esetlegesen a telekre jutott üledék takarását tiszta földdel, porzást akadályozó vastagságban javasolják. Ha az üledék eltávolítása, mozgatása elkerülhetetlen, azt csak nedves állapotban javasolják, a porképződés csökkentése céljából, és megfelelő légzésvédő maszkok alkalmazása mellett. A házak elszennyeződése esetén akkreditált azbesztmentesítők igénybevételét javasolják a lakosságnak. Az eddigi vizsgálatok szerint tehát, ha a szabadtéri tevékenységeknél a porképződést visszaszorítják, és a folyóüledékeket a lehető legkisebb mértékben mozgatják, nem okoz komoly egészségi kockázatot a lakosságnak az azbesztexpozíció a Sumas-folyó völgyében. A porképződés egészségi kockázatára táblákkal hívják fel a figyelmet (13.3.b. ábra). Példánk arra is rámutat, hogy még az ártéri üledékek is hordozhatnak környezeti kockázatot.

13.2. Szerpentinút a Páring-hegységben (Románia)

Romániában, a Páring-hegység gerincén keresztül 2009 körül építettek autótutat (Transalpina, 67C jelzésű hegyi szerpentin, 13.4–13.6. ábra). A hágó tetején, ahol a turisták megállnak, hogy körülnézzenek a legmagasabb pontról, a hegységet részben alkotó, óceáni aljzat eredetű (ofiolit) átalakult bázikus kőzetek a felszínen vannak. Az útépítés során bolygatták is a felszínt, belemartak a kőzetekbe.



13.4. ábra: a) A romániai Páring-hegység gerince és a rajta átvezető Transalpina út (67c). Az út piros négyzettel kiemelt része 2000 m tengerszint feletti magasságban húzódik. A gerinc kopár, csak havasi gyepek borítják. b) Az a) ábrán piros téglalappal kiemelt útrészlet, dél felől fényképezve. Látható az útépítés során a kőzetfelszínbe vágott nyomvonal, a kibukkanó szürkészöld, fedetlen kőzetfelszín és az út aszfaltcsíkja alatt a kőzettörmelék feltöltés. Az 1-es pontot (piros pöttyözött vonal jelzi a szálas ásványok hozzávetőleges elterjedését az útbevágásban) a [13.5.](#), a 2-es pontot a [13.6. ábra](#) ismerteti részletesen. Forrás: a) maps.google.com, b) Grozdics Tibor felvételei



13.5. ábra: Útbevágás a Páring-hegység gerincén (13.4. ábra, 1-es pont), tremolitazbeszt kibúvással. a) Keleti irányba néző felvétel az útról, az út szélén az erózió nyomán kiszabadult 5–8 cm hosszú, fehér tremolitazbeszt kötegek. Léptékként a geológusok és környezettudományi szakemberek egyik segédeszköze, a kézi nagyító (lupe) szolgál, ennek hossza kb. 5 cm. b) Közelkép az útbevágásról, méréshez előkészített levegő mintavételezővel (kék készülék). A szürkészöld kőzet szerpentin, a sokszor hajladozó lefutású repedéseket kitöltő fehér anyag a tremolitazbeszt. c) Fehér tremolitazbeszt repedéskitöltés közelről: a szálak hossz tengelye közel párhuzamos, illetve kis szöveget zár be a repedés falával, a szakirodalom az ilyen elhelyezkedésű szálakat hosszanti szálnak (angolul slip-fibre) nevezi. Lépték a kb. 32 cm hosszú geológuskalapács. d-e) Pásztázó elektronmikroszkópos felvételek (szekunder elektronkép) az arany levegőfilteren felfogott szemcsékről – a mintavétel helyét a b) ábra mutatja. d) Majdnem 0,2 mm=200 µm hosszú, 1,7 µm átmérőjű, kb. 100 hossz:átmérő aránnyal jellemezhető amfibolazbeszt szál (tremolit). A szál egyértelműen azbeszt méretekkel rendelkezik. e) Két, hengeresnek tűnő, tús tremolitszemcse. Méretüket tekintve nem azbesztek: hosszuk 85 és 55 µm, legnagyobb átmérőjük kb. 5 µm, hossz:átmérő arányuk 17 és 11. Alakjuk a hasadási idom és az azbesztszál közötti. A nagyobb tű bal alsó végén ugyanakkor mintha azbesztszál foszlana le. Fotók: a-c): Tóth Erzsébet, d-e): Bendő Zsolt

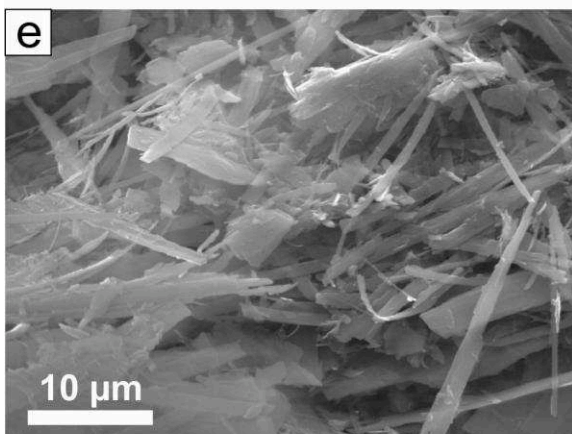
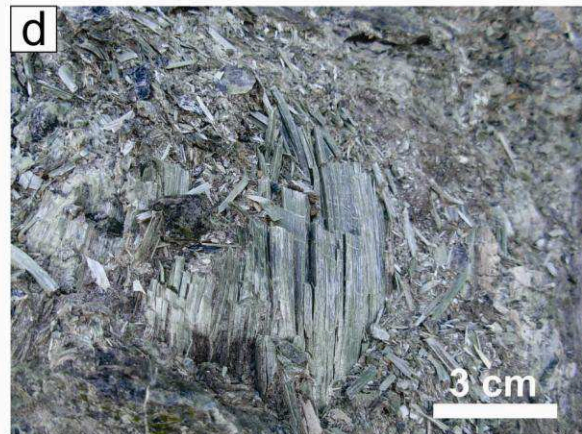
A szerpentinittestek frissen feltárt repedéseit olykor akár 10 cm hosszúságot is meghaladó, látványos, fehér, szálás azbeszt tölti ki, amely az első tájékozódó ásványtani vizsgálatok szerint tremolit ([13.5. ábra](#)). Sokszor maga a szerpentin is szálás habitusú, illetve szálasan/lécesen mállik, az első vizsgálatok szerint azonban ez a szerpentin nem krizotil, hanem antigorit ([13.6. ábra](#)). Az antigoritlécek rövidebbek, kevésbé látványosak, ugyanakkor többnyire megfelelnek a szál alaki definíciójának ([13.6.e. ábra](#)). Az antigorit feltehetőleg gyakoribb is a területen: míg a hosszú fehér tremolit nagyobb kőzetrepedésekhez, csúszási felületekhez kötődik, az antigorit olykor egész kőzetblokkokat átjár. A lécek az aprózódás nyomán a levegőbe is bekerülnek a szeles, kitett hegytetőn. [Cardile et al. \(2007\)](#) in vitro kísérletekkel a szálás antigorit sejtkárosító hatását mutatta ki, így elképzelhető, hogy az antigorit belélegzéséhez is társulhat egészségi kockázat a hegygerincen.

A szerpentinittőzeten kialakult talaj olykor nem más, mint szerpentin-szal-szövedék ([13.6. ábra](#)), amelyet magashegységi sziklagyep borít be. A szívós gyep akadályozza a szálak kiszabadulását, ezért a területen ajánlott minden olyan tevékenység mellőzése, amely e vékony, érzékeny védelmi vonal, a gyep és a talajréteg pusztulását idézheti elő (építkezés).

Komoly egészségi kockázatról az első vizsgálatok alapján tehát valószínűleg nincs szó, mivel egyrészt kicsi a bolygatott és erodálódó kőzetfelszín (max. néhány száz négyzetméter), másrészt a gerinc környéke nem állandó lakóhely és nem állandó munkahely. Az útépítők és -karbantartók, illetve a legeltető juhászok töltenek csak hosszabb időt a területen, a turisták 10–20 percnél hosszabb időre nemigen állnak meg.

A környezeti kockázat reális felméréséhez a jövőben mindenképp szükséges az azbeszt-tartalmú, kibúvó kőzetfelszínnek pontos feltérképezése, az azbesztek pontos azonosítása (a szerpentin és amfibolazbeszt elterjedésének mennyiségi térképezése), az esetleges szálterjedési irányok meghatározása (szélirány, vízfolyási irányok), az erózió intenzitásának felmérése, és a levegő száltartalmának meghatározása (különböző időjárási viszonyok mellett). Nagyobb kockázat esetén szükség lehet legalább az út mentén az azbesztes kőzetkibúvások tartós takarására (pl. beton, rakott kőfal), valamint az azbesztre figyelmeztető jelzés kihelyezésére.

13.6. ábra (a következő oldalon): a) Vizesés a Páring-hegység gerincén ([13.4. ábra](#), 2-es pont), szerpentin kőzetkibúvással. b) A szerpentin sokszor szilánkosan aprózódik. c) A szilánkos aprózódás oka sok esetben a kőzetet átjáró repedés, amelyet a repedésre merőlegesen rostozott, még nem azbeszt megjelenésű, tömött szerpentin (jelen esetben antigorit) tölt ki. d) Halványzöld, szilánkosan aprózódó, repedéskitöltő szerpentin, még nem szálás málladék. e) Léces antigorit pásztázó elektronmikroszkópos felvétele (szekunder elektronkép). A lécek többsége alakját tekintve megfelel az azbesztszal alaki kritériumának. f) Szálgazdag kőzetmálladék, talajkezdemény, anyaga szálás antigorit, klorit, némi kvarc és nyomnyi tremolit. Fotók: a) és c) Hargitai Anna, b) és f) Tóth Erzsébet, d) Grozdics Tibor, e) Bendő Zsolt



HV: 20.0 kV
Satellite ©Tescan
DET: SE
DATE: 01/10/12
20 μm



14. Az azbesztbányászat és a felhagyott azbesztbányák környezeti kockázata (Esettanulmányok 4.)

Az azbesztbányászat célja természetesen az azbesztszálak kinyerése, ilyenkor a megbontott kőzetfelszín és a feldolgozás után hegyekben álló kőzetőrlemény, a meddőhányó, illetve az azbesztőrlő malom pora a bányászat helyszínén maradó kiemelt szálforrások.

Manapság bányanyitáskor, legalábbis a fejlett országokban, a bányászati terv mellett kétszen kell lenni a rekultivációs tervnek is, amely a terület bányászat utáni rendezéséről, a környezet eredetihez lehetőleg hasonló állapotba hozásáról szól. A bányászat ideje alatt a bányászat bevételéből származó összeg törvényileg meghatározott részét a majdani rekultivációra kell elkülöníteni.

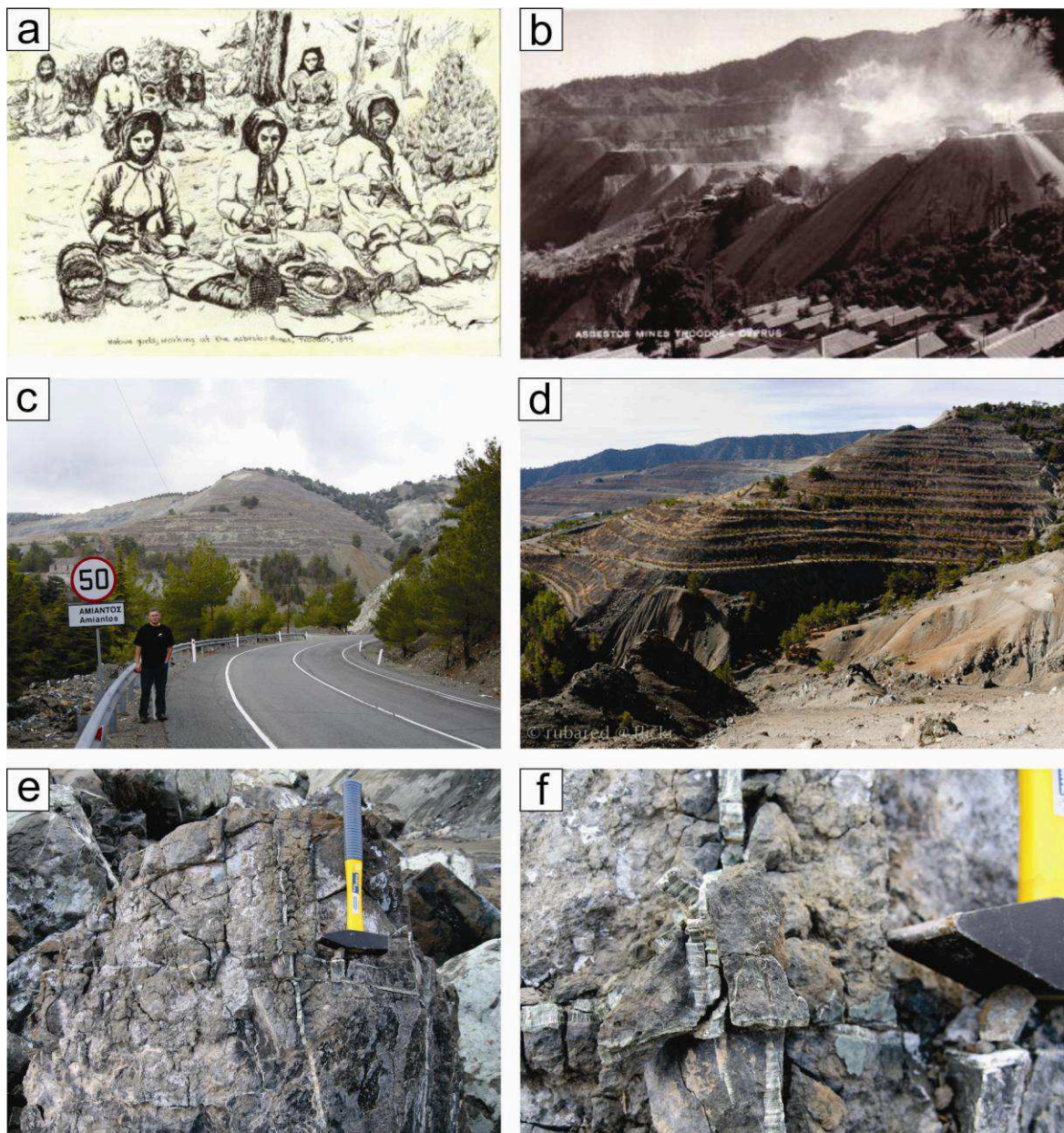
Az azbeszt bányászata a 20. század első kétharmadában élte virágkorát, amikor még sem a bányászok (és feldolgozók) munkakörülményeire, sem a környezetvédelmi szempontokra nem voltak tekintettel.

Ez a környezet szempontjából azt jelenti, hogy a bányászat folyamán nem vettek figyelembe környezeti szempontokat, a kitermelés tervezésénél nem tartották szem előtt a terület majdani rekultivációját, és nem tettek félre meghatározott összeget a bányászat bevételéből a rekultivációra. Jelenleg az azbesztbányászat visszaszorulóban van, többnyire fejlődő országokban, illetve néhány fejlett országban (pl. Kanada) folyik a termelés, és a bányák többnyire krizotilazbesztet fejtenek. Sok a felhagyott bánya, a bányacégek gyakran jogutód nélkül szűntek meg, és így a rekultiváció sok esetben az államra hárul.

A bányászat, felszíni bányászat esetén, nagy felületen feltárta az azbesztet tartalmazó kőzeteket. A legtöbbször helyben történő feldolgozás során az azbesztszálakat tartalmazó kőzeteket összetörték a szálak kinyerése céljából. A visszamaradó kőzetőrlemény, a meddőhányók anyaga, sokszor még több százaléknyi azbesztszálakat tartalmaz a feldolgozás hatékonyságától függően. A meddőhányók sokszor hegyekben állnak, hatalmas szabad felülettel. Az őrleményből a szálak könnyebben kiszabadulnak, mint a masszív, bolygatatlan kőzetből. Maga a kőzetőrlemény egyébként kémiai szempontból semleges, kockázatot nem hordozó anyag, nem oldódhatnak ki belőle nehézfémek, és nem okoz savasodást, mint például egy szulfidos ércbányászat meddőhányója. A bányászat környezeti hatása tehát abban áll, hogy az azbesztszálak környezetbe (levegőbe, vízbe) jutását elősegíti, egyrészt az azbeszttartalmú kőzetek felszíni bolygatásával, másrészt a meddőhányók és az azbesztőrlő malmok pora révén.

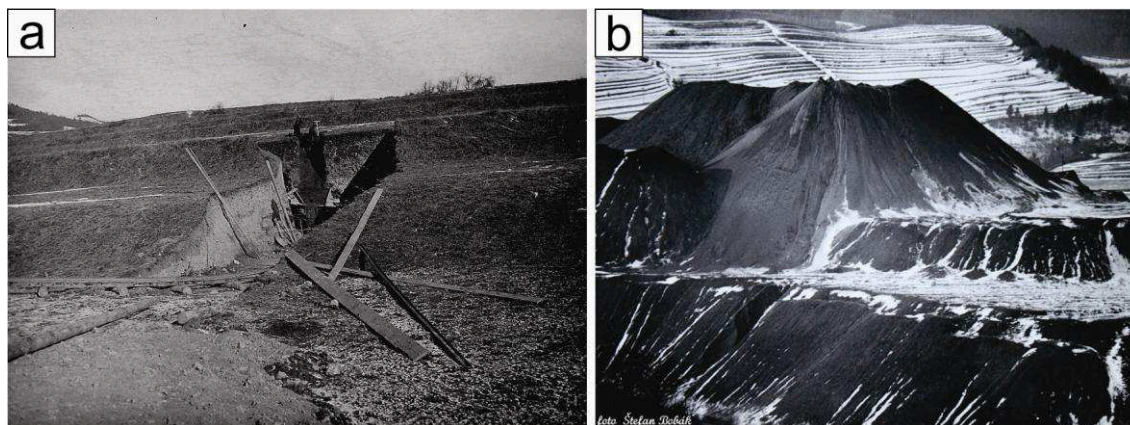
A felhagyott bányák környezeti kockázatát illetően egyelőre kevés adat áll rendelkezésre, a legfontosabb feladat, hogy az azbesztszálak levegőbe és vízbe jutásának mértékét megismerjük, és lehetőség szerint megakadályozzuk. Kevés az arra vonatkozó adat, hogy a dúsított felszíni előfordulás mekkora szálkoncentrációt okoz a levegőben illetve a területen átfolyó/lefolyó vizekben. Az azbesztszálak környezetbe jutását legegyszerűbben mechanikai takarással akadályozhatjuk meg, a meddőhányók anyagának elterítésével (a meredek, erózióknak kitett részsűk lejtésének csökkentésével), talaj- és növénytakaró kialakításával.

Európában nagyobb szerpentinazbeszt bányák Olaszországban (Casale Monferrato, az Alpok nyugati végénél), Cipruson (a Troodos-hegységben, Amiantos, [14.1. ábra](#)), Franciaországban (Korzikán), és Görögországban (Zidani) voltak. A ciprusi bánya rekultivációja előrehaladott állapotban van, a görögországi bányában német együttműködéssel, európai projekt keretében (www.asbestmine.org) indult meg a terület azbesztmentesítése.



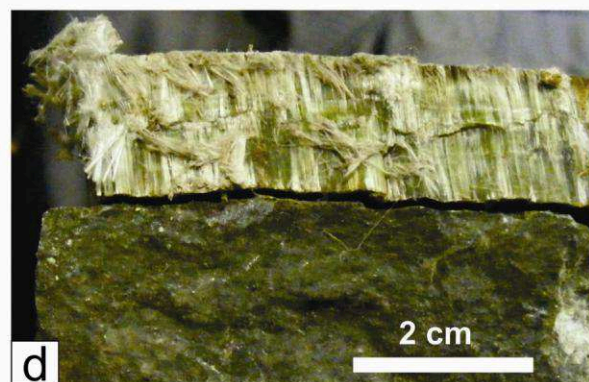
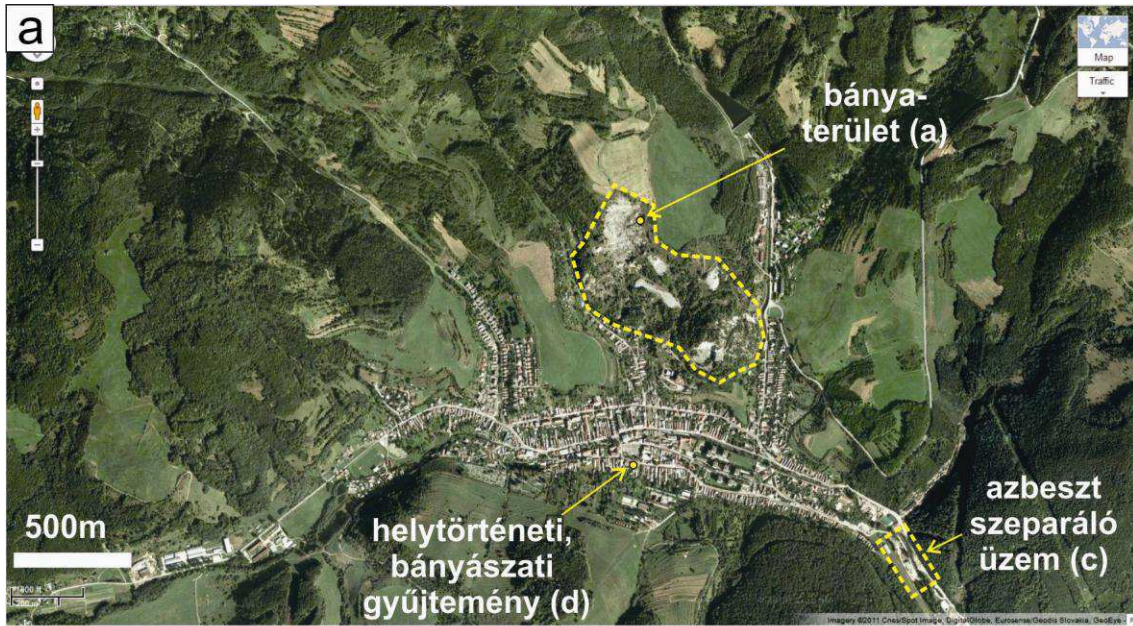
14.1. ábra: Azbesztbányászat Cipruson. Ross & Nolan (2003) összegzi a bányászatra utaló korai forrásokat, eszerint a ciprusi ofiolit övhöz (Troodos-hegység) kötődően már akár 5000 éve is bányászhattak azbesztet. Az Amiantos melletti hatalmas bánya 1904–88 között működött, 130 millió tonna kőzetből 1 millió tonna krizotilazbesztet termeltek ki. a) 1899-es illusztráció, nők kalapáccsal fejtik ki az azbesztet a kőzetrepedésekből. b) A bánya működés közben, láthatóan poros munkakörülmények uralkodtak. c) A tankönyv egyik szerzője, Weiszburg Tamás az azbeszt jelentésű Amiantos helységnévtábla mellett 2007 tavaszán. Ekkor a bányarekultivációs munkálatok még a tereprendezésnél tartottak: a háttérben látható meddőhányók oldalának lejtését teraszok kialakításával csökkentették. e) Nagyjából ugyanaz a meddőhányó 2010 őszén: a teraszokra növényzetet telepítettek, de még mindig vannak takaratlan, meredek törmelékfelszínek. e-f) Közelkép az azbeszt anyakőzetéről: a töredezett kőzet repedéseit keresztshálas (cross-fiber) azbeszt tölti ki, amely vizes oldatból kristályosodott, a repedések kinyílásakor, a kinyílás irányában, a repedés falára merőlegesen nőttek az azbesztszálak. Fotók: c), e-f): Weiszburg Tamás; d) Robert Fitzjohn © 2011

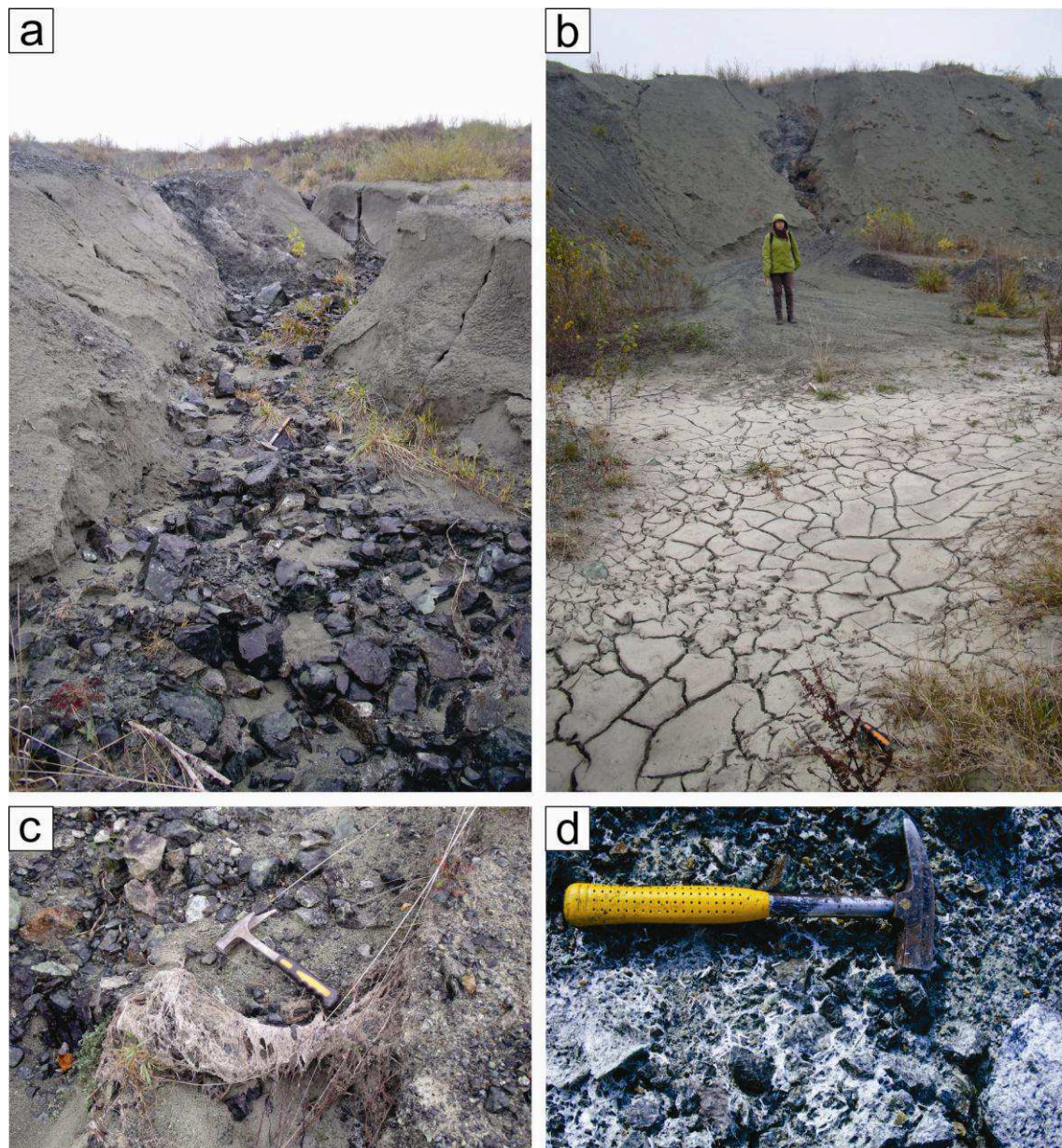
Magyarország környezetében több kisebb szerpentinazbeszt bánya is található, ilyenek Szlovákiában Dobsina (14.2.–14.3. ábra), Szerbiában Korláce és Stragari, Romániában Dubova és Eibenthal környéke (itt felszín alatti bányászat folyt, csak a meddőhányó okozhat a felszínen problémát). Ezekben a bányákban egyelőre nem történtek a felszínen levő azbeszt takarására irányuló munkálatok.



14.2. ábra: Archív felvételek az azbesztbányászatról Dobsinán (Dobšiná, Szepes-Gömöri Érchegeység, Szlovákia). a) Bányanyitás: az azbesztbányászat első „harapása” a domboldalba. b) Feldolgozott kőzetörlemény hányó a bányászat aktív szakaszán, növényzet ekkor még egyáltalán nem látszik. Feltehetően ez az egyik legkorábbi, ma a bányaterület keleti részén található, erősen erdővel borított hányó. Fotó: Štefan Bobák, mindkét felvétel a dobsinai helytörténeti kör honlapjáról származik (<http://ozkhd.sk/>)

14.3. ábra (a következő oldalon): Azbesztbányászat nyomai Dobsinán. a) Google satelitfelvétel a településről, a tőle északra elhelyezkedő bányaterületről és a délkeletre elhelyezkedő azbesztszeparáló üzemről. A bányaterület jó részét már több 10 éves fenyőerdő borítja, az egyenletesen világos színű foltok friss tereprendezés nyomai. A tereprendezés okai feltehetőleg részben a napkollektorok telepítéséhez (területhasznosítás), részben a feldolgozási kőzetörlemény szilikagyártásra való hasznosításához (anyag újrahasznosítás) kötődnek. b) Nyugat-délnyugati irányban készült kép a kopasz domboldalról (a fotó helyét sárga kör jelzi az a) ábrán). A satelitliten még nem látható napkollektorok nagy felületeket foglalnak el. Az örleménykupacok lábánál elterülő fehér anyag azbesztszálakból összeállt filces kéreg. A merdek kupacokon lezaladó víz a kupac lábánál lelassul, energiája csökken, így az addig szállított azbesztszálakat lerakja. c) Az egykori azbesztszeparáló üzem maradványa. d) Archív azbesztérc: keresztszálaz azbesztér a szerpentin alapközeten (a példány a helytörténeti gyűjteményben látható, ennek helyét sárga kör jelzi az a) ábrán). Fotók: b) Tóth Erzsébet, c) és d) Hargitai Anna





14.4. ábra: Üledékföldtani megfigyelések a meddővel (itt: osztályozatlan, feldolgozatlan, feketés színű közettörmelék) és feldolgozott kőzetörleménnyel borított, takaratlan domboldalon. A domboldalon több, 5–6 m magas kőzetörlemény teraszból áll, a legfelső szinten csak feldolgozatlan kőzettörmelék van. A kőzetörlemény néhány mm-es kőzetszemcsékből áll, néhány százalék azbeszttartalommal (a szeparálás tökéletlen volt). a) Halványzöld, egyenletes szemcseméretű kőzetörleményből álló terasz, a lefolyó vizek által bevágott kanyonral. A kanyon alján a feldolgozatlan, meddő kőzettörmelék. b) Terasz alján, a lefolyó vizek lassulásakor kialakult világos azbesztszövedék kéreg, amely az agyaghoz (sárhoz) hasonló száradási repedéseket produkál. c) A lefolyó vizek által szállított azbesztszálak belekapaszkodnak az újukba kerülő akadályokba, jelen esetben a növényi szárukba. d) Azbesztszálak a legfelső, közettörmelékéből álló szinten. A kőzetdarabok szemcsemérete változó, néhány mm-től a néhány cm-ig változik. Fotók: a-c) Tóth Erzsébet, d) Hargitai Anna

14.1. Wittenoom: felhagyott kékazbeszt bánya, sajátos rekultivációval

A felhagyott azbesztbányák környezeti kockázata legnagyobb az amfibolazbeszt bányák esetében lehet. A legfontosabb amfibolazbeszt telepek idős üledékes, enyhén metamorf képződményekben található (Gibbons, 2000): Dél-Afrikában 2,2–2,5 milliárd éve lerakódott vasas üledékekben képződött amfibolazbeszt-extenzióhoz kötődő feszültségtérben bekövetkező diagenézis és igen kis nyomású metamorfózis hatására. A Cape azbesztötvben (Prieska és Koegas) kékazbesztet (krokidolit/riebeckitazbeszt), a Transvaal azbesztötvben főként barna azbesztet (amozit/gruneritazbeszt), kisebb mértékben kékazbesztet fejtettek.

Egészségügyi hatását tekintve viszonylag jól dokumentált az Ausztrália nyugati részén található Wittenoom (22° 14′ 38,4″ déli szélesség, 118° 20′ 6″ keleti hosszúság) és környéke (**14.5. ábra**), ahol riebeckitazbeszt (kékazbeszt, krokidolit) bányászata zajlott 3 bányahelyen (Yampire, Wittenoom, Colonial bánya) 1937–1966 között. Az ausztrál ABC tévécsatorna 1988-ban forgatott riportfilmje (<http://www.abc.net.au/4corners/stories/2011/08/08/3288499.htm>) részletesen, a lakosság és az egykori bányászok, feldolgozók személyes beszámolóin keresztül mutatja be a bányászat és a feldolgozás sokszor embertelen, középkori körülményeit, és a nem megfelelő munkakörülmények szomorú következményeit. Az olasz vendégmunkások tapasztalatait, interjúk alapján Cappelletto és Merler (2003) összesítette. Nyugat-Ausztrália kormánya 2006-ban adott megbízást Wittenoom körzetének környezeti felmérésére, környezeti rehabilitációs tervek elkészítésére (GHD and Parsons Brinckerhoff, 2006).

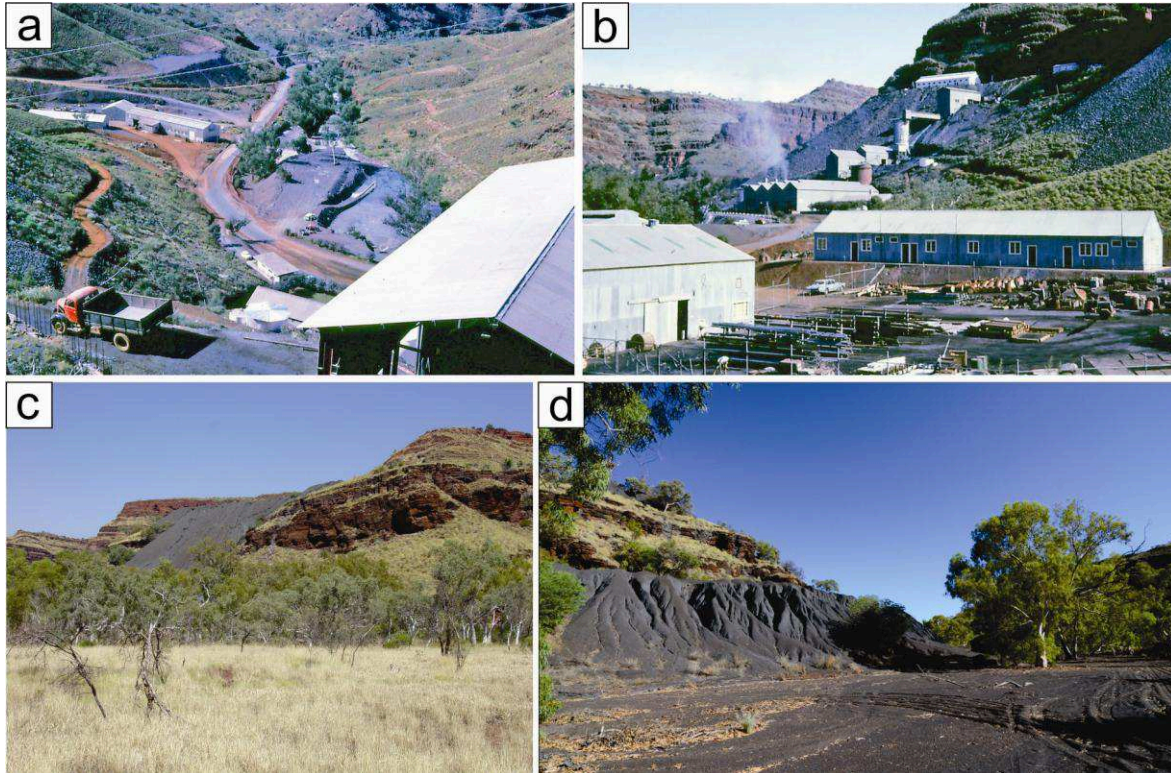
A Hamersley-hegységben több száz kilométer hosszan kibúvó, kb. 2,6 milliárd éves sávós vasércben (Brockmann Vas Formáció, Dales Szurdok Tagozat és Marra Mamba Formáció) fordul elő a kékazbeszt, 0,5–30 cm vastag rétegekben (**14.6. ábra**). A Wittenoom környéki azbesztbányászat a Dales Szurdok Tagozatban húzódó kékazbesztsávokra épült. Összesen kb. 150 000 t krokidolitot termeltek ki a nem egészen 30 év alatt, 3 millió tonnányi meddőhányót hagyva hátra (5% maradék azbeszttartalommal).

A Wittenoom és Colonial bánya a Wittenoom szurdokban található, tőlük kb. 12 km-re északra, a szurdok bejáratánál épült ki a bányatelepülés, Wittenoom. A főként felszín alatti bányászat nyomán felszínre került meddőhányók anyagát a városépítésben is felhasználták, gyakorlatilag a város teljes területét elszennyezték vele. A repülőtér kifutópályáját, az utakat, az iskolaudvart, a kerteket, parkolókat és a lóversenypályát is a szürkés-kék meddővel szórták fel. Aszfaltos utaknál az aszfaltba került az azbeszttartalmú meddő (aszfaltozás csak később jelent meg, amikor már ismerték a porral járó kockázatot), de betonba is keverték (kavics, homok helyett). A meddőterítés célja az volt, hogy a laterites talajból a száraz nyáron képződő vörös port, az esős télen pedig a vörös sarat visszaszorítsa. A kék por tehát, úgy a bányában és az örlőmalomban, mint a településen hozzátartozott az emberek mindennapjaihoz. Sőt a szórakozásnak is része volt: a helybeliek versenyt rendeztek a 44 gallonos (kb. 200 l) tartályok meddővel való feltöltéséből.

A bányászat ideje alatt összesen kb. 12 000 ember fordult meg Wittenoomban,¹ a rossz munkakörülmények, a kedvezőtlen klíma, a település alacsony komfortja miatt ugyanis gyakran felmondtak a munkások, és Kelet-, illetve Dél-Európából hoztak be kötelező 2 éves szerződéssel bevándorlókat a helyükre. Az azbesztexpozíció tekintetében fontos adalék, hogy a bányában és örlőműben dolgozó férfiak kb. 45%-a három hónapnál rövidebb

¹ A bányanyilvántartásban összesen 7000 munkás szerepel (ebből kb. 500 nő), a városnak nem a bányában dolgozó lakossága (főleg nő és gyerek) összesen 5000 fő körül. Némely források ugyanakkor 20 000 fős lakosságot említenek.

ideig dolgozott, és csak 3%-uk maradt 5 évnél hosszabb ideig. Wittenoom 1950-ben kapott települési rangot, 1951-ben már kb. 500 fős település volt, és miután 1966-ban megszűnt a bányászat, a népesség gyorsan csökkenni kezdett.



14.5. ábra: Wittenoom a bányászat idején, és a bányászat nyomai ma. a) Kilátás a törőüzem felől 1962-ben. b) A Wittenoom Gorge bánya 1962-ben, az azbesztet zsákoló részleg gyakran kék porral lepte be a környéket. c) A bányászat után visszamaradt meddőhányó. d) Erózióknak kitett meddőhányó 2011 decemberében. A mély árkokat a hirtelen lezúduló eső mosta ki. A meddő a földutat is beteríti, az autónyomok jelzik, hogy a mai napig járnak arra turisták, minden tiltás ellenére. A kép egyúttal azt is jelzi, hogy a 2006-ban megfogalmazott állami rehabilitációs tervekből sem a meddő takarása, sem a megközelíthetőség elzárása nem történt meg 2011 végéig.

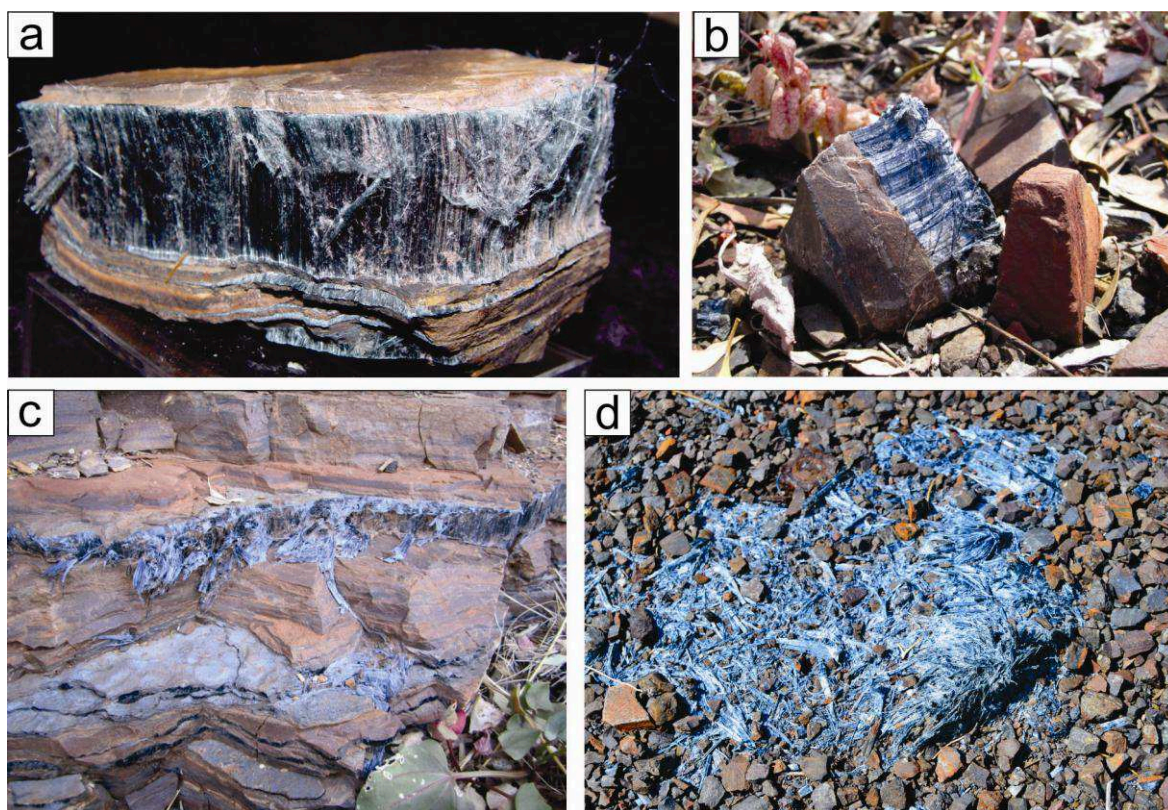
Forrás: a) (<http://www.flickr.com/photos/pschube/5399907188/>) és b)

(<http://www.flickr.com/photos/pschube/5399825228/>) © Phil Schubert – flickr.com; c)

(<http://www.panoramio.com/photo/15768389>) Derek Graham, panoramio.com; d) © Alan

Bilsborough (Alan88) – flickr.com

Az ausztrál állam a kromidolit egészségkárosító hatásának nyilvánvalóvá válása nyomán többször vizsgálta a szennyezés mértékét, a lakosság egészségi kockázatát, mérlegelte a környezet rekultivációs lehetőségeit. A magas költségek, a kis hatékonyság miatt végül az állam inkább az egyre csökkenő méretű település felszámolása mellett döntött: az elvándorlókat anyagilag támogatták, a közszolgáltatásokat (posta, elektromosság, víz) fokozatosan megszüntették, az ingatlanokat felvásárolták és lerombolták, végül 2007-ben megszüntették Wittenoom települési státuszát, és törölték Ausztrália hivatalos térképeiről is. Ma nagyjából 8–10 fő él állandóan a település maradványain, a környéket emellett a bennszülöttek (angolul *aborigine*) és a turisták járják. Wittenoomban drágakőbolt is működött/működik, ahol egyebek mellett helybeli sólyomszemet árulnak (14.7. ábra), amely a kékazbeszt kvarccal átitatott, ékkőként használt, egészségre veszélytelen változata (a Wittenoomtól 100 km-re levő, kicsit idősebb sávós vasérc lelőhely után helyi neve *marra mamba*).



14.6. ábra: A riebeckitazbeszt (kékazbeszt, krokidolit) Wittenoomban és környékén. a) Kékazbeszt nyersanyag Wittenoomból, archiv példány. Tipikus keresztaszalmas kékazbeszt (angolul cross-fibre), azaz a szálak merőlegesek a közethasadék falára. b) Az előzőhöz hasonlóan azbesztgazdag darabok még ma is gyűjthetők a környéken (a kép 2011 szeptemberében készült). c) Természetes azbesztkibúvás a Wittenoom szurdokban. d) Málló azbesztszövedék, amelyből a szálak könnyen a levegőbe, illetve folyóvizekbe juthatnak.

Forrás: a) © Asbestorama – flickr.com; b-c) © Sam Lawrance (Lawrance) – flickr.com, d) © Alan Bilsborough (Alan88) – flickr.com

A bányászat sosem volt igazán nagy volumenű, és sok veszteséget termelt. Az állam és a kormány által nagyban támogatott fejlesztés célja igazából Nyugat-Ausztrália ipari fellendítése volt, de a bányászat befejezésekor a bányacég 2,5 millió dolláros veszteséggel zárt. Berry (1991) összesítette az érintett lakosság körében (kb. 6500 férfi és 400 nő) az azbeszthez kapcsolódó haláleseteket 1986-ig: 86 mezotelióma, 125 tüdőrák (ezeknek csak egy része azbesztes eredetű) és 41 azbesztózis. Ez a vizsgált populációban bekövetkezett halálesetek 18–25%-a, annak függvényében, hogy a tüdőrákos halálesetek hány százaléka köthető azbeszthez. Berry (1991) előrejelzése szerint 1987–2020 között további 250–500 (max. 680) mezotelióma halálesetre, 340–465 tüdőrákos halálesetre (ennek 45%-a, azaz 153–210 azbesztes eredetű), és további 200 (260) azbesztózisos megbetegedésre lehet számítani. Összességében elmondható, hogy Wittenoomban a legóvatosabb becslés szerint is az érintett lakosság legalább 10%-a, 650–700 fő, halt vagy hal meg az azbesztexpozíció következtében kialakult betegségben.

A meddőhányók szél és a víz általi eróziója nyomán ma kb. 10 négyzetkilométernyi területen van jelen az azbeszttartalmú meddő. Az azbeszt leginkább a vízfolyásokkal terjed, a patakágyakba, folyóvölgyekbe is eljutott a hányókról a rövid esős évszakban gyorsan lefutó vizekkel. A patakágyakból és tavakból az azbesztet el akarják távolítani. A szél általi

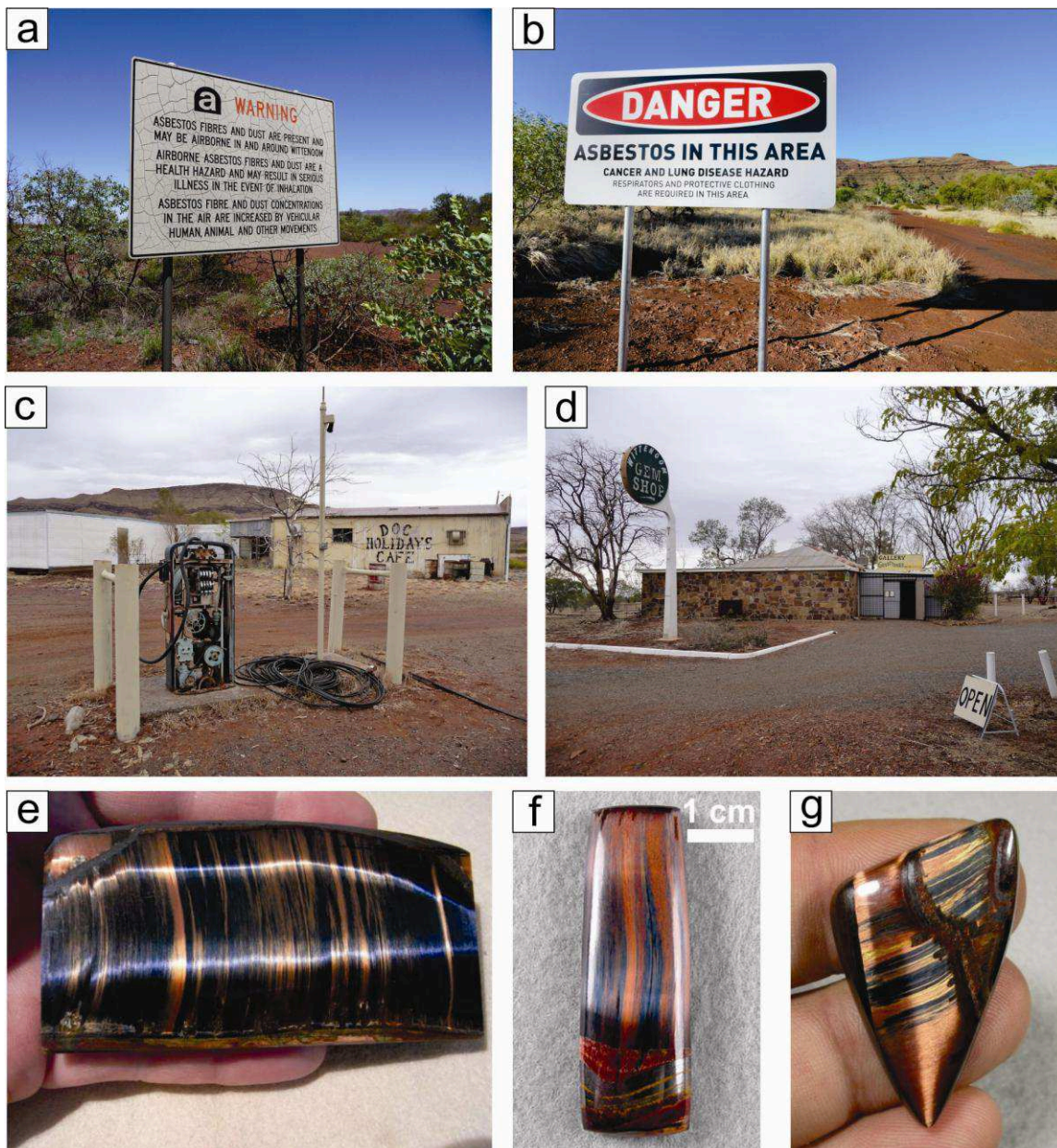
szennyezés terjedés ellen a meddőhányók talajjal és vegetációval való takarását tervezik, ahol szükséges, a vízfolyásokat a hányók környezetéből elterelik.

A bányához, meddőhányókhoz vezető utakat elzárják vagy felszámolják, a közeli nemzeti parkot felkereső turistákat mindenhol táblákkal és prospektusokkal figyelmeztetik a kékazbeszt veszélyeire, és a további egészségi problémák elkerülésére a terület használatáról igyekeznek lebeszélni az embereket. A teljes érintett területet felvették a szennyezett területek nyilvántartásába, a település maradványait idővel teljesen lerombolják, a repülőtér kifutópályáját feltörik, elsegítendő a növénytakaró kialakulását, az azbesztes hulladékokat helyben temetik el. Egy ilyen szórványosan lakott területen, egy hatalmas területű országban ez az emberektől való elszigetelés megoldható, és valószínűleg költséghatékonyabb megoldás a felszín teljes azbesztmentesítésénél.

Megjegyzésre érdemes, hogy a kékazbesztet tartalmazó kőzetek régóta, nagy felületen vannak a felszínen Nyugat-Ausztráliában, így az azbesztszálak a természetes erózió nyomán igen régóta, folyamatosan szabadulnak ki a légkörbe és a vizekbe. Klein (1993) irodalmi összefoglalója és eróziós becslése alapján a kékazbesztet is tartalmazó sávos vasérc ma mintegy 80 000 km² területen² található meg a felszínen. A sávos vasérc eredeti elterjedését háromszor ekkorára becsülik, és e kőzetek az utóbbi 150 millió évben folyamatosan a felszínen voltak. Ez idő alatt, 1 cm/1000 éves eróziós (kőzetpusztulási) rátával számolva 1500 m vastagságban pusztulhatott le a sávos vasérc a majdnem 3 magyarországnyi területen. Klein (1993) 5%-nyi átlagos azbeszttartalmat feltételez, ha mi csak 1 térfogatszázalékot feltételezünk, akkor is 240 000 km²×1,5 km×0,01=3600 km³ térfogatú kékazbeszt került a levegőbe az utóbbi 150 millió évben, csak itt, Nyugat-Ausztráliában! Ez a térfogat úgy képzelhető el, mintha Magyarország területét mintegy 39 m vastagságban borítaná kékazbeszt.³

² Összehasonlításul: Magyarország területe nagyságrendileg azonos, 93 000 km².

³ 93 000 km²×0,0387 km=3600 km³.



14.7. ábra: Wittenoom település és környéke. a) Azbeszt jelenlétére figyelmeztető tábla, a nemzeti „a” azbeszt jelzéssel. Szövege: „Azbesztszálak és azbesztpor található Wittenoomban és környékén, amely a levegőbe juthat. A levegőbe jutott (angolul airborne) azbesztszál és azbesztpor egészségi kockázatot jelent, belégzés esetén súlyos betegségeket okozhat. Az azbesztszál és azbesztpor levegőbeni koncentrációját a járművek, az ember és az állatok mozgása növeli.” b) Új azbesztveszélyt jelző tábla, az „a” szimbólum hiányzik. Szövege: „Veszély! Azbeszt a területen. Rák- és tüdőbetegség kockázat. Légzési maszkok és védőruházat viselése szükséges a területen.” c) Hangelkép a település maradványából: kibevezett benzinkút és kávézó. d) A közüzemi szolgáltatásokkal (víz, villanyáram) nem rendelkező településen a helyi drágaköveket árusító bolt 2010-ben még kinyitott az érdeklődők számára. e–g) Sólómszem/tigrisszem, illetve az egyik lelőhely után marra mamba néven is ismert, kék, selyemfényű drágakő. A tömeges kvarcot ásványzárványok színezik: a kék színt a kékazbeszt szálak, a sárgás és barnás árnyalatot a goethit, a vöröset és fémesszürkét (az f) ábra medáljának alsó részén) a hematit adja. Forrás: a), c), d) © Five Years – wikipedia.org; Asbestorama – flickr.com; b) © Alan Bilsborough (Alan88) – flickr.com; e) © Ian Bell, ozrainbows.com; f–g) © www.samsilverhawk.com

14.2. Egy lassan befejeződő bányarehabilitáció: Észak-Görögországi Azbesztbánya (MABE), Zidani, Görögország

Az Észak-Görögországi Azbesztbánya (röviden MABE) Észak-Görögországban (Kozani prefektúra, Nyugat-Makedónia) található, 130 km-re nyugatra Tesszaloniki, 40 km-re keletre Kozani városától (Von Lieberman & Rudnik, 2007; [14.8. ábra](#)). A bányában szerpentinitből termelték a krizotilazbesztet. A bányától kb. 1 km távolságra folyik Görögország leghosszabb folyója, az Aliakmonas, amelyen mesterséges tó is létesült (Polyfytou). Ez a tó látja el ivóvízzel a másfél millió lakosú Tesszalonikit, így a víz tisztaságának védelme kiemelt feladat.

Az azbeszttelepet 1935-ben fedezte fel egy amerikai vállalat, 1955-től folytattak a területen szisztematikus földtani kutatásokat. Az 50-es évek végétől a 70-es évekig folytattak próbafejtést, mélyszinti (felszín alatti) bányászattal. A kitermelt nyersanyagot egy próbaüzemben dolgozták fel 1957-től (Von Lieberman & Rudnik, 2007).

A MABE bányacéget 1970-ben alapították (Skotidakis, 2011), és államilag felügyelt, félig magánkézben lévő cégeként működött (Von Lieberman & Rudnik, 2007). 1981-ben azbesztfeldolgozó üzemet létesítettek a bánya területén, és az 1982–2000 időszakban külszíni fejtéssel bányászták, és helyben állították elő a tiszta krizotilazbesztet. A bányászat 2000-ben az azbeszthasználatot tiltó szabályozás miatt állt le, 2002-ben a bányát üzemeltető cég a teljes bányát és a feldolgozó létesítményt szerződéssel Kozani prefektúra tulajdonába adta át (Von Lieberman & Rudnik, 2007).

A felszíni bányászat 18 esztendeje alatt 70 millió tonna szerpentinit kőzetet bányásztak ki, ebből 1 millió tonna krizotilazbesztet állítottak elő. A 851 000 m² területű bányában 10 m magas és 5 m széles teraszokat alakítottak ki, a fejtéssel 180 m mély, tölcser alakú bányagödört hagytak hátra ([14.9. ábra](#)). A bánya alján felszínre került a természetes vízszint, így a gödör alján ma tó található.

A feldolgozás után a közettörmelékot dombokba (meddőhányók) halmozták a bányagödör környezetében ([14.9.c. ábra](#)). A feldolgozóüzemek területén, körzetében ott maradt a többnyire zsákokba töltött, felhasználásra / eladásra kész azbeszt egy része is, raklapokra halmozva. A lerakatok csomagolása sok esetben sérült az időjárás viszontagságai nyomán. Emellett az azbesztet több helyen vegyes hulladékokkal (fa, szalma, talaj) keverve elásták az üzem környezetében. A bányászat és a helyszínen maradt feldolgozási maradékok (azbeszt raktárkészlet, gyártási hulladék – lokális szálforrásként) azbesztszálakkal szennyezték el a teljes bányaterületet és annak tágabb környezetét is, beleértve az ivóvízforrásként szolgáló Polyfytou tavat is.

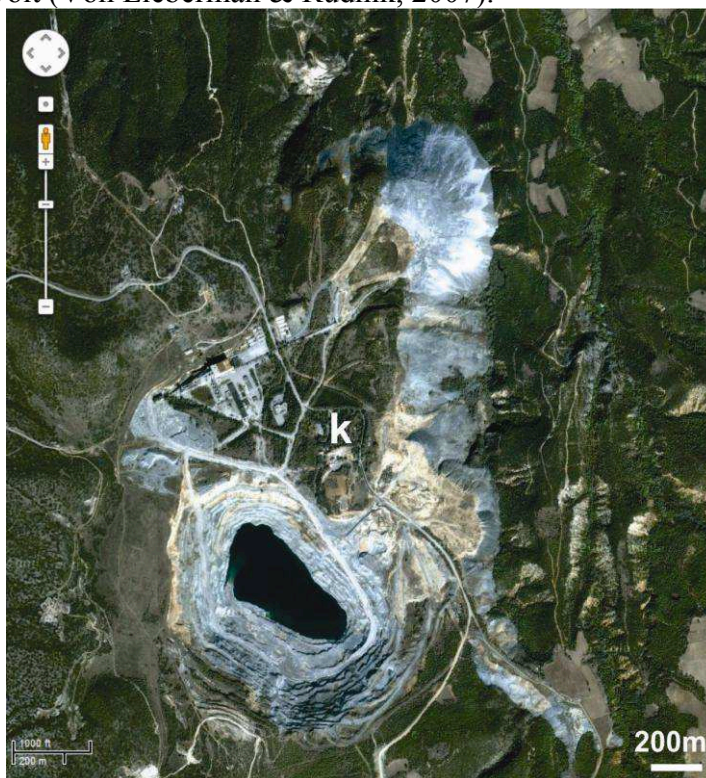
A bányacég tulajdonába tartozó teljes terület kb. 2,7 km x 1,5 km kiterjedésű, 4 140 000 m² (414 ha). Ebből a bányaterület (gödör) 851 000 m², a meddőhányók területe 532 000 m², az adminisztratív, feldolgozási, gyártási és ellátó épületek 25 000 m² (44 000 m² teljes épületfelszínnel) területen helyezkednek el. Az érintett területen, a bányától kb. 500 m távolságra található egy 17. századi kolostor, mely a mai napig sok látogatót fogad.

A bánya rehabilitációjának első lépéseként, 2005–2007 között, egy LIFE 3 Projekt (LIFE 03 ENV/GR/000214) keretében felmérték a terület környezeti állapotát. A felszínen levő, magas szennyezési kockázatot hordozó azbeszttartalmú hulladékokat összegyűjtötték, kezelték, majd elhelyezték a bánya területén kialakított német fejlesztésű, kísérleti hulladéklerakón (Von Lieberman & Rudnik, 2007; [14.10. ábra](#)). A lerakót a bányagödör egyik északkeleti, felső teraszán alakították ki, kb. 80 m-el a bányató akkori vízszintje felett (a mérnöki számítások szerint a vízszint 80–97 év alatt érheti el a lerakó szintjét).

A lerakott anyagból kb. 130 t kötőanyag nélküli azbeszt, amelyet kiporzási veszélye alapján kezeltek. A bányaeépületekből összeporszívózott azbesztport és az egyszeres csomagolású, nem összeállt, laza azbesztet 1:1 arányban cementbe keverték (szilárdítás, angolul solidification), majd IBC⁴ tartályban helyezték el. Az időjárás viszontagságainak kitett, sérült csomagolású azbeszt nagymértékben filcesedett, összeállt, ezért ebben az esetben a cementbe ágyazáshoz őrlésre lett volna szükség, amelynél nagy a szálkiszabadulás esélye. Így az összeállt azbesztet inkább nagyobb darabokra törték, műanyag zsákba csomagolták, majd IBC tartályokban helyezték el úgy, hogy a tartályt betonnal bélelték ki, és a tartályt a zsákok behelyezése után is betonnal zárták le. A jól (duplán) csomagolt, porlódozó azbeszttel szintén műanyag zsákba tették, majd betonnal bélelt és betonnal lezárt IBC tartályban helyezték el (14.10.b. ábra). Az eredetileg 130 t-ra becsült laza azbeszthulladék tömege csomagolás után 290 t lett.

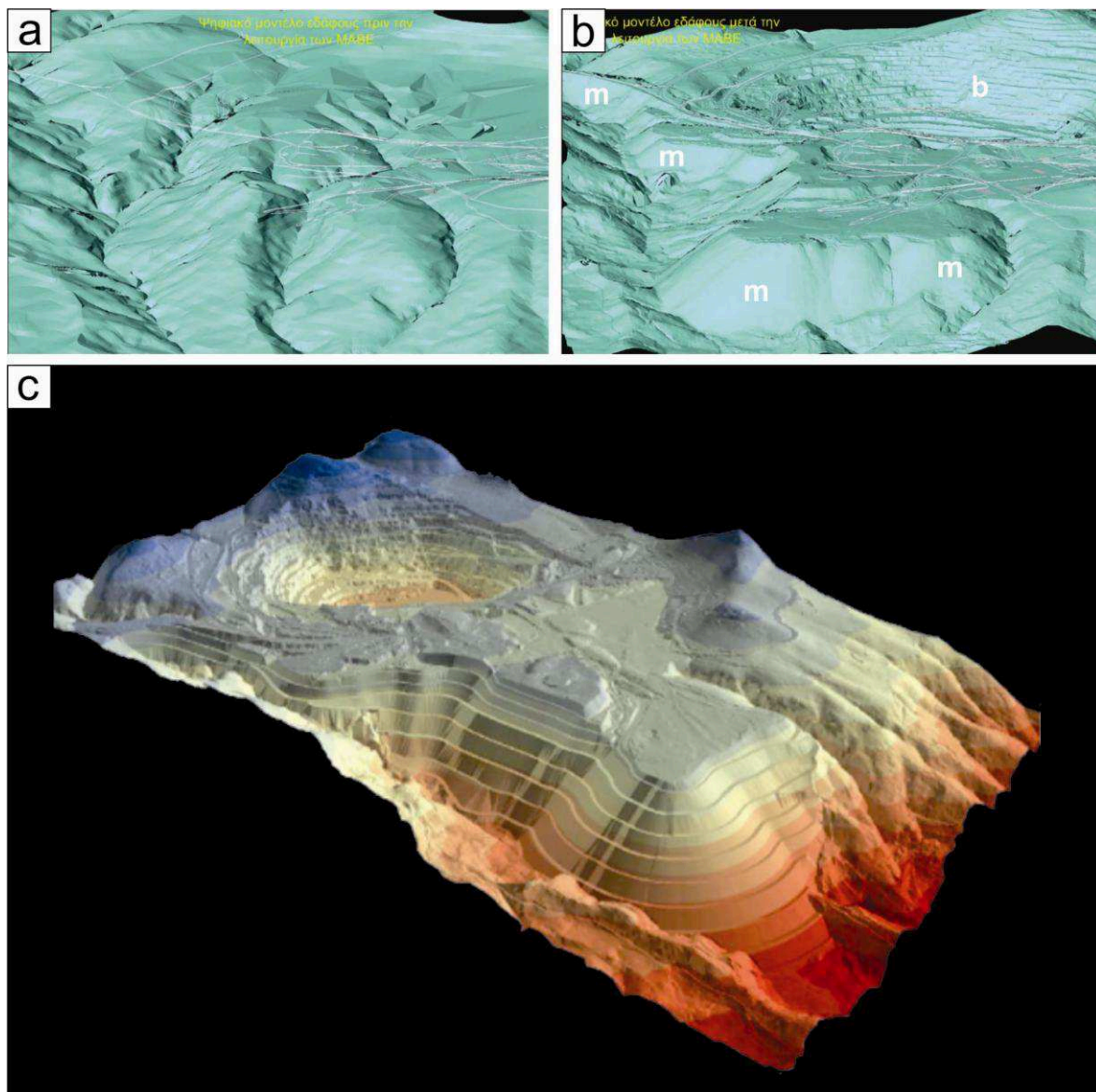
A kb. 10 t azbesztcement hulladék csomagolás után 13 t tömegű lett (14.10.f. ábra).

A hulladéklerakót a hulladékok elhelyezése után talajtakaróval fedték le, de még további azbeszttartalmú hulladék lerakására alkalmas, megmaradt befogadóképessége 2000 m³ (az első lépésben lerakott hulladék összterfogata ehhez képest csekély, kb. 260 m³). A beruházás további célja volt, hogy felmérje a bányagödör, illetve a bányaterület további azbeszthulladék-tárolóként való hasznosításának lehetőségét (Skotidakis, 2011). A projekt költsége 415 000 euró volt (Von Lieberman & Rudnik, 2007).



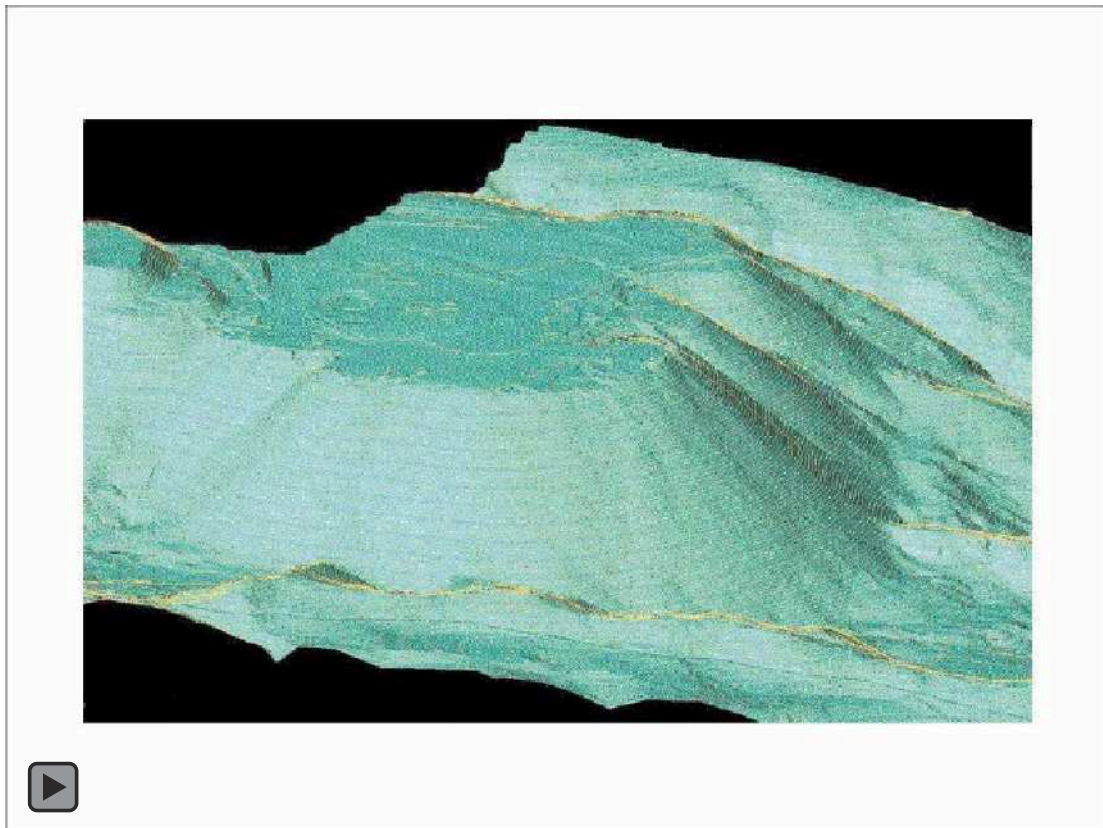
14.8. ábra: Az Észak-Görögországi Azbesztbánya (MABE) légi felvételen. A felvétel nyilvánvalóan a rekultiváció előtt készült. A kép déli részén látható a bányagödör, közepén a kialakult bányatóval, tőle északabbra az azbeszt kinyerésére szolgáló üzemegységek. A kép közepén látható a 17. századi kolostor (jele: k), míg északkeleten és keleten húzódnak a meddőhányók. A nagy mesterséges tó a bányától északra található, kívül a kép határán. Forrás: Google Earth

⁴ IBC: az angol intermediate bulk container kifejezés rövidítése, folyadékok vagy szilárd anyagok tárolására szolgáló, többnyire kb. 1 m³ térfogatú, megerősített, HDPE vagy acél tartály.

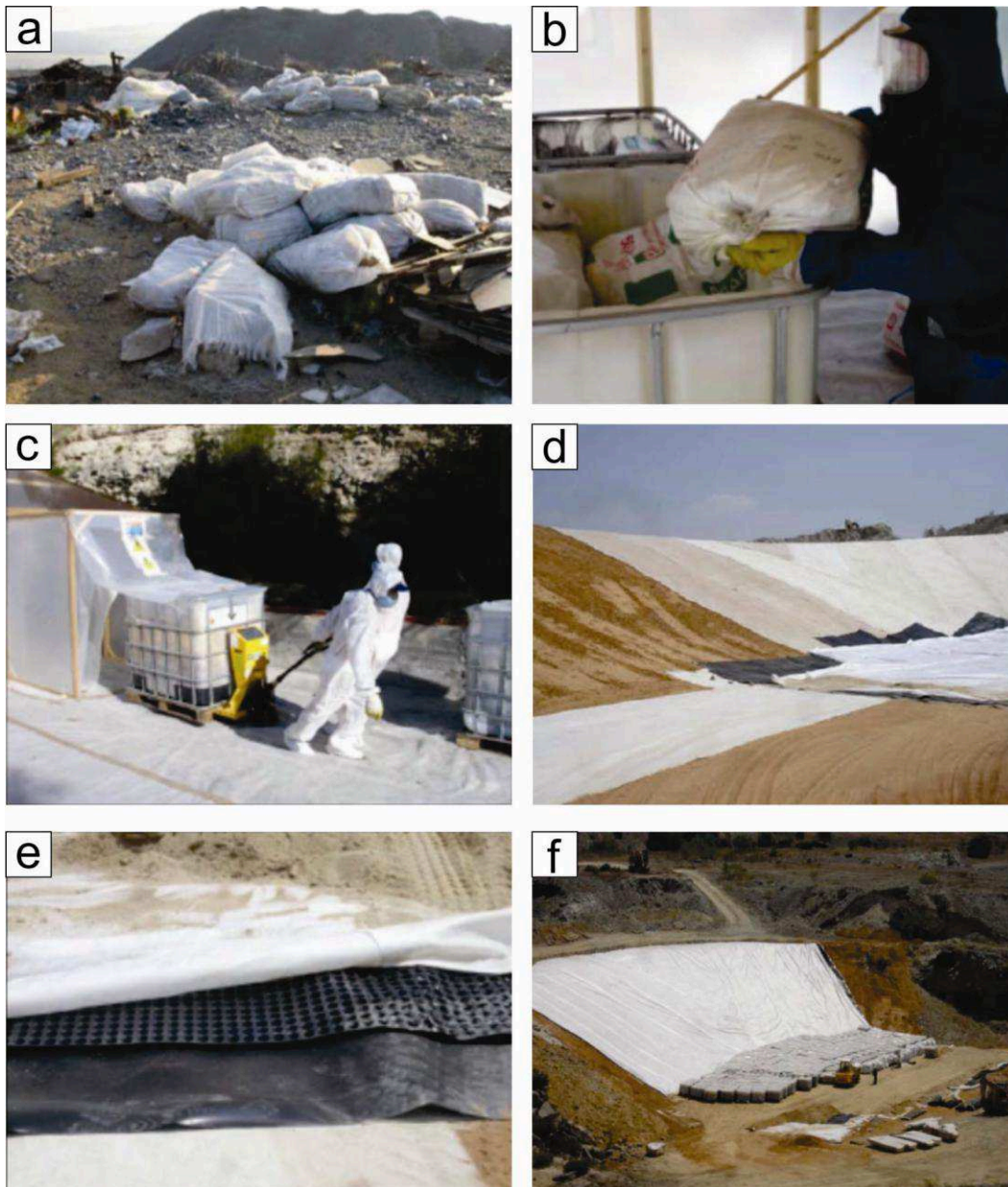


14.9. ábra: Digitális terepmodellek a MABE területéről. a) A bányászat előtti térszín. b) A bányászat utáni térszín: a háttérben a tölcsér alakú, lépcsőzetes kialakítású bányagödör (jele b), az előtérben az azbeszt kinyerése után lerakott kőzetörlemény dombok (meddőhányók, jele m). A legnagyobb domb magassága megközelíti a 180 métert, a dombok oldala rendkívül meredek, instabil. c) A terület digitális terepmodellje a meddőhányók felszínének teraszos kialakítása után. Forrás: Skotidakis (2011)

A rehabilitáció második lépcsőjében, 2004–2009 között (Skotidakis, 2011), a meddőhányók egy 310 000 m²-es (31 ha) részét rekultiválták, mintegy 6,2 millió euró értékben ([14.11.-14.12. ábra](#)). A meredek falú, instabil lejtők meredekségét csökkentették, teraszossá alakították ([2. animáció](#)), az erózió csökkentésére. A földmunkák során 3 millió m³ törmeléket mozgattak meg. A lejtőket talajjal borították, és az eredetihez hasonló növényzetet telepítettek rá (összesen 200 000 növény példányt ültettek el). Automata öntözőrendszert építettek ki a domboldalakon, mintegy 200 km hosszúságban, a növényzet megtelepedésének elősegítésére.



2. animáció: A MABE legnagyobb meddőhányójának tereprendezése: lejtőszög csökkentés és teraszos lejtő kialakítás, digitális terepmodell alapján. Forrás: Skotidakis (2011)

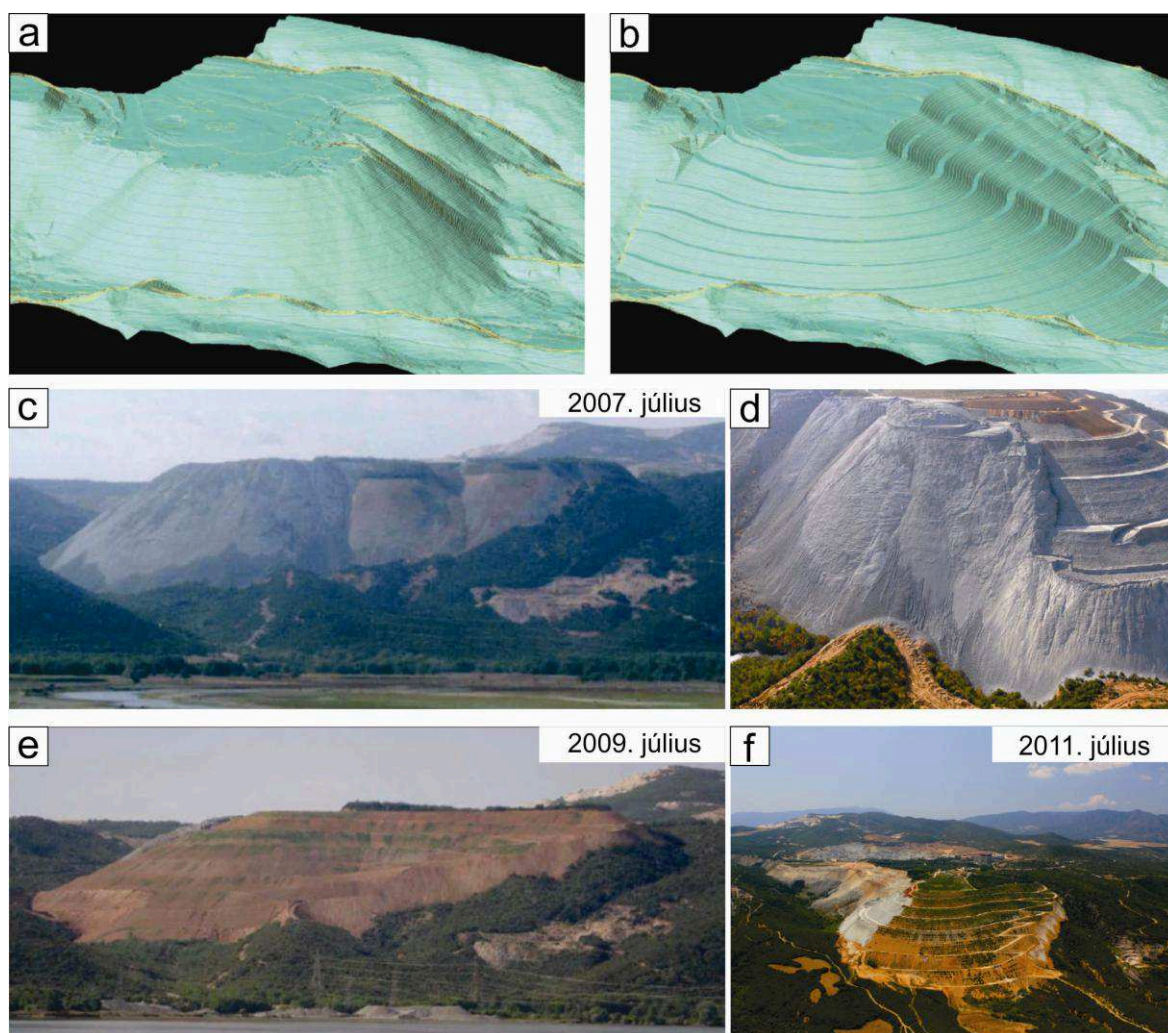


14.10. ábra: Kísérleti hulladéklerakó a MABE területén. a) A bánya és a feldolgozó létesítmények környezetéből begyűjtött, többségében kötőanyag nélküli, laza azbeszthulladék (felhasználásra kész, csomagolt azbeszt, illetve azbeszttel kevert vegyes hulladék). b)–c) Zsákos azbeszt megerősített IBC műanyag tartályokban való elhelyezése a környezettől elzárt, csökkentett nyomású (szivárgásbiztos) kezelőhelyiségben. d)–e) A hulladéklerakó aljzat kialakítása. f) A megfelelően csomagolt azbeszttartalmú hulladékok elhelyezése a lerakón: kocka alakú, megerősített IBC műanyag tartályok, illetve lapos, téglatest alakú, csomagolt azbesztcement termékek a kép jobb alsó részén. Forrás: Skotidakis (2011)

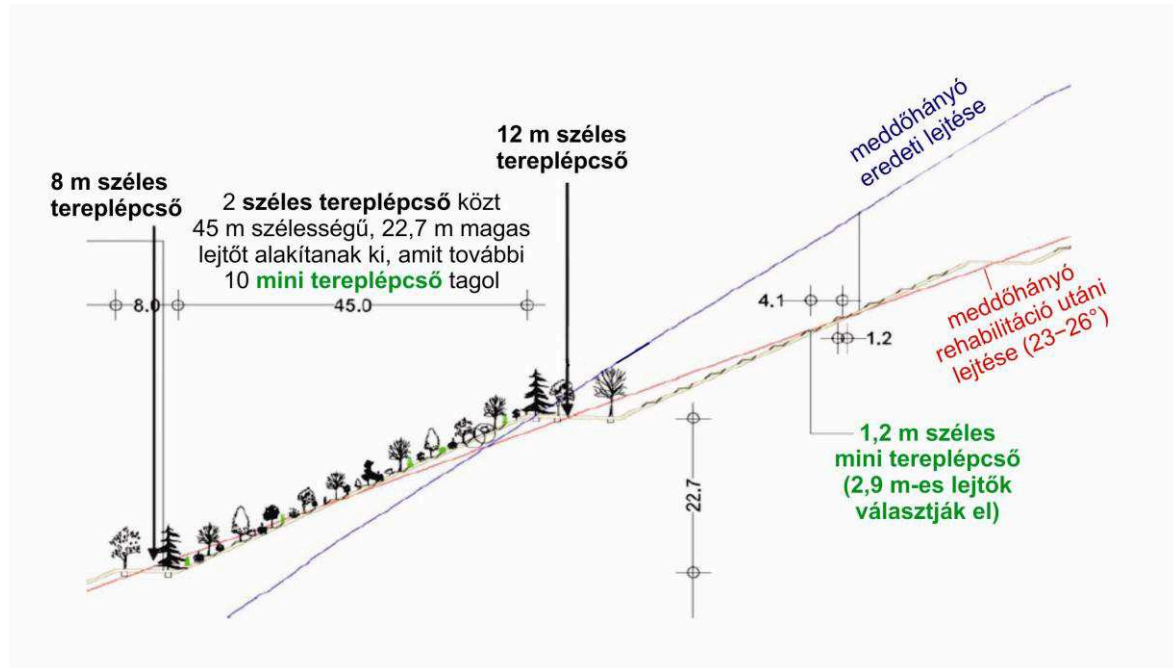
2009-ben kezdődött a rehabilitáció harmadik lépcsője, 14 millió euró költségvetéssel (Skotidakis, 2011). A harmadik lépcsőben a fennmaradó meddőhányók teraszos tereprendezése, a bányagödör és a sík felületek rehabilitációja történt meg (erózióvédelem, talajtakarás, növényzet telepítése – 500 000 példány, öntözőrendszer kialakítása).

A rehabilitáció utolsó fázisa a gyárépületeket érinti. A 35 millió euró költségvetésű projektben az épületeket (teljes terület 25000 m²) a tervek szerint azbesztmentesítik, majd

lebontják (Skotidakis, 2011). A helyszínen levő laza azbeszthulladék mennyisége becslések szerint 50 000 t (Von Lieberman & Rudnik, 2007). Ha ezt 1:1 arányban cementtel keverik, 100 000 t lesz a teljes hulladéktömeg, amely $\rho = 1600 \text{ kg/m}^3$ sűrűséggel számolva 62500 m^3 térfogatú lesz. Ekkora mennyiségű hulladék takarással együtt $100\,000 \text{ m}^3$ teljes tárolókapacitást igényel. Az első hulladéklerakó, 2000 m^3 megmaradt kapacitásával az azbeszthulladék töredékét tudja majd befogadni, további lerakók kialakítására lesz tehát szükség.



14.11. ábra: A meddőhányók rekultivációja. Az azbeszt kinyerése után visszamaradó, azbeszttel még tartalmazó kőzetőrleményt a bánya környezetében dombokba halmozták, ezek a meddőhányók. Innen az erózió (a lefolyó vizek, szél) kiszabadíthatják az azbesztszálakat. A rekultiváció célja a meddőhányók takarása, a szálak kiszabadulási esélyének csökkentése. a) Meddőhányó digitális terepmodellje a rekultiváció előtt. b) Meddőhányó digitális terepmodellje a rekultiváció után: jól látszik a lejtőszögek csökkenése és a teraszos kiképzés. c) Meddőhányó a rekultiváció előtt. d) Meddőhányó a rekultiváció közben, a tereprendezés idején. A szerpentinittörmelék jellegzetesen szürke színű. e)–f) Meddőhányó a talajtakaró kialakítása közben. A sárgásvörös szín a környéken jellemző, tápanyagszegény talaj színe. Forrás: Skotidakis (2011)



14.12. ábra: A meddőhányó rekultivációjának vázlatja. Kék szín jelzi a rekultiváció előtti lejtést, piros a rekultiváció utánit. Látszik a szélesebb (12 m) és keskenyebb (1,2 m) sík felületekkel (=lépcsőkkel) tagolt, teraszos kiképzés és a vegyes növénytakaró. A telepített talajtakaró 40 cm vastag. Az ültetett főbb fatípusok: feketefenyő, fehér akác, molyhos tölgy. Forrás: [Zagas et al. \(2010\)](#)

15. Azbesztet helyettesítő anyagok, az azbeszt jövője

15.1. Helyettesítő anyagok

Az azbeszt helyettesítésére sokféle anyagot használnak, attól függően, hogy az azbeszt mely hasznos tulajdonságát (hang- és hőszigetelés, szakítószilárdság, nagy fajlagos felület stb.) használta ki az adott korábbi alkalmazás. Vannak köztük természetes anyagok (wollastonit), illetve mesterségesen előállított szálak (mesterséges üveges szálak, műszálak, szerves szálak).

15.1.1. Wollastonit

A wollastonit¹ egy piroxenoid ásvány, szerkezete a piroxénekéhez hasonló, innen a piroxenoid elnevezés. Szerkezetében kódolva van a lehetőség a tús, szálas megjelenésre: az $[\text{SiO}_4]^{4-}$ tetraéderek két csúcsukon keresztül másik tetraéderhez kapcsolódnak, végtelen hosszú szilikátláncot formázva. A szilikátláncok közt a kapcsolatot a $[\text{CaO}_6]^{10-}$ poliéderlánc teremti meg.

Az amfibolokhoz hasonlóan a wollastonit lehet táblás-oszlopos vagy szálas-tús megjelenésű.

Iparban mind a szálas, mind a nem szálas változatait (kerámiaipar) hasznosítják, az 1930-as évektől kezdve (IARC 68. kötet, 1997). Legnagyobb telepei Finnországban és az USA-ban vannak.

A szálas változatot azbeszthelyettesítő anyagként használják szálerősítésű termékekben (pl. falburkoló lemez, tetőfedő pala, formázott szigetelések, magas hőmérsékletű hőszigetelő lapok, tömítések, egyes sűrűlódó alkatrészek – fékbetétben fémszállal és szerves szállal együtt).

A wollastonitszálak tipikus átmérője 0,2–0,4 μm , az l:d arány a hosszú szálaknál 20:1-ig megy fel (**10.6.g.–h. ábra**). Kerámiaipari alkalmazásokban a wollastonit többnyire átalakul, így nem jelent egészségi kockázatot a végfelhasználók számára, más alkalmazásokban, pl. falburkoló lapokban nem. A wollastonit tartalmú termékekhez kötődő egészségi kockázatról egyelőre nem áll rendelkezésre megfelelő mennyiségű adat, a wollastonit jelenleg 3-as IARC besorolású (emberekre gyakorolt rákkeltő hatás tekintetében nem besorolható, IARC 68. kötet, 1997).

15.1.2. Mesterséges üveges szálak

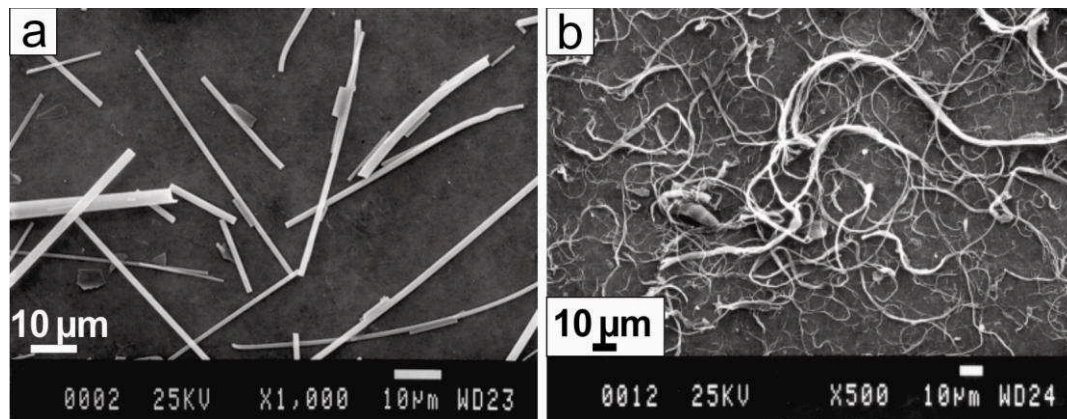
A helyettesítő anyagok egy kiemelt csoportját adják a mesterséges üveges szálak (angolul *man-made vitreous fibres*, rövidítése *MMVF*, **10.6.e.–f. ábra**). A mesterséges üveges szálak szálas, nem kristályos szerkezetű szervesetlen anyagok (szilikátok), amelyeket kőzetből, salakból, üvegből, fém-oxidokból vagy egyéb ásványi nyersanyagból állítanak elő. A mesterséges üveges szálak közé tartoznak a folytonos szálak (pl. folytonos üvegszál) és a gyapotok (pl. üvegyapot, kőzetgyapot, salakgyapot, **15.1.a. ábra**) és a tűzálló kerámiaszál gyapot).²

A mesterséges üveges szálak előállítása nagyjából azonos elven alapul: az alapanyagot magas hőmérsékleten, olvadásiig hevítik, majd az olvadékból szálakat húznak-sodornak (levegő- vagy gőzbefúvással). Ma már a porképződés (egészségi kockázat) csökkentésére

¹ Képlete: $\text{Ca}_3[\text{Si}_3\text{O}_9]^{\text{triklin}}$.

² A mesterséges üveges szálak főbb típusainak angol nevei: a folytonos üvegszál = *continuous glass filament*, üvegyapot = *glass wool*, kőzetgyapot = *rock wool* vagy *stone wool*, salakgyapot = *slag wool*, tűzálló kerámiaszál = *refractory ceramic fibre*.

kötőanyagot (pl. keményítő) és olajat is adalékolnak a szálakhoz. Ha a szálak rövidek, nemz- vagy filcszerűen összevissza állnak, gyapot (kőzetgyapot, bazaltgyapot, üveggyapot, salakgyapot stb. – az előtag mindig az alapanyagra utal) a termék neve, ha hosszú, felcsévelt szál az eredmény, folytonos üvegszál.



15.1. ábra: Azbeszthelyettesítő anyagok pásztázó elektronmikroszkópos felvétele. a) Salakgyapot. b) Vastag kevlerszálak és a felületükről lefoszló szálacskák. A szálacskák többnyire kis csomókba állnak össze, így nem okoznak nagy szálkoncentrációt a levegőben. Forrás: *Encyclopaedia of Occupational Health and Safety*, © International Labour Organization, 1998 (http://www.ilo.org/safework_bookshelf/english?d&nd=170000102&nh=0)

Európában az 1880-as évektől az 1940-es évek közepéig főként salakgyapotot gyártottak, ma alapvetően kőzetgyapotot állítanak elő (az USA-ban éppen fordított a helyzet: 1900–1930 közt dominált a kőzetgyapotgyártás, ma pedig szinte kizárólag salakgyapotot állítanak elő, IARC 81. kötet, 2002).

Üveges szálak a természetben is keletkeznek: a hawaii „Pele istennő haja” (15.2. ábra) bazaltvulkánosság terméke. A lávaszökőkutakból 1100–1200 °C-os olvadékcseppek repülnek ki nagy mennyiségű gáz kíséretében (Harangi, 2011). Ha a cseppeket kihúzza, messzire viszi a szél, belőlük üveges szál képződik, a szálak átmérője gyakran 0,5 mm alatti, míg hosszuk a 2 m-t is elérheti.



15.2. ábra: Pele istennő haja, azaz bazalt összetételű üveges (nem kristályos) természetes szálak pahoehoe bazalton. D.W. Peterson (Amerikai Geológiai Szolgálat) felvétele, 1984, képszélesség kb. 15 cm (<http://volcano.usgs.gov/images/pglossary/PeleHair.php>)

A mesterséges üveges szálak hőállósága változó, legalacsonyabb az üvegyapoté, magasabb a kőzetgyapoté, legmagasabb a hőálló kerámiaszál gyapoté. Felhasználás tekintetében a gyapotokat hő- és hangszigetelésre alkalmazzák (a szórt azbesztszigetelések, az azbesztkarton, az azbesztpapír kiváltójának tekinthető), a folytonos szálakat a szálerősítésű kompozit anyagokban használja az építőipar, de alkalmazza őket az elektronikai és a szigetelőipar is.

Szálás megjelenésükben a mesterséges üveges szálak hasonlítanak az azbesztekhez, emberi szervezetbe jutásuk tehát ugyanúgy, főként belélegzéssel történik. Egészségre gyakorolt hatásuk az azbesztekéből fakadó, szálak anyagokkal szembeni bizalmatlanság nyomán állandó kutatások tárgya. Két IARC monográfia is foglalkozott rákkeltő hatásuk vizsgálatával (43. kötet, 1988; 81. kötet, 2002.)³

Az azbesztek és a mesterséges üveges szálak több tekintetben is eltérnek: az ember által használt üveges szálak mesterségesek (az azbesztek természetes anyagok, *ásványok*), nem kristályosak (az azbesztek igen), és ennek köszönhetően könnyebben feloldódnak a tüdőben, mint az azbesztek. Ma már a szálak anyagok gyártásánál nemcsak a felhasználást veszik figyelembe, hanem cél az is, hogy a szál a szervezetben viszonylag könnyen lebomló (azaz az élő szervezetben kevésbé tartós, kevésbé bioperzisztens) legyen. Ezért a kémiai összetételt módosíthatják: Na-, K- és boráttartalom növelése üvegyapotban, alumínium mennyiségének növelése a szilícium rovására, vagy alkáli földfémek növelése az alumínium rovására kőzetgyapotban (IARC 81, 2002).

Az üveges szálak méretükben és mechanikai aprózódásukban is eltérnek az azbesztektől: a szálak átmérője nagyobb, gyapotokban átlagosan 3–10 µm, folytonos szálakban 5–25 µm.⁴ Mivel nincs belső szerkezetük (nem kristályosak), ezek a szálak nem foszlódnak tovább, illetve nem hasadnak vékonyabb szálakra, többnyire keresztbe törnek. Ezek a tulajdonságok is befolyásolják egészségre gyakorolt hatásukat.

Egészségre gyakorolt hatásukat tekintve érdekes módon az IARC 2002-es véleménye (81. kötet) kevésbé elítélő, mint az 1988-as (43. kötet) volt: jelenleg 2B IARC kategóriájú (embereknek lehet, hogy rákkeltő) néhány speciális felhasználású üvegszál, illetve a tűzálló kerámiaszálak, míg 3 IARC kategóriájú (emberekre gyakorolt rákkeltő hatás tekintetében nem besorolható) az üvegyapot-szigetelés, a folytonos üvegszál, a kőzetgyapot és a salakgyapot.⁵

15.1.3. Para-aramid szálak

A para-aramid szál elnevezés olyan hosszú láncú, szintetikus poliamid szálát (IARC 68. kötet, 2002) jelöl, ahol az amid csoportok legalább 85%-a közvetlenül két aromás csoporttal van kapcsolatban (para-aramidnál 1,4-helyzetben). Tipikus para-aramid márkanévek a Kevlar® (15.1.b. ábra), Twaron® és Technora®, az 1970-es évektől gyártják őket. Közepes vagy nagyon jó szakítószilárdsággal rendelkeznek, mérettartók, savnak, lúgnak, hőnek viszonylag ellenállnak, igen könnyűek. Szerkezetük kristályos.

A folytonos szálak, a szövetszálak és a rövid szálak általában 10–15 µm átmérőjűek, a szálhossz a gyártott típustól függően mm-cm-dm tartományban mozog. A szálak felszínéről azonban mechanikus dörzshatásra szálacsákák (angolul *fibril*) szakadhatnak le, ezek

³ Ezek a kötetek nemcsak az egészségkárosító hatásról ismert adatokat összesítik, de az alkalmazási, gyártási adatokról is jó áttekintést adnak.

⁴ A folytonos üvegszálakat átlagos átmérőjük szerint 19 osztályba sorolják, az osztályokat az ábécé betűivel jelölik, B-től (3,30 µm-től) U-ig (25,40 µm-ig, IARC 81, 2002).

⁵ Az 1988-as IARC besorolás (IARC 43. kötet) a következő volt: 2B – üvegyapot, kőzetgyapot, salakgyapot, tűzálló kerámiaszál, 3 – folytonos üvegszál.

pedig már a belélegezhető mérettartományba esnek: átmérőjük kisebb, mint 1 μm . A rövid para-aramid szálakból álló para-aramid-pép szintén rengeteg szálacskát tartalmaz, ez a pép is belélegezhető szálforrás.

A para-aramid szálakat két lépcsőben állítják elő: először a polimert állítják elő, majd újraoldják és fonják. A para-aramid szálak alkalmazási területei: szálerősítés kompozitokban, fonal, szövet. Súlyához képest nagyon erős, így használja az űrtechnika, a hadiipar és a sportszeripar is. Szövetként technológiai öltözék, golyóálló mellény, ejtőernyő, fonva kötelek alapanyaga. A para-aramid-pép súrlódó alkatrészekben (fékbetét), tömítésekben, ragasztókban váltotta ki az azbesztet. A gumiiparban az autógumiba erősítésül tett acélszálat váltotta ki.

A levegőbe jutó szálak átmérője az eddigi vizsgálatok alapján 0,15–1,3 μm , a szálhossz 2–14 μm nagyságrendileg (IARC 68. kötet, 1997). A modern gyártósorokon való előállítás általában nem okoz nagy szálkoncentrációt a levegőben.

A para-aramid szálacskák (*fibril*) jelenleg 3-as IARC besorolásúak (emberekre gyakorolt rákkeltő hatás tekintetében nem besorolható, IARC 68. kötet, 1997).

15.1.4. Egyéb szerves szálak

A para-aramid az egyik legsikeresebb szerves szálnak tekinthető. Speciális tulajdonságaira azonban nincs mindenhol szükség, és előállítás is viszonylag drága.

Egyszerűbb azbesztes anyagok kiváltásakor, pl. szálcement alkalmazásoknál (palák, hullámpalák, nyomócsövek) ugyanakkor nem elegendő egyféle szálas helyettesítő anyag alkalmazása. Az azbeszt két tulajdonságát használták itt ki, egyrészt a szálerősítéshez nagy szakítószilárdságát, másrészt a cementszemcsék megkötéséhez a nagy fajlagos felületét. Sok esetben a cellulózt alkalmazzák „gyártási szálként”,⁶ azaz a cementszemcsék befogására, megkötésére, másrészt „erősítő szálként”⁷ szerves szintetikus szálakat, ilyen például a poli-vinil-alkohol (PVA), a poli-akrilo-nitril, a poliamid, a polipropilén, a poliészter, ritkán az aramid, a szénszál.

15.2. Van-e jövője egy ilyen, ellentmondásokkal teli anyagnak?

A válasz nem egyszerű. Az azbesztek remek technológiai anyagok.

A helyettesítésükre használt anyagok (cellulózszál, kevlar, kőzetgyapot, üvegszál, wollastonit stb.) legtöbbször nem rendelkeznek az azbesztéhez hasonló szigetelőképesseggel, szakítószilárdsággal, rugalmassággal, vagy éppen megfelelően alacsony előállítási költséggel. Láttuk, hogy a különböző helyettesítő szálakat olykor kombinálni kell az azbeszt megfelelő kiváltásához. Emellett a helyettesítő anyagok egészségre gyakorolt hatása is sokszor kérdéses, és intenzív kutatások tárgya világszerte. Ahogyan az azbeszt elemi szálak, úgy sokszor a helyettesítő szálak is nanoanyagok, vagy éppen gyártásukkor keletkeznek nanoszálak (pl. para-aramid szálacskák a para-aramid szálak gyártása során). A nanoanyagok tekintetében épp a közelmúltban adott ki közös állásfoglalást az Európai Közösség (Joint EASAC-JRC Report, 2011), amelyben hangsúlyozzák, hogy bár a nanoanyagok előállításának és felhasználásának célja elsődlegesen az emberi élet minőségének javítása, és hihetetlen sebességgel fejlődik a nanotechnológia, rendkívül fontos a felhasználási biztonság (egészségre gyakorolt hatás, környezeti hatás az előállítástól a „hulladéklerakásig”) megfelelő, szabályozott nyomon követése is. Ez pedig komoly költ-

⁶ Angolul *process fibre*.

⁷ Angolul *reinforcement fibre*.

ségvonzatokkal jár: a nanotechnológia termékei ugyanis többnyire csak a legdrágább nanovizsgálati módszerekkel és műszerekkel vizsgálhatók megfelelő mélységben. Nanoanyagok használatánál mindig szem előtt kell tartani, hogy az ilyen anyagoknak hatalmas fajlagos felülete lehet, és ebből következően magas lehet a bioaktivitásuk is.

Az amfibolazbesztek erős egészségkárosító hatása tudományosan bizonyított. Közülük is kiemelkedően veszélyes a riebeckitazbeszt (kékazbeszt) és a gruneritazbeszt (amozit, barna azbeszt). **Ezen anyagok ipari használata mai ismereteink szerint tehát nem indokolt, nem várható.** Szerencsénk, hogy az amfibolazbeszt, már káros hatásának felismerése előtt is – geológiai okokból – csak a világ azbeszttermelésének 10–20%-át tette ki, tehát a 19–20. században környezetünkbe beépített azbesztnek csak kisebb része ennyire veszélyes. Óvatosságra int azonban, hogy már a bányászatkor is, és a feldolgozás során különösen keveredhetnek az azbesztek. Így minden alkalommal ellenőrizni kell a szerpentinazbesztet is, hogy nincs-e mellette, akár alárendelt mennyiségben, amfibolazbeszt is.

Ugyanakkor a krizotil, az ötven éve folyó tudományos kísérletek tanúsága szerint, **eleve sokkal kisebb egészségi kockázatot hordoz.** Az eltérés nem meglepő, ha tudjuk, hogy a krizotil egészen más vegyület, az amfiboloktól kémiaileg és szerkezetileg is gyökeresen eltér, hozzájuk kizárólag a szálas megjelenésben hasonló. Mindezek alapján – a szerzők véleménye szerint – nem zárható ki, hogy *megfelelő szabályok bevezetése mellett* a krizotil mint ásványkincs biztonságos és hatékony ipari alkalmazása egy-két évtized múlva visszaterjen. Ha ez felmerülne, a szabályozásoknak ki kellene terjedniük a porképződés minimalizálására a *kitermelés, feldolgozás, beépítés során,* a megfelelő ellenőrzésre a *használat alatt,* a megfelelő kezelésre a *bontás során,* és természetesen a biztonságos *újrahasznosításra* vagy *végelhelyezésre* is.

A krizotil alkalmazásának jövője nagyrészt azon tudományos kutatások eredményétől függ, amelyet ásványkutatók és orvosok végeznek együtt évtizedek óta, a 21. században immár a környezettudományi szakemberek együttműködésével.

Tudnunk kell azonban, hogy a kutatóktól „csak” a *tudományosan alátámasztott eredmények* remélhetők. Hogy ezek alapján megszületnek-e majd a szükséges *törvényhozási lépések,* az már egy másik sportágban dől el. Ott az lesz a kérdés, hogy képesek lehetnek-e egyáltalán a tudományos eredmények megmérkőzni a döntéshozó politikusokban a félelemmel hiszterizált, a tudományból kiábrándult, a természettudományos eredményeket is gyakran relativizáló közgondolkodásnak megfelelni akarással.

A képzett természettudományi szakemberek egyik kiemelt feladata a 21. században éppen az, hogy szakértelemmel párosuló felelősségvállalásukkal segítsék a szélesebb társadalmat és a politikusokat a jó döntések meghozatalában.

16. Irodalomjegyzék a második részhez

A komolyabb érdeklődésre számot tartó átfogó, monografikus munkákat vastag betűvel emeltük ki.

Asbestos and related mineral fibers: State of the science and mode of action, Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B, Critical Reviews (2011):14/4, 266 pp.

Bailey, S. W. (ed., 1988): Hydrous Phyllosilicates (Exclusive of Micas), Reviews in Mineralogy, 19, 725 pp.

Bandli, B. R., Gunter, M. E., Twamley, B., Foit, F. F., Cornelius, S. B. (2003): Optical, compositional, morphological, and X-ray data on eleven particles of amphibole from Libby, Montana, U.S.A., *The Canadian Mineralogist*, 41, pp. 1241–1253.

Baris, Y. I., Grandjean, P. (2006): Prospective study of mesothelioma mortality in Turkish villages with exposure to fibrous zeolite, *Journal of the National Cancer Institute*, 98, pp. 414–417.

Berry, G. (1991): Prediction of mesothelioma, lung cancer and asbestosis in former Wittenoom asbestos workers, *British Journal of Industrial Medicine*, 48, pp. 793–802.

Bognár L. (1995): *Ásványnevtár*, ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 345 pp. (<http://www.tankonyvtar.hu/geologia/asvanynevtar-080904-5>)

Bognár L. (1999): *Ásványhatározó, Második, átdolgozott és bővített kiadás*, ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 478 pp.

Bruni, B. M., Pacella, A., Mazziotti-Tagliani, S., Gianfagna, A., Paoletti L. (2006): Nature and extent of the exposure to fibrous amphiboles in Biancavilla, *Science of the Total Environment*, 370, pp. 9–16.

Burrigato, F., Comba, P., Baiocchi, V., Palladino, D. M., Simei, S., Gianfagna, A., Paoletti, L., Pasetto, R. (2005): Geo-volcanological, mineralogical and environmental aspects of quarry materials related to pleural neoplasm in the area of Biancavilla, Mount Etna (Eastern Sicily, Italy), *Environmental Geology*, 47/6, pp. 855–868.

Cappelletto, F., Merler, E. (2003): Perceptions of health hazards in the narratives of Italian migrant workers at an Australian asbestos mine (1943–1966), *Social Science and Medicine*, 56, pp. 1047–1059.

Carbone, M., Emri, S., Dogan, A. U., Steele, I., Tuncer, M., Pass, H. I., Baris, Y. I. (2007): A mesothelioma epidemic in Cappadocia: Scientific developments and unexpected social outcomes. *Nature Reviews Cancer*, 7, pp. 147–154. (doi:10.1038/nrc2068)

Carbone, M., Baris, Y. I., Bertino, B., Brass, B., Comertpay, S., Dogan, A. U., Gaudino, G., Jube, S., Kanodia, S., Partridge, C. R., Pass, H. I., Rivera, Z. S., Steele, I., Tuncer, M., Way, S., Yang, H., Miller, A. (2011): Erionite exposure in North Dakota and Turkish villages with mesothelioma, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS) Early Edition*, pp. 1–6. (internetes elérhetősége: <http://www.pnas.org/content/108/33/13618>)

Cardile, V., Lombardo, L., Belluso, E., Panico, A., Capella, S., Balazy, M. (2007): Toxicity and carcinogenicity mechanisms of fibrous antigorite, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 4/1, pp. 1–9.

Coombs, D. S., Alberti, A., Armbruster, T., Artioli, G., Colella, C., Galli, E., Grice, J. D., Liebau, F., Mandarino, J. A., Minato, H., Nickel, E. H., Passaglia, E., Peacor, D. R., Quartieri, S., Rinaldi, R., Ross, M., Sheppard, R. A., Tillmanns, E., Vezzalini, G.

- (1997): Recommended nomenclature for zeolite minerals: Report of the Subcommittee on zeolites of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names, *The Canadian Mineralogist*, 35, pp. 1571–1606. (internetes elérhetőség: <http://www.minsocam.org/msa/ima/ima98%2813%29.pdf>)
- Dódney I. (2007): Az ásványok reális szerkezetéről. MTA Doktori értekezés, ELTE TTK Ásványtani Tanszék, 140 pp.
- Dódney, I., Buseck, P. (2004): Serpentine Close-Up and Intimate: An HRTEM View, *International Geology Review*, 46, pp. 507–527.**
- Farkas, I. M., Weiszbürg, T. (2006): Ülepedő és szálló por ásványtani vizsgálata a romániai Kolozs megyéből, *Földtani Közlöny*, 136/4, pp. 547–572.
- Frank, K. (1952): Asbest, második, átdolgozott és kibővített kiadás, Becker & Haag, Hamburg, 234 pp.**
- Gianfagna, A., Oberti, R. (2001): Fluoro-edenite from Biancavilla (Catania, Sicily, Italy): crystal chemistry of a new amphibole end-member. *American Mineralogist*, 86, pp. 1489–1493.
- Gianfagna, A., Ballirano, P., Bellatreccia, F., Bruni, B., Paoletti, L., Oberti, R. (2003): Characterisation of amphibole fibres linked to mesothelioma in the area of Biancavilla, Eastern Sicily, Italy, *Mineralogical Magazine*, 67, pp. 1221–1229.
- Gianfagna, A., Andreozzi, G., Ballirano, P., Mazziotti-Tagliani, S., Bruni, B. M. (2007): Structural and chemical contrasts between prismatic and fibrous fluoro-edenite from Biancavilla, Sicily, Italy. *Canadian Mineralogist*, 45, pp. 249–262.
- Gibbons, W. (2000): Amphibole asbestos in Africa and Australia: geology, health hazard and mining legacy, *Journal of the Geological Society, London*, 157, pp. 851–858.
- Gunter, M. E., Belluso, E., Mottana, A. (2007): Amphiboles: Environmental and health concerns, pp. 453–516. In: Hawthorne, F. C., Oberti, R., Della Ventura, G., Mottana, A. (Eds.): *Amphiboles: Crystal chemistry, occurrence, and health issues, Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 67, Mineralogical Society of America and the Geochemical Society, Chantilly, Virginia.
- Guthrie, G. D., Mossman, B. T. (eds, 1993): Health effects of mineral dusts, *Reviews in Mineralogy*, 28, 584 pp.**
- Harangi Sz. (2011): *Vulkánok – A Kárpát-Pannon térség tűzhányói*, Geolitera, SZTE TTK Földrajzi és Földtani Tanszékcsoporthoz, Szeged, 440 pp.
- Hawthorne, F. C., Oberti, R. (2006): On the classification of amphiboles, *The Canadian Mineralogist*, 44, pp. 1–21.
- Hawthorne, F. C., Oberti, R., Della Ventura, G., Mottana, A. (eds, 2007): Amphiboles: Crystal chemistry, occurrence, and health issues, *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 67, 545 pp.**
- Hillerdal, G. (2004): The Swedish experience with asbestos: History of use, diseases, legislation, and compensation, *International Journal of Occupational and Environmental Health*, 10, pp. 154–158.
- Huntington, J. C., Ptasiński, J. J., Bunker, K. L., Strohmeier, B. R., Van Orden, D. R., Lee, R. J. (2008): A new method for fracturing mineral particles for cross-sectional FESEM analysis, *Periodico di mineralogia*, 77/2, pp. 43–50.
- IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Vol. 2, (1973): *Some Inorganic and Organometallic Compounds*, 181 pp. (internetes összefoglaló: <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol2/volume2.pdf>)

- IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Vol. 14, (1977): Asbestos, 106 pp. (internetes összefoglaló: <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol14/volume14.pdf>)
- IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Vol. 43, (1988): Man-made vitreous fibres and radon, 300 pp, ISBN 92 832 1243. (internetes összefoglaló: <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol43/volume43.pdf>)
- IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Vol. 68, (1997): Silica, some silicates, coal dust and para-aramid fibrils. IARCPress, Lyon, 506 pp. (internetes elérhetőség: <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol68/mono68.pdf>)
- IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Vol. 81, (2002): Man-made vitreous fibres, IARCPress, Lyon, 418 pp. (internetes elérhetőség: <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol81/mono81.pdf>)
- IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Vol. 100 (2012): Part C: Arsenic, Metals, Fibres, and Dusts. IARCPress, Lyon, 499 pp. (internetes elérhetőség: <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol100C/mono100C.pdf>)**
- IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Supplement 7 (1987): Overall Evaluations of Carcinogenicity: An updating of IARC Monographs Volumes 1 to 42, 449 pp. (internetes elérhetőség: <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/suppl7/Suppl7.pdf>)
- Joint EASAC-JRC Report (2011): Impact of engineered nanomaterials on health: considerations for benefit-risk assessment. EASAC Policy report No. 15 / JRC Reference Report EUR 24847 EN, 42 pp. (internetes elérhetőség: http://www.easac.eu/fileadmin/PDF_s/EASAC_Nanosafety_Report_WEB.pdf)
- Kincsem R., Opoczky L. (1982): Azbesztcement termékek gyártása és felhasználása, Építésügyi Tájékoztatási Központ, Budapest, 160 pp.
- Klein, C. (1993): Rocks, minerals and a dusty world, pp. 7–59, in: Guthrie, G. D., Mossman, B. T. (eds, 1993): Health effects of mineral dusts, Reviews in Mineralogy, 28, 584 pp.
- Koch S., Sztrókay K. I. (1986): Ásványtan I–II., Harmadik, javított kiadás, Tankönyvkiadó, Budapest, 936 pp. (<http://mek.oszk.hu/04700/04799/>)
- Leake, B. E., Woolley, A. R., Arps, C. E. S., Birch, W. D., Gilbert, M. C., Grice, J. D., Hawthorne, F. C., Kato, A., Kisch, H. J., Krivovichev, V. G., Linthout, K., Laird, J., Mandarino, J. A., Maresch, W. V., Nickel, E. H., Rock, N. M. S., Schumacher, J. C., Smith, D. C., Stephenson, N. C. N., Ungaretti, L., Whittaker, E. J. W., Youzhi, G. (1997): Nomenclature of amphiboles: report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names. The Canadian Mineralogist, 35, pp. 219–246.
- Leake, B. E., Wooley, A. R., Birch, W. D., Burke, E. A. J., Ferraris, G., Grice, J. D., Hawthorne, F. C., Kisch, H. J., Krivovichev, V. G., Schumacher, J. C., Stephenson, N. C. N., Whittaker, E. J. W. (2003): Nomenclature of amphiboles: additions and revisions to the International Mineralogical Association's 1997 recommendations. The Canadian Mineralogist, 41, pp. 1355–1362.
- Lee, R. J., Strohmeier, B. R., Bunker, K. L., Van Orden, D. R. (2008): Naturally occurring asbestos – a recurring public policy challenge, Journal of Hazardous Materials, 153, pp. 1–21.

- New York State Department of Health (Bureau of Environmental and Occupational Epidemiology, 2004): Investigation of cancer incidence among the Woodstock asbestos registry population, 24 pp. (internetes elérhetősége: <http://www.health.ny.gov/environmental/indoors/asbestos/docs/woodstockreport.pdf>)
- NIOSH (2011): **Asbestos Fibers and Other Elongate Mineral Particles: State of the Science and Roadmap for Research, Current Intelligence Bulletin, 62, 153 pp.** (DHHS (NIOSH) Publication No. 2011–159; internetes elérhetősége: <http://www.cdc.gov/niosh/docs/2011-159/pdfs/2011-159.pdf>)
- Nolan, R. P., Langer, A. M., Ross, M., Wicks, F. J., Martin, R. F. (eds, 2001): **The health effects of chrysotile asbestos. Contribution of science to risk management decisions, The Canadian Mineralogist Special Publication, 5, 304 pp.**
- OSHA ID-160: Asbestos in air – The collection of airborne asbestos fibers using calibrated sampling pumps with mixed-cellulose ester (MCE) filters and analysis by phase contrast microscopy (PCM), 20 pp. (T-ID160-FV-01-8807-PM, internetes elérhetősége: <http://www.osha.gov/dts/sltc/methods/inorganic/id160/id160.pdf>)
- Paoletti, L., Batisti, D., Bruno, C., Di Paola, M., Gianfagna, A., Mastrantonio, M., Nesti, M., Comba, P. (2000): Unusually high incidence of malignant pleural mesothelioma in a town of the eastern Sicily: an epidemiological and environmental study, *Archives of Environmental Health*, 55(6), pp. 392–398.
- Papp G. (1999): A zeolitásványok ajánlott nevezéktana, *Topographia Mineralogica Hungariae* 6, pp. 191–201. (internetes elérhetősége: <http://www.mineral.hermuz.hu/tmhpdf/tmh6c12.pdf>)
- Ross, C. S., Lockey, J. E. (1998): Health effects of man-made fibres. ILO Encyclopaedia of Occupational Health and Safety, 4. kiadás, 10. fejezet. (internetes elérhetőség: http://www.ilo.org/safework_bookshelf/english?d&nd=170000102&nh=0)
- Ross, M., Nolan, R. P. (2003): **History of asbestos discovery and use and asbestos-related disease in context with the occurrence of asbestos within ophiolite complexes. In Dilek, Y., Newcomb, S. (eds.): Ophiolite concept and the evolution of geological thought: Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper 373, pp. 447–470.**
- Sahai, N. (ed, 2007): Medical mineralogy and geochemistry. *Elements – An International Magazine for Mineralogy and Geochemistry*, 3/6 (pp. 369–440).
- Sahai, N., Schoonen, M. A. A. (eds, 2006): Medical mineralogy and geochemistry. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 64, 332 pp.
- Skinner, H. C. W., Ross, M., Frondel, C. (1988): **Asbestos and other fibrous minerals: Mineralogy, crystal chemistry and health effects, Oxford University Press, 204 pp.**
- Skotidakis, T. (2011): Presentation MABE ANKO. Az Észak-Görögországi Azbesztbánya (MABE) rehabilitációja – a Nyugat-Macedón Fejlesztővállalat (ANKO) ppt bemutatója
- SLIC (2006): Gyakorlati útmutató az azbeszttel járó kockázatok megelőzése vagy csökkentése érdekében követendő bevált gyakorlathoz a (potenciálisan) azbesztveszéllyel járó munkáknál – a munkáltatók, a munkavállalók és a munkaügyi felügyelők számára, A bevált gyakorlathoz szóló, nem kötelező érvényű útmutató. Európai Bizottság, a vezető munkaügyi felügyeleti tisztviselők bizottságának (SLIC) kiadása, 150 pp. http://www.omfi.hu/letolt/azbeszt_gyakorlati_utmutato.pdf

- Strohmeier, B. R., Huntington, J. C., Bunker, K. L., Sanchez, M. S., Allison, K., Lee, R. J. (2010): What is asbestos and why is it important? Challenges of defining and characterizing asbestos, International Geology Review, 52/7, pp. 801–872.**
- Szakáll S. (2005): Ásványrendszertan, Miskolci Egyetemi Kiadó, Miskolc, 336 pp.
- Szakáll S., Gatter I., Szendrei G. (2005): A magyarországi ásványfajok, Kőország Kiadó, Budapest, 427 pp.
- Van Orden, D. R., Allison, K. A., Lee, R. J. (2008): Differentiating amphibole asbestos from non-asbestos in a complex mineral environment, Indoor and Built Environment, 17/1, pp. 58–68.
- Van Orden, D. R., Lee, R. J., Allison, K. A., Addison, J. (2009): Width Distributions of Asbestos and Non-Asbestos Amphibole Minerals, Indoor and Built Environment, 18/6, pp. 531–540.
- Veblen, D. R. (ed., 1981): Amphiboles and other hydrous pyriboles: mineralogy, Reviews in Mineralogy, 9/A, 372 pp.**
- Virta, R. L. (2005): Mineral commodity profiles – Asbestos, USGS circular 1255-KK, 63 pp.
- Virta, R. L. (2011): Mineral commodity summaries – Asbestos, USGS circular.
- Von Lieberman, A., Rudnik, A. (2007): Utilisation of MABE Asbestos Mine as a disposal site for asbestos waste. Final report (task 3): Mine rehabilitation to accept asbestos wastes. LIFE 03 ENV/GR/000214 Project, 77 pp.
- West, N., Patrick, G. (2010): Sumas Mountain / Swift Creek, Asbestos Cluster Investigation, Environmental Epidemiology Division of Environmental Health, Washington State Department of Health (DOH 334-224 February 2010), 4 pp. (internetes elérhetősége: <http://www.doh.wa.gov/ehp/oehas/pubs/sumasepireport.pdf>)
- WHO (1997): Determination of airborne fibre number concentrations, a recommended method, by phase-contrast optical microscopy (a membrane-filter method), ISBN 92 4 154496 1, 53 pp.
- WHO (1999): Hazard prevention and control in the work environment: Airborne dust, Protection of the Human Environment, Occupational and Environmental Health Series, 224 pp. (internetes elérhetősége: http://whqlibdoc.who.int/hq/1999/WHO_SDE_OEH_99.14.pdf)
- Wroble, J. (2011): Environmental Monitoring for Asbestos: Sumas Mountain Asbestos Site, Selected Residential Properties, Bulk Sampling and Analysis, Activity Based Sampling, Surface Water Sampling, Whatcom County, Washington (August 23–26, 2010), United States Environmental Protection Agency Report, Revision 1.4., 133 pp. (internetes elérhetősége: http://www.epa.gov/region10/pdf/sites/sumasmountain/asbestos_monitoring_report_april2011.pdf)
- Zagas, T., Tsitsoni, T., Ganatsas, P., Tsakalimi, M., Skotidakis, T., Zagas, D. (2010): Land reclamation and ecological restoration in a marine area, International Journal of Environmental Research, 4/4, pp. 673–680.

17. Feladatok megoldása

Fajlagos felület: amfibolkristály és ugyanolyan térfogatú amfibolazbeszt szálköteg fajlagos felületének összevetése (1.1.)

A feladat megoldásához az amfibolkristály felülete (A_{kr}) és az egyedi amfibolazbesztszálak felülete (A_a) mellett ki kell számítanunk mindkettő térfogatát is (V_{kr} és V_a), hogy megtudjuk, egy kristálynyi térfogatban hány azbesztszál (n_a) van: $n_a = V_{kr}/V_a$.

Ennek alapján az azbeszt szálköteg felülete az $A_{ak} = n_a \times A_a$ képlettel számítható.

Az amfibolkristály felszíne:

$$A_{kr} = 2 \times a_{kr} \times a_{kr} \times \sin \varphi + 4 \times a_{kr} \times m_{kr} = \\ = 2 \times 0,5 \text{ cm} \times 0,5 \text{ cm} \times \sin 56^\circ + 4 \times 0,5 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} = 2,41 \text{ cm}^2 = 2,41 \times 10^8 \mu\text{m}^2$$

Az elemi amfibolazbeszt szál felszíne:

$$A_a = 2 \times a_a \times a_a \times \sin \varphi + 4 \times a_a \times m_a = \\ = 2 \times 0,2 \mu\text{m} \times 0,2 \mu\text{m} \times \sin 56^\circ + 4 \times 0,2 \mu\text{m} \times 1000 \mu\text{m} = 800,07 \mu\text{m}^2$$

Az amfibolkristály térfogata:

$$V_{kr} = a_{kr} \times a_{kr} \times \sin \varphi \times m_{kr} = 0,5 \text{ cm} \times 0,5 \text{ cm} \times \sin 56^\circ \times 1 \text{ cm} = 0,207 \text{ cm}^3 = \\ = 2,07 \times 10^{11} \mu\text{m}^3$$

Az elemi amfibolazbesztszál térfogata:

$$V_a = a_a \times a_a \times \sin \varphi \times m_a = 0,2 \mu\text{m} \times 0,2 \mu\text{m} \times \sin 56^\circ \times 1000 \mu\text{m} = 33,16 \mu\text{m}^3$$

Az elemi amfibolazbeszt szálak száma az amfibolkristálynyi térfogatban:

$n_a = V_{kr}/V_a = 2,07 \times 10^{11} \mu\text{m}^3 / 33,16 \mu\text{m}^3 = 6\,250\,000\,000$, azaz hatmilliárd-kettőszázötvenmillió azbesztszál „fér el” a fent megadott, viszonylag kicsiny kristálytérfogatban.

Az amfibolazbeszt szálköteg felszíne:

$$A_{ak} = n_a \times A_a = 6\,250\,000\,000 \times 800,07 \mu\text{m}^2 = 5,0004 \times 10^{12} \mu\text{m}^2$$

Az amfibolazbeszt szálköteg és a vele egyenlő térfogatú (és tömegű), egy darab amfibolkristály felületének aránya:

$$A_{ak}/A_{kr} = 5,0004 \times 10^{12} \mu\text{m}^2 / 2,41 \times 10^8 \mu\text{m}^2 = 20709,77,$$

azaz az azbesztszálak felülete több, mint 20 000-szerese az ugyanakkora térfogatú egykristályénak.

Azbeszt szálkötegek felépítése (1.2.)

Tételezzük fel, hogy mind az elemi szál, mind a szálköteg szabályos kör metszetű. A feladatot kétféleképp közelíthetjük meg.

1. Az első esetben a szálköteg metszetének területét osztjuk az elemi szál metszetének területével, ekkor figyelmen kívül hagyjuk, hogyan töltik ki a teret a kör átmetszetű elemi szálak, és felülbecsüljük a tényleges szálszámot.

$$\text{a) } A_a = r_a^2 \times \pi = (1 \mu\text{m})^2 \times \pi = 3,14 \mu\text{m}^2 = 314\,000\,000 \text{ \AA}^2$$

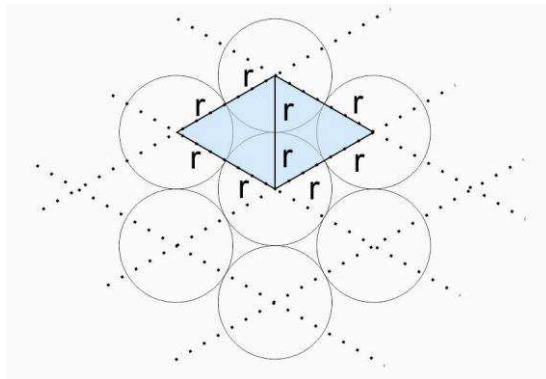
$$A_{ek} = r_{ek}^2 \times \pi = (100 \text{ \AA})^2 \times \pi = 31\,400 \text{ \AA}^2$$

$A_a/A_{ek}=10\,000$ db krizotil elemi szálból épül fel a $2\ \mu\text{m}$ átmérőjű azbesztszál (elhanyagolva a térkitöltést).

$$b) A_{epsz}=r_{ek}^2 \times \pi = (250\ \text{nm})^2 \times \pi = 196\,250\ \text{nm}^2 = 19\,625\,000\ \text{\AA}^2$$

$A_a/A_{epsz}=16$ db poligonális szerpentin elemi szálból épül fel a $2\ \mu\text{m}$ átmérőjű azbesztszál (elhanyagolva a térkitöltést).

2. A második esetben merev testekként képzeljük el a szálat, feltételezve, hogy összenyomhatatlanok, és köztük levegő van, miközben a lehető legszorosabban töltik ki a rendelkezésre álló kör átmetszetű (hengeres) teret. Ekkor az elemi szálak által ténylegesen elfoglalt terület modellezhető a **17.1. ábrán** látható kék rombuszsal.



17.1. ábra: A kék rombusz, átlósan, a pöttyözött vonalak mentén eltologatva teljesen lefedi a síkot. Benne pontosan egy kis kör van, amely négy (összesen 360° -nyi) körszeletből tevődik össze. A rombusz oldala $b = 2 \times r$, és két szabályos háromszögből tevődik össze. Területe

$$A_r = b \times m_b = 2 \times r \times 2 \times r \sin 60^\circ.$$

Az azbeszt szálköteg területe továbbra is:

$$A_a = r_a^2 \times \pi = (1\ \mu\text{m})^2 \times \pi = 3,14\ \mu\text{m}^2$$

Ezt osztjuk az elemi krizotilszálnak, illetve poligonális szerpentin szálnak megfelelő rombusz területével.

a) Elemi krizotilszálnál

$$A_r = b \times m_b = 2 \times r \times 2 \times r \sin 60^\circ = 4 \times r^2 \times \sqrt{3}/2 = 2 \times \sqrt{3} \times r^2 = 2 \times \sqrt{3} \times (0,01\ \mu\text{m})^2 = 0,00034641\ \mu\text{m}^2$$

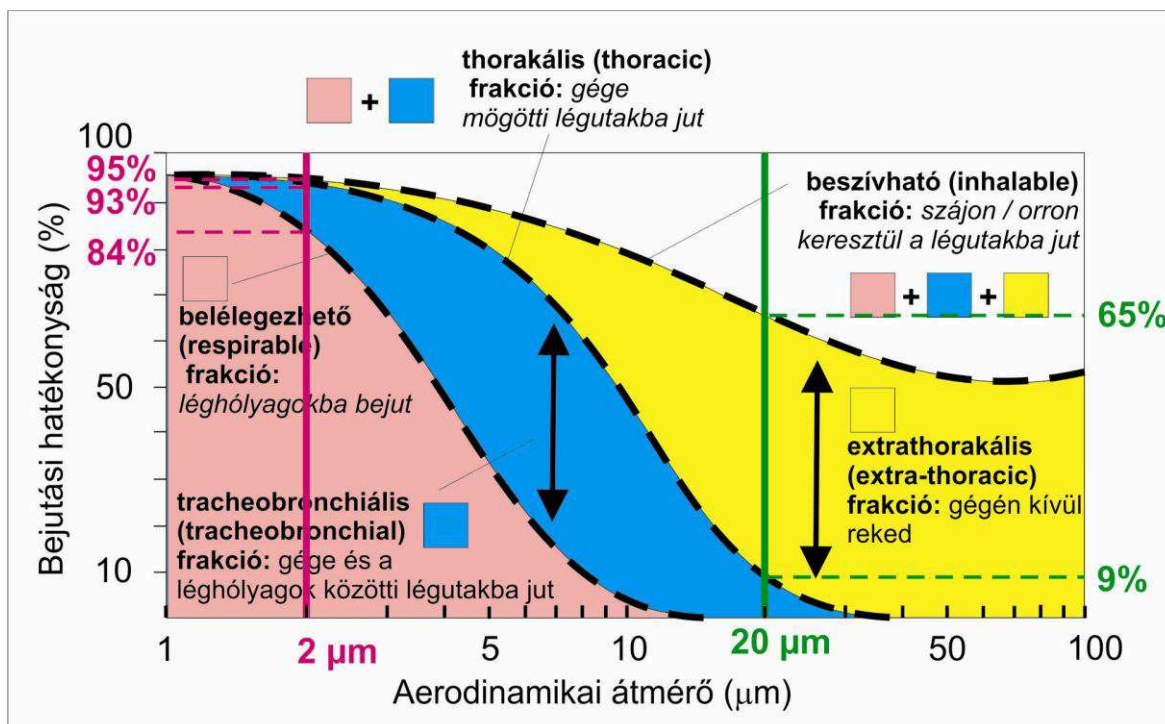
$A_a/A_r = 3,14\ \mu\text{m}^2 / 0,00034641\ \mu\text{m}^2 = 9068,99$, kerekítve 9069 rombusz fér el az azbeszt szálköteg felszínén, azaz ennyi krizotil elemi szál fér el a $2\ \mu\text{m}$ átmérőjű azbeszt szálkötegben. Ennek persze egy része töredék, a kör szélein kilógó töredék rombuszok miatt.

b) Poligonális szerpentin szálnál

$$A_r = b \times m_b = 2 \times r \times 2 \times r \sin 60^\circ = 4 \times r^2 \times \sqrt{3}/2 = 2 \times \sqrt{3} \times r^2 = 2 \times \sqrt{3} \times (0,25\ \mu\text{m})^2 = 0,21651\ \mu\text{m}^2$$

$A_a/A_r = 3,14\ \mu\text{m}^2 / 0,2165\ \mu\text{m}^2 = 14,51$, kerekítve 15 rombusz fér el az azbeszt szálköteg felszínén, azaz ennyi poligonális szerpentin szál. Ez a szám könnyen ellenőrizhető **7.12.b. ábrán**: 10 teljes poligonális szerpentin szál fért be a $2\ \mu\text{m}$ átmérőjű azbeszt szálkötegben, a töredékek pedig kb. 5 szálat adnak ki.

Porszemcsék tüdőbe jutásának hatékonysága a szemcseméret függvényében (1.3.)



17.2. ábra: 20 μm-es és 2 μm-es szemcsék bejutása a légzőszervrendszerbe

a) A 20 μm aerodinamikai átmérőjű szemcsék bejutásának vizsgálatához az ábrán függőleges egyenest (zölddel jelölve) húzunk a vízszintes tengely 20 μm jelzésénél. A vonal metszi a kék és a sárga mezőt.

A beszívható frakció, vagyis mindaz, ami bejut a légzőszervrendszerbe, jelen esetben a kék és a sárga mező együtt (rózsaszín nincs), a levegőben levő szemcsék 65%-a. A gégen túljutó (thorakális) szemcsék aránya (itt csak kék mező) mindössze 9%. Az extrathorakális frakció, a gégen túl nem jutó frakció pedig az előző kettő különbsége, 65%–9%=56%. Összességében elmondható, hogy a 20 μm-es, gömbölyű kvarcsemcsék nem jutnak messzire a légzőszervrendszerben: a levegőben levő részecskék 65%-a jut be, ebből 56% megreked a gégen kívül, a maradék 9% pedig nem jut le a légúti ágig.

b) A 2 μm aerodinamikai átmérőjű szemcsék bejutásának vizsgálatához az ábrán függőleges egyenest (rózsaszínnel jelölve) húzunk a vízszintes tengely 2 μm jelzésénél. Ez a vonal metsz egy vékony szakaszt a sárga mezőből, picit nagyobbat a kékből és legnagyobbbrészt a rózsaszín mezőben halad.

A beszívható frakció, vagyis mindaz, ami bejut a légzőszervrendszerbe, jelen esetben a kék, a sárga és a rózsaszín mező együtt, a levegőben levő szemcsék 95%-a!

A gégen túljutó (thorakális) szemcsék aránya (itt kék+rózsaszín mező) 93%. Az extrathorakális frakció, a gégen túl nem jutó frakció pedig az előző kettő különbsége, 95%–93%=2%. Ez azt jelenti, hogy a bejutó szemcsék nagy része túljut a szervezet első (lég)védelmi vonalán, a gégen.

A belélegezhető frakció, vagyis a szemcsék azon része, amelyik lejut a légúti ágokba, a rózsaszín mező, azaz 84%. A tracheobronchiális frakció, vagyis a szemcsék azon része, amely a gége és a légúti ágok közti légutakba jut el, a kék mező, 93–84%=9%.

c) Összevetve a 20 μm (rózsaszín vonal és leolvasási értékek) és a 2 μm (zöld vonal és leolvasási értékek) aerodinamikai átmérőjű szemcsék légzőszervrendszerbe jutását, a kö-

vetkezőket mondhatjuk: a nagy szemcsékből eleve sokkal kevesebb jut a szervezetbe (65%), mint a kicsikből (95%).

A bejutó nagy szemcsék főként a felső légutakban fogódnak be, a kis szemcsék döntő többsége (84%) viszont eljut a tüdő legmélyére, a gázcsere régiójáig, azaz a léghólyagokba. Mindezek alapján azt mondhatjuk, hogy a kis méretű szemcsék nagyobb kárt tudnak okozni, azaz veszélyesebbek az egészségre, mint a nagyobb szemcsék, mivel nagyobb arányban, és mélyebbre jutnak a légzőszervrendszerben, mint a nagyobb társaik.

Azbesztszálakra vett levegőminta kiértékelése fáziskontrasztos mikroszkópiával (PCM). (1.4.)

A 200 számolómező (Walton-Beckett mező) területének aránya a hasznos filter felületéhez:

$r_{WB}=50 \mu\text{m}$ a számolómező sugara, A_{WB} a számolómező felülete

$A_f=385 \text{ mm}^2$, a filter hasznos felülete az OSHA ID-160 módszer szerint.¹

A_m a teljes elemzett felület (200 mező területe)

$$\begin{aligned} A_m/A_f &= (200 \times A_{WB})/A_f = (200 \times r_{WB}^2 \times \pi)/A_f = \\ &= (200 \times (0,05 \text{ mm})^2 \times 3,14)/385 \text{ mm}^2 = 0,0041 = 0,41\% \end{aligned}$$

A ténylegesen elemzett filterterület tehát a teljes filterterület kevesebb, mint fél százaléka, igen kicsinek tűnő szám! Mivel azonban a filter borítottsága egyenletes, az eredmény megbízható. A mezőket a számlálásnál emellett úgy kell kiválasztani, hogy nagyjából a teljes filteren végighaladjon a vizsgáló, és a minta közepe és a szélre eső részek is megfelelően képviselve legyenek.

A levegőminta rostkoncentrációjának meghatározásához először számítsuk ki az átszívott levegő térfogatát:

$$V = v \times t = 6 \text{ l/perc} \times 150 \text{ perc} = 900 \text{ l} (= 900 \text{ dm}^3 = 900\,000 \text{ cm}^3).$$

A koncentráció meghatározásához használt további adatok:

$$N = 36 \text{ rost}$$

$$n = 200$$

$$A_{WB} = 0,00785 \text{ mm}^2 \text{ (a számolómező területe)}$$

$$A_f = 385 \text{ mm}^2$$

$$\begin{aligned} C &= (N \times A_f) / (V \times n \times A_{WB} \times 1000) = (36 \text{ rost} \times 385 \text{ mm}^2) / (900 \text{ dm}^3 \times 200 \times 0,00785 \text{ mm}^2 \times 1000) = \\ &= 0,009809 \text{ rost/cm}^3. \end{aligned}$$

A mértékegységek közti kavarodás zavaró lehet, éppen ezért a számolást a józan paraszti ész alapján is ellenőrizhetjük, a következőképp:

A számolt szálmennyiséget, amely a leszámolt mezők területére vonatkozik, a teljes filterterületre kell vonatkoztatnunk (normálnunk), így kapjuk meg a filter területén levő teljes szálmennyiséget. A kapott értéket elosztva a teljes átszívott levegőmennyiséggel megkapjuk az átszívott levegő rostkoncentrációját.

¹ A filter teljes felülete: $r_f^2 \times \pi = (12,5 \text{ mm})^2 \times 3,14 = 490,625 \text{ mm}^2$. A hasznos sugár kiszámítható a hasznos felületből: $r_f = \sqrt{(A_f/\pi)} = \sqrt{(385 \text{ mm}^2/3,14)} = 11,07 \text{ mm}$. Ilyen sugarú kör területén keresztül szívja a levegőt a mintavevő készülék. Ebből következik, hogy $12,5 \text{ mm} - 11,07 \text{ mm} = 1,43 \text{ mm}$ vastag gyűrűt takar ki a filter területéből a filtertubus.

$$C = (N / (n \times A_m) \times A_f) / V = (N \times A_f) / (n \times A_m \times V) = \\ = (36 \text{ rost} \times 385 \text{ mm}^2) / (200 \times 0,00785 \text{ mm}^2 \times 900 \text{ dm}^3) = 9,809 \text{ rost/dm}^3 = 0,009809 \text{ rost/cm}^3.$$

A mért koncentráció megítéléséhez, mivel azbesztmentesítésről van szó, a tisztasági határértéket ($0,01 \text{ rost/cm}^3$) kell figyelembe venni. Látjuk, hogy éppen e határérték alatt vagyunk, az ilyen esetekben különösen fontos a végső értékeléshez a hiba kiszámolása is.

A mérés hibáját a szálszámolási hiba ($N=36 \pm 2$ rost) továbbgörgetésével kapjuk, számoljuk ki tehát C-t 34 és 38 szálra is:

$$C_{N=34} = 0,00926 \text{ rost / cm}^3$$

$$C_{N=38} = 0,01035 \text{ rost / cm}^3$$

A mérés hibája (*err*) tehát: $err = C_{N=38} - C_{N=36} = C_{N=36} - C_{N=34} = 0,000545$.

Az eredmény helyes megadása ennek megfelelően: $C = 0,009809 \pm 0,000545 \text{ rost/cm}^3$.

Végső értékelésként azt mondhatjuk tehát, hogy mérési hibán belül a kapott eredmény meghaladja a tisztasági határértéket, azaz a terület egy második, alapos takarítására (szakember által végzett, elszívós portalanítására) van szükség.