

# A savas eső

## 1. A savas eső környezeti hatása

### 1.1. Bevezetés

1.2. A természetes légkör kémiája, különös tekintettel a savas esőre

1.3. A csapadék keletkezése, különös tekintettel a savas esőre

1.4. A kénsav és a salétromsav keletkezése a légkörben

1.5. Mennyire savas az eső?

1.6. A savas eső hatása

1.6.1. Közvetlen hatás

*1.6.1.1. A növényekre gyakorolt közvetlen hatás*

*1.6.1.2. A folyók és tavak egyéb élőlényeire gyakorolt közvetlen hatás*

1.6.2. Közvetett hatás

*1.6.2.1. A tavi élővilágra gyakorolt hatás*

*1.6.2.2. A gyeptársulásokra gyakorolt hatás*

*1.6.2.3. A talajra gyakorolt hatás*

*1.6.2.4. Az erdőre gyakorolt hatás*

1.7. A savas eső leküzdése

1.8. Összegzés

2.1. A légköri savasodást okozó vegyületek, valamint a nehézfémek koncentrációja és ülepedése Európában

2.2. A légköri kén- és nitrogénvegyületek

2.3. A légköri savasodás hazánkban

2.4. A légköri nehézfémek

# A savas eső

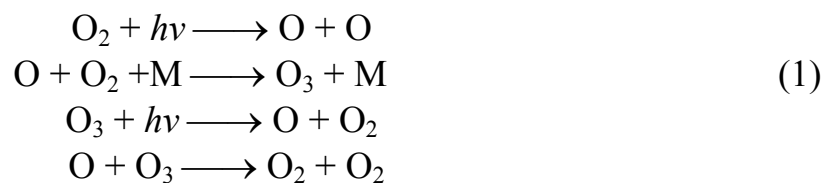
## 1. A savas eső környezeti hatása

### 1.1. Bevezetés

- 1970-es évek vége: a „savas eső” fogalma bekerül a köztudatba erdőpusztulás → az egész bioszféra megmérgezésének veszélye
- 1977: Science Citation Index: a „savas eső” tárgyszónál nincs egyetlen cikk sem  
1986: kb. 6.000 db cikk van
- savas eső: az emberi tevékenység – elsősorban a fosszilis tüzelőanyagok elégetése által okozott légszennyezettség – eredményeképpen hulló erős savakat (kénsavat és salétromsavat) tartalmazó eső.

### 1.2. A természetes légkör kémiája, különös tekintettel a savas esőre

- Az ózon a molekuláris oxigénből – a Naptól érkező ultraibolya sugárzás hatására – fotodisszociáció révén keletkezik. *Legegyszerűbb teljes fotokémiai ciklusát* a Chapman-formulák mutatják be:



A reakció nemcsak fény hatására játszódik le, hanem más molekulákkal való ütközéskor is.

- $\text{O}_2$ : reaktív elem  
 $\text{O}_3$ : az  $\text{O}_2$ -nél is sokkal agresszívabb  
Az ózon erősen oxidáló hatású. Az élő szervezetektől oxigént von el ⇒ mérgező
- Ha az oxigénatom vízmolekulával ütközik ⇒ hidrogén-peroxid ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) keletkezik.



A hidrogén-peroxid fotolízise az egyik legreaktívabb vegyület, a hidroxil-gyök létrejöttéhez vezet:



A hidroxil-gyököt a légkör csupán  $10^{-12}$  arányban tartalmazza, de van utánpótlása + a szennyezett levegőben intenzívebben képződik.

- A légkör egy erősen oxidatív reakcióközeg, amely állandóan készen áll arra, hogy a beléje kerülő anyagokat oxidálja.
- $\text{CO}_2$ : savanhidrid,  $V_{\text{CO}_2} \approx 1\%$ . A légköri víz, a felhő- és esőcseppek pH-ja ennél a parciális széndioxid-nyomásnál telített állapotban 5,6-5,7. Ez a természetes eső pH-ja.  $\longleftrightarrow$  Az esőcseppbe a talajfelszínen bekerülhetnek pozitív ionok ( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{K}^+$ ) és a légkörben természetes forrásból (klorid, a kén és a nitrogén oxidjai  $\Rightarrow$  oxidálódnak savanhidridekké, utána vízzel savakká alakulnak.  $\Rightarrow$  az esővíz pH-ja változhat.
- A kén-dioxid és a nitrogén-oxidok forrásai:  
 $\text{SO}_2$ : vulkanizmus, ipari tevékenység  
 $\text{NO}_x$ : biológiai bomlás, a talajlakó mikroorganizmusok anyagcseréje, a trópusi esőerdők [talajuk aerob mikroorganizmusai az összes légköri  $\text{NO}_x$  40 %-át adják (új)], villámlás [az összes légköri  $\text{NO}_x$  50 %-ával (új)]  $\longleftrightarrow$  a nitrogén biológiai körforgalom is lehet sokkal élénkebb a ma ismertnél (a N nemcsak oxidként, hanem  $\text{NH}_3$  és  $\text{NH}_4^+$  ion formájában is bejuthat a légkörbe)
- A légkörből
  - (a) a por kiülepszik
  - (b) a víz kicsapódik
  - (c) a reakcióképes, vagy vízdékony gázok kimosódnak
  - (d) száraz ülepedés: valamely komponens nem a csapadékkal távozik el a légkörből

$\Rightarrow$  állandó öntisztulás a légkörben  $\Rightarrow$

  - (1) a vízdékony szennyezőanyagok legfeljebb egy hétig tartózkodnak a légkörben,
  - (2) A légkörbe kerülő szennyezőanyagok hatótávolsága mindössze pár száz km;

### 1.3. A csapadék keletkezése, különös tekintettel a savas esőre

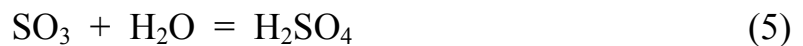
- A csapadékban oldott anyagok mennyisége a következő tényező függ:
  - (1) az oldható anyagok koncentrációja,
  - (2) az oldható anyagok oldottsági foka (ez általában fokozza az oldhatóságot),
  - (3) a felhőcseppek élettartama és
  - (4) a hőmérséklet.
- Mivel a jég oldó kapacitása kisebb, mint a túlhűlt vizé, a benne oldott gázok mennyisége kisebb. Ha magas a felhő és intenzív belső mozgása van (pl. zivatarfelhőkben) az oldási és a folyadékfázisú oxidációs folyamatok élénkebbek és tovább tartanak.
- A felhők általában savasabbak, mint az eső. Ok: bár a fejlődő esőcseppek tovább savasodnak, a cseppnövekedéssel járó vízfelvétel révén a savkoncentráció csökken  $\Rightarrow$  az eső savasabb, mint a hó, s nyáron a zivatar savasabb, mint a csendes eső.
- Az eső pH-ja nem egyenes függvénye a savtartalomnak. Ok: a kondenzációs magvak disszociábilis kationjai közömbösítő hatásúak. Ha elég kationt tud leadni a kondenzációs mag, még viszonylag nagy savtartalom esetén sem lesz túl savanyú a pH.
- A levegőbe jutó szerves anyagok is oxidálódhatnak, reagálhatnak egymással és a szervetlen anyagokkal, s a végtermékek is újabb reakciókat indíthatnak el, mind gáz-, mind vízfázisban.

## 1.4. A kénsav és a salétromsav keletkezése a légkörben

- A természetes eső pH-ját a kénsav és a salétromsav csökkenti a legnagyobb mértékben. (Az átlagos savas esőben a sav kétharmada kénsav, egyharmada salétromsav.) E két sav (pontosabban az ezeket képező oxidok) az antropogén légszennyezés legjelentősebb komponensei. Az ózomból keletkező oxigénatom (O) a kén-dioxidot a kénsav anhidridjévé, kén-trioxiddá oxidálja:



Ebből vízfelvétellel keletkezik a kénsav:



A szabad oxigénatom a kénessavat is megtalálja:



A kén-dioxid egy molekula hidrogén-peroxiddal közvetlenül is kénsavvá alakulhat:



- (1) Ha a kénsav a gáz fázisban keletkezik, cseppecskékké állhat össze.
- (2) Többnyire rögtön megköti az ammóniát.
- (3) Mivel igen higroszkópos, kondenzációs magként is funkcionálhat.
- (4) Reaktivitása ellenére gyakori a kénsav ún. száraz ülepedése. Ez fokozza károsító hatását.
- (5) A kén-dioxid reakciói főként a vizes fázisban játszódnak le.

- A nitrogén-oxidok még többféle reakcióban vehetnek részt, köztük lánreakciókban is. A nitrogén-dioxidot a fotolízis fölbonthatja:



Ha OH-gyökkel ütközik, közvetlenül salétromsavvá alakul:



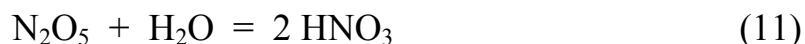
Nitrogén-trioxiddá is alakulhat egy oxigénatommal:



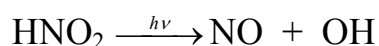
Ez reagálhat egy másik nitrogén-dioxid molekulával:



A keletkezett nitrogén-pentoxid vízzel salétromsavat hoz létre:



A salétromossav is átmehet fotolízisen:



⇒ A nitrogén-oxidok maguk is kiváltják oxigénatomok keletkezését ⇒ erősen megnövelik a légkör oxidatív kapacitását. ennek esélyét az, Mivel a nitrogén-oxidok rosszul oldódnak vízben, ez tovább fokozza oxidatív kapacitásukat.

## 1.5. Mennyire savas az eső?

1974. Skócia: csapadék pH: 2,4 (mint az ecet)

Los Angeles: csapadék pH: 2 (mint a citromlé)

- A légkörbe kerülő kénnek csak a fele antropogén eredetű, a veszélyt mégis ez jelenti.

Ok:

- (a) a kén koncentrált keletkezése és lecsapódása,
- (b) a sűrűn lakott területekkel való kapcsolata.

- Az összes antropogén kén-dioxid fele az északi féltekén keletkezik, s ennek 80 %-a itt is csapódik le. A grönlandi jégtakaró szulfáttartalma 1900 – 2000 között a háromszorosára nőtt. A nitráttartalom növekedése később kezdődött, de erőteljesebb: 1955 – 2000 között megháromszorozódott. Becslések szerint évente több száz millió tonna kén kerül a Föld felszínéről a légkörbe és vissza.

- Az antropogén eredetű SO<sub>2</sub> fő forrásai: (1) erőművek, (2) háztartási fűtés;

Ok:

- (1) széntüzelés (kéntartalma 1-5 %),
- (2) fűtőolaj és a diesel-olaj használata (kéntartalma 0,3-0,5 %).

- A légkörben lévő salétromsav kb. fele a kénsavnak. Jelentős az antropogén eredetű ammónia is a légkörben. Az iparosítás előtt a csapadékban az

$$\frac{NH_4^+}{NH_4^+ + NO_3^-}$$

arány 0,7 volt, ma már csak ennek a fele.

Ok:

Az ammónia fő forrása a természet, a nitrátoké viszont az ipar, illetve a gépjárművek kipufogógázai. (Ha a gépjárművek sebessége 60 km/órától 90 km/óra-ra nő, nitrogén-oxid kibocsátásuk megkétszereződik, 120 km/órás sebességnél megnégyszereződik.) A talajból származó nitrogén-oxidok nem mind természetes eredetűek. A helytelen műtrágyázás is közrejátszhat keletkezésükben.

- Szulfát-nitrát arány a levegőben; USA – Kína

*(1) Kínában jóval nagyobb a csapadék szulfáttartalma, mint az USA-ban.*

Ok:

A kínai lakásokban leggyakoribb a szénfűtés [a kínai szenek magas kéntartalmúak – főként délen (5 %)].

*(2) Kína levegőjében kevesebb a nitrát.*

Ok:

Kínában kevesebb a gépjármű. ←--→ Pekingben és Sanghajban az USA-hoz közelítő nitrát-értékek találhatóak. Ez a különbség a Kínában rohamosan növekvő gépjárművek számával fokozatosan csökken.

A kínai csapadék mégsem túl savanyú. (Délen az esővíz pH-ja 4-5 közötti, északon 6,5 körüli.)

Ok:

(a) Kína légterébe igen sok ammónia ( $\text{NH}_3$ ) kerül a rizstermesztés és a szerves trágya elterjedt alkalmazása miatt,

(b) a kínai porban több a mész ( $\text{CaCO}_3$ ), mint az amerikaiban.

Ha e kompenzáló körülmények nem lennének, az eső pH-ja 3.5 lenne.

A két fő komponens (szulfátok és nitrátok) aránya hatással van az egyéb légköri vegyületekre is. Pl. ha csökken a kén-dioxid kibocsátás  $\Rightarrow$  a nitrogén-oxidok miatt megnő a levegőben az oxigén-gyökök (szabad oxigénatomok) mennyisége  $\Rightarrow$  fokozódik a szerves gázok oxidálása  $\Rightarrow$  több veszélyes anyag keletkezhet, mintha nem szabadultunk volna meg a kén-dioxidtól.

Paradoxon: a légtisztítás is fokozhatja a savasságot. Ha ugyanis a füstgázokból leválasztják a port, illetve a szálló hamut, olyan anyagot vonnak ki, amely savlekötő hatású a benne lévő fémek miatt.



## 1.6. A savas eső hatása

- A kártétel sem időben, sem térben nincs szoros kapcsolatban a szennyezéssel. Ipari aktivitás kára → mezőgazdasági területek, erdők. A kár sokszor csak évek elteltével mutatkozik, az ártalmatlan anyagok fokozatos felhalmozódása után, amikor a kibocsátás esetleg már meg is szűnt.

- A savas eső kártételeinek előrejelzése

Bonyolult.

Ok:

A közvetlen ok-okozati viszony nem állapítható meg egyértelműen.

*A szulfát szennyezettség előrejelzése:*

előnye

- (1) a kémiai reakciók  
viszonylag egyszerűek,

hátránya

- (1) a pontos terjedési és lecsapódási  
mechanizmusok nem ismeretesek  
(2) számos körülmény befolyásolja őket

Hatékony előrejelzési módszer: a radioaktív nyomjelzés.

*A kéndioxid-szennyezettség alakulása:*

zuzmótérképezéssel követhető.

- A hatásból nem lehet következtetni a szennyezőkre.

Ok:

Több komponens esetén az eredő hatás nem mindig a tényezők külön-külön hatásának az összege.

Két légszennyező anyag, A és B hatása együttesen lehet

- (1) additív, amikor  $AB = A + B$ ,  
(2) szinergisztikus, amikor  $AB > A + B$  és  
(3) antagonisztikus, ha  $AB < A + B$ .

Kimutatták, hogy ha az ózon és a kén-dioxid koncentrációja külön-külön a látható kártételhez szükséges mértéket

- (a) nem érik el, akkor együttes hatásuk szinergisztikus,
- (b) ha eléri, vagy épp meghaladják, akkor együttes hatásuk additív,
- (c) ha mindkettőnek magas a koncentrációja, akkor együttes hatásuk antagonisztikus.

A gyakorlatban általában az első esetről van szó, azaz nincs ugyan számottevő károsító koncentráció, de mivel több komponens van jelen, együttes hatásuk fölerősödik.

- A károsítás lehet

- (a) *közvetlen* – a csapadék vagy a száraz ülepedés útján érkező szennyezőanyag áttétel nélkül fejt ki hatását,

Pl. Az épületek és szobrok károsodása. Leggyakoribb formája a mészkő és a márvány szulfátos mállása. A



reakcióban gipsz keletkezik, amely gyorsan elmállik.

- (b) *közvetett* – az élő és élettelen környezet megváltozása károsít;

Pl. Az USA-ban az idő előtti halálozások 1-4 %-áért a savas eső a felelős (áttételes becslés).

Legtöbbször (a) és (b) kombinációja fordul elő.

## 1.6.1. Közvetlen hatás

### 1.6.1.1. A növényekre gyakorolt közvetlen hatás

#### (1) Az ózon hatása:

A növények a leveleiken keresztül veszik föl az ózont → a sejtekbe jutva a fotoszintetikus apparátust támadja meg. A fő reakció a *lipid peroxidáció*. Romboló hatású gyökös láncreakciók → a levél tönkremegy.

- (a) A levelek közül azok a legsérülékenyebbek, amelyekben a legintenzívebb a fotoszintézis.
- (b) A fiatal és idős levelek ellenállóbbak az ózon károsító hatásával szemben.
- (c) A közvetlen kár arányban áll a levelek nedvesíthetőségével.

#### (2) (túl)táplálás:

Ha a természetes tápanyagforrások a nitrátból – mint növényi tápanyagból – telítettséget vagy ehhez közeli állapotot biztosítanak (ez főként a hűvösebb erdőkben gyakori) → a savas eső okozta túltrágyázás megárt nekik.

### 1.6.1.2. A folyók és tavak egyéb élőlényekre gyakorolt közvetlen hatás

A tavakban koncentrálódhatnak a vízgyűjtő területekről származó szennyezőanyagok.

#### Példák:

- (a) 1970 – Kanada: a Sudbury-kohóművek körüli tavak vizének pH-értéke helyenként 4,5 alá csökkent.
- (b) 1882-1976 – Csehszlovákia: az Elba vizének klorid- és a szulfáttartalma négyszeresére, a nitráttartalma hétszeresére nőtt, míg a hidrokarbonát tartalom kétharmadára esett vissza – ez utóbbi hátrányos a vízinövények tápanyagellátása szempontjából.

## 1.6.2. Közvetett hatás

### 1.6.2.1. A tavi élővilágra gyakorolt hatás

- (1) mérgező ionok
- (2) a pH-csökkenése.

Kísérlet során egy kis tó vizének pH-értékét 8 év alatt 6,8-ről 5,0-re csökkentették ⇒ az élővilág szegényebbé vált.

- (a) 5,8-es pH értéknél kipusztultak a pisztrángok fő táplálékhalai.

Ok:

A planktonflóra és a tápláléklánc erre épülő fokozatainak megváltozása.

- (b) 5,4-es pH-értéknél már egyetlen halfaj sem képes szaporodni.
- (c) Ha a víz pH-értéke 5,4 alá csökkent, a tóban már csak lesóványodott, elvénült halak maradtak a tóban.

### 1.6.2.2. A gyeptársulásokra gyakorolt hatás

Már az enyhe savas eső is megváltoztatja a tárulások fajösszetételét.

Ok:

A savas eső előidézte "műtrágyázás" hatására a gyorsabb növekedésre képes fajok elterjednek a többi rovására.

### 1.6.2.3. A talajra gyakorolt hatás

- A talaj folyamatainak intenzívebb vizsgálatát ösztönözte
  - (1) a Németországban az 1970-es évek közepén megfigyelt erdőpusztulás,
  - (2) a mezőgazdasági kultúrákat is érzékenyek a savas esőre. A mezőgazdaság közvetlenül is hozzájárul a talaj savanyításához a műtrágyák nitrát-, foszfát-, klorid- és szulfátbevitelének révén.
- A természetes talajnedvességben általában erősen pozitív kationokkal ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ) gyengébb anionok (főként hidrokarbonát és kevés szerves sav) tartanak egyensúlyt. A kationok elsősorban a talaj anyaközetéből oldódnak ki.

- A talajok jellemezhetők az ún. savközömbösítő kapacitással, amely kifejezhető a 4.5-es referencia pH-ig való titráláshoz szükséges erős savmennyiséggel. A savközömbösítő kapacitás erősen függ a talaj alatti anyakőzettől. Ha ez (pl. gránit, kvarcit, kvarchomokkő) nem tud kationokat adni, akkor kationcsere sem lehetséges  $\Rightarrow$  csökken a talajban a savlekötő kationok mennyisége.
- A kationcsere-képesség sem mindig pozitívum. A talajásványokat alkotó elemek közt rendkívül elterjedt az alumínium, amelyet az erős savak számos vegyületéből képesek felszabadítani.
  - (a) 5,5 pH érték alatt kioldódnak az alumínium-ionok,
  - (b) 4,5 és 5,0 pH értékek között az alumínium a konzervatív (nem reagáló) formából átmegey a non-konzervatív (reagáló) formába  $\Rightarrow$  egy igen mérgező anyag kerül korlátlan mennyiségben a talajba.
- A talaj savközömbösítő kapacitásához nemcsak a növényzet is hozzájárul. A növények főként a nitrát-, kevésbé a szulfát-ionokat is képesek fölvenni, s ezzel a talajból kivonni.
- Mivel az erős savak a talaj kationjaival jól oldható vegyületeket képeznek, elegendő talajnedvesség hatására megtörténhet a kimosódás  $\Rightarrow$  egy idő után a belépő savak már nem találhatnak semlegesítő kationokat, ennél fogva fellép a drasztikus pH-csökkenés.
- A talaj savasságát fokozzák a protont termelő ( $H^+$  atommag) folyamatok:
  - (1) savak bevitele,
  - (2) kationok kivonása (növényi asszimiláció vagy kimosódás),
  - (3) anionok mineralizációja a szerves anyagok bomlása során,
  - (4) gyenge savak disszociációja,
  - (5) oxidációs reakciók,
  - (6) kationok kicsapódása oldhatatlan formában és
  - (7) aniontermelő közetmállási folyamatok.

- (a) e folyamatok mind reverzibilisek, s egymással bonyolult kölcsönhatásban állnak. A savas eső a fennálló egyensúlyokat durván megbonthatja.  $\Rightarrow$  fölborul a talaj lényegi alkotóelemeit képező mikroorganizmusok egyensúlya.
- (b) A szimbiózisban élő magasabb rendű növényeket súlyosan érintheti, ha mikroszkopikus partnereiktől nem kapják meg a csak tőlük megkapható tápanyagokat.
- (c) Általában a talajszemcsék is pozitív felszíni töltéssel rendelkeznek. Ha e töltést a savbevitel semlegesíti  $\Rightarrow$  a talaj termékenysége jelentősen csökkenhet.

#### ***1.6.2.4. Az erdőre gyakorolt hatás***

- Először az 1970-es évek közepén Németországban figyeltek föl arra, hogy nagy fenyőerdők egyik évről a másikra pusztulni kezdtek. Ma már szinte egész Európában észlelik e jelenség többé-kevésbé súlyos formáját. Angliát megkímélte az erdőpusztulás, ugyanakkor a svédországi károkért főleg az angliai légszennyezést okolják. Magyarországon volt az egyik legnagyobb lombosfa-pusztulás. 1,0-1,5 millió m<sup>3</sup> tölgyfa száradt ki az 1980-as évek végén.

Okok: – bizonytalanság,

A pusztuló erdők gyakran távol fekszenek a szennyező forrásoktól, s nem is mindig részesülnek ártalmas mennyiségűnek tartott savas esőből  $\Rightarrow$

- (a) fafajonként eltérőek az érzékenység szintjei,
- (b) az ártalmakat komplexitásukban kell vizsgálni.

elsődleges tényező: a savas eső.

károsító hatás:

- (1) az általános stressz következtében lecsökken az asszimiláció, s vele a szénhidrátképzés  $\Rightarrow$  az éhezés öli meg a fákat,
  - (2) a talaj savanyodása miatt a talajnedvességbe kerülő alumínium-ionok károsítanak,
  - (3) az ózon és a kén-dioxid közvetlen károsítja a levélzetet,
  - (4) a talajból történő ionkimosódás magnéziumhiányt idéz elő  $\Rightarrow$  elpusztulnak a fák, (minden klorofilmolekula tartalmaz egy magnézium atomot),
  - (5) a fák a nitrogén-túltrágyázásnak esnek áldozatul.
  - (6) bizonyos légszennyező anyagok növekedésszabályozó aktivitása fölborítja a fák életfolyamatainak egyensúlyát (feltételezés),
  - (7) a fák szárazságtűrő képessége a kritikus szint alá süllyed,
  - (8) a savas esők visszavetik a fák télállóságát: a fenyők a télre való felkészülés során csökkentik tűleveleik víztartalmát. (A koncentrált nedv nehezebben fagy meg.) E koncentrációra a fiziológiai "parancs" a gyökerekből jön, amikor a lehülés miatt csökken a szimbióta mikroorganizmusok által a gyökereknek átadott nitrogéntartalmú tápanyagok mennyisége. A savas eső nitrogénvegyületei azonban a levélbe jutva mérséklék a gyökerekből jövő utánpótlás csökkenését. Így a fa nem készül föl a télre, s a fagy elpusztíthatja.
  - (9) a károsodás a gyorsabb öregedésben nyilvánul meg (feltételezés).
- Vannak, akik megkérdőjelezzik az erdőpusztulás és a savas eső kapcsolatát.  
 $\rightarrow$  Kimutatták, hogy a szennyező források közelében élő városi fák nem mutatják az erdőpusztulás tüneteit.

## 1.7. A savas eső leküzdése

- Az üzemek és erőművek füstjeinek környezeti ártalmaira az 1960-as évek elején figyeltek föl.

### Hogyan oldják meg a problémát?

A szálló portól megtisztítják a füstöt, a mérgező gázokat magas kéményeken át a légkörbe bocsátva felhígítják.

1955 – USA: csak két kémény volt 180 m fölötti magasságú,

2000 – USA: már minden kémény magasabb 180 m-nél, s nem ritka a 300 m fölé nyúló kémény sem.

⇒ a helyi problémák regionálissá váltak.

⇒ más módokat kellett keresni a savas eső leküzdésre.

### Megoldás:

(1) *A hatás közömbösítése*

#### Hogyan?

(1a) A talaj meszezésével – mészkőpor kiszórásával. Ez csökkenti a savasságot, a káros anionok azonban megmaradnak.

⇒ durva beavatkozás, súlyos mellékhatásokkal.

#### Miért?

(1) Ha a szulfátok kimosódnak a levegőből, a talajra kiszórt mész gipsszé válik.

(2) A meszezés rövidebb távú károsító hatása: a nitrogént (ammóniát) eltávolítja a talajból.

⇒ nem megbízható eljárás.

(1b) Mész adagolása a füstgázokhoz. Az erőművek füstjébe szórt nedves mészkőpor a kén-dioxid jelentős részét megkötheti.

Hátránya: ez az eljárás a nitrogén-oxidokat nem közömbösíti.



(2) *A kibocsátás csökkentése.*

A végső megoldás a szennyezés mérséklése.

Hogyan?

(a) *a nitrogén-oxidok kibocsátásának mérséklése*

(1) a motor, az üzemanyag és az égés javításával, s a kipufogógáz szűrésével

(2) az ipari technológiák korszerűsítésével

(b) *a kén-dioxidok kibocsátásának mérséklése*

(1) az ipari technológiák korszerűsítésével

- A szennyezés visszaszorítása reális esélyt jelenthet természet regenerálódásához.

Példák:

(1) Dél-Skócia két súlyosan elsavasodott tavában a szennyezettség csökkentése révén 1981-1986 között a kovamoszat-flóra összetétele visszatért az 1950-es évekbeli állapotához.

(2) Norvégiában egy kicsiny, elszennyeződött tó fölé átlátszó tetőt építettek, s a lehullott csapadékot megtisztítva juttatták el a vízbe. Négy év alatt helyreállt a tó természetes állapota.

(3) A talaj savasodása is visszafordítható. Ha nincs savutánpótlás, a savasodáskor káros kimosódás szabadít meg a szulfáttól. A nitrátot az élőlények fogyasztják el.

## 1.8. Összegzés

- A savas eső komplex jelenség, a légszennyezés egy részterülete. A fosszilis tüzelőanyagok felhasználásának fokozódása idézte elő, s elfogyásukkal fog végleg megszűnni.

## 2.1. A légköri savasodást okozó vegyületek, valamint a nehézfémek koncentrációja és ülepedése Európában

- Az európai levegőminőséget alapvetően az antropogén forrással rendelkező szennyező anyagok határozzák meg. Ezek nagy részének (pl.  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{O}_3$ , nehézfémeket tartalmazó aeroszol részecskék, stb.) a jellemző légköri tartózkodási ideje néhány nap. Ez az idő elegendően hosszú ahhoz, hogy az adott komponens a forrásaitól akár több száz, esetleg ezer km távolságra is eljusson, mielőtt kémiaiilag átalakul, vagy száraz és nedves ülepedés útján elhagyja a légkört.
- A légköri szennyezőanyagok eloszlását az alábbi tényezők befolyásolják:
  - (1) kibocsátás erőssége és térbeli eloszlása,
  - (2) a felszín típusa,
  - (3) a kémiai tulajdonságok, és
  - (4) a meteorológiai tényezők.A meteorológiai tényezők jelentősége alapvető, mert meghatározzák
  - (a) a szennyezőanyagok terjedését és
  - (b) a légkörből történő kiülepedését (elsősorban a csapadékeloszláson és a függőleges irányú turbulens kicserélődésen keresztül)

## 2.2. A légköri kén- és nitrogénvegyületek

- A légköri savasodást Európában alapvetően a kén- és nitrogénvegyületek szabályozzák.
- A légkörben található szén-dioxid vízben való oldódása következtében a csapadékvíz semleges pH értéke (a hidrogén-ion koncentráció negatív logaritmus) nem 7, hanem 5,6. Így az utóbbi érték alatti pH esetén beszélhetünk savas csapadékról.
- A közeli szennyező forrás közvetlen helyi hatásaitól mentes, ún. háttérlevegő minősége Európában – többek között – az EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme) keretében végzett folyamatos mérések alapján értékelhetők ki. E programban Magyarország is részt vesz. A méréseket a Kecskeméthez közeli K-pusztai állomáson végzik.

- Az éves átlagban számított maximális európai SO<sub>2</sub>-koncentrációk Németország, Csehország és Lengyelország fölött alakulnak ki 17 µgSm<sup>-3</sup> körüli értékekkel (1993-as adat). Ez a koncentráció mintegy 40 %-kal alacsonyabb, mint 1988-ban. Ez egyértelműen a kén-dioxid kibocsátás csökkenésének a következménye, melynek mértékét nemzetközi egyezmények szabályozzák. Közép-Európa keleti részén – beleértve Magyarországot is – az évi átlagos kén-dioxid koncentráció 5 µgSm<sup>-3</sup> körül alakul.
- A légköri szulfát aeroszolok (SO<sub>4</sub>-tartalmú sók) koncentráció-eloszlása az SO<sub>2</sub>-éhez képest sokkal homogénebb, hiszen közvetlen antropogén forrásokkal nem rendelkezik, hanem a kén-dioxid légköri transzportjával egyidejűleg végbemenő oxidáció során alakul ki.
- A kén-dioxid lokális antropogén forrásai feletti területeken a kén-dioxid/szulfát arány 1/2, míg a mediterrán országok és Skandinávia felé haladva ez az arány 1/1-hez közelít. A kémiai vizsgálatok azt mutatják, hogy a légköri szulfát döntő hányada ammónium-szulfát [NH<sub>3</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>] formájában van jelen a légkörben.
- Az oxidált nitrogénvegyületek antropogén emissziós mezőjének maximuma Nyugat-Európában található (Németország, Franciaország, Benelux-államok). A felszíni forrásokból kibocsátott NO-t a troposzférikus ózon a légkörben igen gyorsan NO<sub>2</sub>-dá oxidálja. A későbbi oxidációs termékek (pl. peroxy-acetilnitrát, salétromsav) koncentrációja a NO<sub>2</sub>-hoz viszonyítva alacsony. Az oxidált nitrogénvegyületek évi átlagos légköri koncentrációja (szintén 1993-as adatok alapján) Európában a 0,2-10,0 µgNm<sup>-3</sup> tartományban váltakozik. A légköri nitrogénvegyületek aeroszol fázisban elsősorban ammónium-nitrát [NH<sub>3</sub>(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>] formájában fordulnak elő. Az emissziószámításon és -méréseken alapuló becslések azt mutatják, hogy azonos légköri szulfát- és nitrátkoncentráció, valamint 2,6/1 arányú felszíni teljes kén/nitrogén kibocsátás mellett nagyobb mennyiségű nitrogén alakul át aeroszol formába, mint amennyi aeroszol a kibocsátott kénvegyületekből keletkezik.
- A redukált nitrogénvegyületek koncentráció-eloszlását a gyors légköri kémiai átalakulás és az effektív kihullási folyamatok miatt nagymértékben befolyásolja az európai emisszió eloszlása. Ha ennek térbeli változékonysága kicsi, akkor viszonylag homogén eloszlású koncentráció-mező alakul ki.

- Az oxidált kénvegyületek ülepedése az emissziós mező ahomogenitását tükrözi számos lokális maximummal (pl. Spanyolország, Anglia, Közép-Európa, Kola-félsziget, Kelet-Ukrajna). Skandinávia, valamint Északnyugat-Spanyolország kivételével az európai kontinensen a kénülepedés mértéke meghaladja a  $0,5 \text{ gSm}^{-2}\text{év}^{-1}$  értéket, ami hidrogén-ion egyenértékben  $310 \text{ mg}(\text{eq.H}^+)\text{ha}^{-1}\text{év}^{-1}$ -nek felel meg.
- Az oxidált nitrogénvegyületek teljes ülepedése az oxidált kénvegyületekhez képest sokkal kiegyensúlyozottabb képet mutat. Ennek oka az, hogy a felszíni forrásokból kibocsátott nitrogénvegyületek főként másodlagos szennyezőanyagok formájában ülepednek ki, tehát a légkörben számos kémiai átalakuláson mennek át, mielőtt onnan kikerülnének. A légköri kémiai átalakulás viszont meghatározott időt kíván, így az emissziós mező egyenlőtlenségei sokkal kevésbé tükröződnek a kialakuló ülepedési mezőben, mint pl. a kénvegyületek esetében. Az ülepedés jellemző mértéke meghaladja a  $0,25 \text{ gNm}^{-2}\text{év}^{-1}$  értéket, ami  $180 \text{ mg}(\text{eq.H}^+)\text{ha}^{-1}\text{év}^{-1}$ -nek felel meg.
- A redukált nitrogénvegyületek európai ülepedési eloszlása meglehetősen változékony, hiszen a légkörbe jutó ammóniamolekulák igen rövid légköri tartózkodási idővel rendelkeznek. Az ülepedés mértékének izovonalai ennek következtében jól követik a kontinens partvonalának kontúrját. Lokális maximumok a Benelux-államokban, Dél-Németországban és Angliában alakulnak ki. A kontinens nagy részén jellemző ülepedés mértéke meghaladja a  $0,25 \text{ gNm}^{-2}\text{év}^{-1}$  értéket, ami a savasodási potenciált tekintve  $180 \text{ mg}(\text{eq.H}^+)\text{ha}^{-1}\text{év}^{-1}$ -nek felel meg.
- A kénvegyületek járulnak hozzá a legtekintélyesebb mértékben a savasodási potenciál kialakulásához - megelőzve az oxidált, illetve redukált nitrogénvegyületeket.

### 2.3. A légköri savasodás hazánkban

- A savas ülepedés közvetetten a talajon (gyökérszinten) és közvetlenül a levélzeten fejtheti ki káros hatását a bioszférában. A savasodást, illetve a talaj savakkal szembeni ellenállását különböző tényezők befolyásolják. A talajoknak – a felszíni vizekkel ellentétben – nagy a savkiegyenlítő kapacitásuk. Így a savasodásnak egy bizonyos mértékig ellenállnak oly módon, hogy a talajra került savakat semlegesítik. Eképpen védekeznek a talajok a természetes savasodással szemben is. A talaj kémiai stabilitása, kiegyenlítő kapacitása, savasodási hajlama változó – függ a talaj genetikai típusától, a talajműveléstől és a kibocsátó források közelségétől.
- Magyarországon az 1970-es évek közepe óta figyelik folyamatosan a légköri savasodásért felelős kén- és nitrogénvegyületek koncentrációját a levegőben és a csapadékvízben. A kén-dioxid koncentráció az 1980-as évek közepétől erőteljesen csökkent. A szulfát koncentráció és -nedves ülepedés is csökkenő tendenciájú, bár az 1993-1994-es időszakban ismét növekedés volt tapasztalható.
- A nitrogén-dioxid és a nitrát koncentrációi szintén csökkenő tendenciát mutatott, míg a nitrát nedves ülepedése a  $0,3 \text{ gNm}^{-2}\text{év}^{-1}$  érték körül ingadozott a megfigyelési időszakban.

### 2.4. A légköri nehézfémek

- A légkörben található nehézfémek (Pb, Cd, As, Zn, Cu, stb.) elsősorban a magas hőmérsékletű égési folyamatok során kerülnek gőzök formájában a légkörbe, ahol főleg a finom mérettartományba tartozó aeroszol részecskék ( $r < 1 \mu\text{m}$ ) felszínén koncentrálnak. A légkör ezen alkotóelemei olyan dinamikai tulajdonságokkal rendelkeznek, amelyek lehetővé teszik a nehézfémek nagy távolságú légköri transzportját, vagyis – a savasodást okozó komponensekhez hasonlóan – nem csupán lokális levegőszennyezési problémát okoznak.

- Közismert, hogy a színesfémkohók, a hőerőművek, valamint a forgalmas főútvonalak és a nagyvárosi utcák közvetlen környezetében bizonyos nehézfémek olyan koncentrációban lehetnek jelen, ami már közvetlen egészségkárosodást okozhat. Kevesebb információval rendelkezünk arra vonatkozóan, hogy az emberi tevékenység hatására a nehézfémek biogeokémiai körforgalma hogyan módosult a regionális (pl. európai) és a globális térskálákon. Bizonyos vizsgálatok szerint, a nagy szennyező forrásoktól távol (azaz háttérkörülmenyek között) a nehézfémek koncentrációja az idő nagy részében túlságosan alacsony ahhoz, hogy bármilyen visszafordíthatatlan károsító folyamat bekövetkezzék. Azonban ez az alacsony koncentráció kritikus meteorológiai helyzetekben a többszörösére növekedhet a nagy léptékű transzport eredményeként. Sőt a viszonylag kicsi, de folyamatos ülepedés hatására a táplálékláncban esetleg az emberi egészségre is káros mennyiségű nehézfém halmozódhat föl.

- E problémák részletes vizsgálatához a nagy léptékű numerikus transzportmodellek alkalmazása és a kapott eredményeknek a mérési adatokkal való összehasonlítása jelenthet megfelelő eszközt. Magyarországon az 1980-as évek elején indult meg a légköri ólom és kadmium koncentrációjának és nedves ülepedésének vizsgálata. A száraz ülepedés mérése módszertanilag nehezebb, s a becslések szerint csak a teljes ülepedés kb. 20 %-át teszi ki. Ezért e folyamatról nem áll rendelkezésre részletes mérési anyag.

Az 1980-as években hazánkban magasabb ólom- és kadmium koncentrációt, illetve nedves ülepedést regisztráltak, mint az 1990-es évek elején.

Ok:

(a) *ólom:*

a felhasznált benzin ólomtartalmának csökkenése, illetve az ólmozatlan benzin európai bevezetése és fokozatos elterjedése.

(b) *kadmium:*

a Nyugat-Európában bevezetett (s a nagy távolságú légköri transzportokon keresztül nálunk is érzékelhető) környezetkímélő technológiák hatása, illetve a kelet-európai ipari termelés visszaesése.

- Az ólom és a kadmium európai koncentráció-eloszlásának lokális maximumai elsősorban Európa keleti részén (Lengyelország, Csehország, Ukrajna) alakulnak ki.
- Európai skálájú, nagy távolságú transzportmodell felhasználásával meghatározták az egyes európai régiók hozzájárulását az ólom magyarországi ülepedéséhez. A hazai források hozzájárulása 16 %-ról 19 %-ra növekedett az 1982-1990-es időszakban, míg a nyugat-európaiaké 33 %-ról 20 %-ra csökkent. Ugyanebben az időszakban az egyéb kelet-európai ólomforrások hozzájárulása 51 %-ról 61 %-ra növekedett.  
⇒ a határainkon túli források szerepe alapvető az ólom hazai ülepedésének (és koncentrációjának) kialakításában.
- A savas ülepedés és a nehézfémterhelés nem függetlenek egymástól. A savas, alacsony pH-jú talajokban megnövekszik a toxikus nehézfémek mobilitása. A nehézfémek oldódása ugyanis erősen pH-függő. A kioldódott és ezáltal a növények számára könnyen hozzáférhető nehézfémek mérgezőek, súlyosabb esetben a növény pusztulását okozhatják.
- Ezen meghatározó szennyező anyagok légköri terjedése és környezetkárosító hatása nem korlátozódik a kibocsátó ország területére, hanem regionális, sőt kontinentális léptékű probléma.  
⇒ A fölvetődő környezetvédelmi problémák megoldása is csak nemzetközi összefogással lehetséges. Az erre irányuló lépések a kén- és a nitrogénvegyületek esetében már megtörténtek. Az emissziókat ugyanis országonként aláírt, sőt időközben módosított, szigorú szerződések szabályozzák.