

## 2. Légekőri aeroszol

Aeroszolnak nevezzük valamely gáznemű közegben finoman eloszlott (diszpergált) szilárd vagy folyadék részecskék együttes rendszerét [Més97]. Ha ez a gáznemű közeg maga a levegő, akkor légekőri aeroszról beszélünk. A levegőben található poron szilárd aeroszol részecskéket értünk, amelyek többek között az eredeti anyag mechanikai aprózódásával keletkeztek.

Az aeroszol egyik legfontosabb tulajdonsága a részecskék mérete, mert számos fontos fizikai és kémiai tulajdonságot befolyásol. A folyadék részecskék általában gömb alakúak, a szilárd részecskék alakja viszont rendkívül összetett is lehet. Ezért bevezetjük az ekvivalens aerodinamikai átmérőt (EAD), amelyen egy olyan egységnyi (a vízzel azonos) sűrűségű gömb alakú részecske átmérőjét értjük, amelynek az aerodinamikai viselkedése a levegőben megegyezik a kérdéses részecske viselkedésével. Ennek értékét az átmérő és a relatív sűrűség négyzetgyökének hányadosa adja meg [Hin82]. A részecskék méretén a továbbiakban ezt az átmérőt értjük. A légekőri aeroszol részecskék mérete nagyon tág határok között változik. Néhány nanométertől kezdve akár 100 mikrométerig is terjedhet. Méretük alapján két nagy csoportra osztjuk őket. Durva részecskéken (durva módus vagy durva frakció) a 2.5  $\mu\text{m}$ -nél nagyobb átmérőjű részecskéket, finom részecskéken (finom módus vagy finom frakció) az ennél kisebb méretűeket értjük. Természetesen létezik másfajta csoportosítás is. Pl. durva tartományba az 1  $\mu\text{m}$ -nél nagyobb méretű, akkumulációs tartományba a 0,1-1  $\mu\text{m}$ , Aitken tartományba 0,001-0,1  $\mu\text{m}$ , nukleációs tartományba pedig az 0,001  $\mu\text{m}$ -nél kisebb méretű aeroszol részecskéket sorolják [Rae00]. Ebben az esetben a méreteloszlás logaritmikusan normális eloszlásfüggvényekkel írható le. Ebben a munkában én nem használom e felosztást.

Az aeroszol légekőrből történő kikerülését kiülepedésnek, depozíciónak nevezzük. Hogy mennyi idő múlva ülepszik ki egy adott részecske, elsősorban az

átmérőjétől függ. Az 1  $\mu\text{m}$ -nél nagyobb átmérőjű részecskék légekőri tartózkodási ideje mindösszesen néhány óra a gravitációs kiülepedésnek köszönhetően. Ezen részecskék általában már a forrásuk közelében kihullanak. Az 1  $\mu\text{m}$ -nél kisebb mérettartományba esők már jóval hosszabb ideig a légekőrben maradnak, akár egy hétig is, és a meteorológiai körülményektől (szél, páratartalom) függően a forrástól több ezer kilométerre is eljuthatnak. Általában száraz ülepedéssel, vagy csapadék formájában nedves ülepedéssel távoznak a levegőből.

Másik fontos jellemzője az aeroszoknak a tömegkoncentráció, ami az aeroszol egységnyi térfogatában mért részecskeanyag (szilárd és folyadéksepp) tömege. Szokásos egységei a  $\text{g}/\text{m}^3$ ,  $\text{mg}/\text{m}^3$ ,  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $\text{ng}/\text{m}^3$ . Bár az aeroszol részecskék koncentrációja az atmoszféra tömegének csak egy nagyon kis töredékét ( $10^{-8}$ ) teszi ki, mégis nagy hatással van az élővilágra és a globális klímára.

## 2.1 Légekőri aeroszol keletkezése

Légekőri aeroszol részecskéket többféleképpen is csoportosíthatjuk keletkezésük alapján. Egyrészt megkülönböztetünk elsődleges és másodlagos részecskéket. Elsődleges aeroszol részecskék közvetlenül jutnak a légekőrbe elsősorban diszperziós folyamatokon keresztül. Ezek nagy részét a durva részecskék teszik ki. Ezzel szemben a másodlagos aeroszol gázkomponensek nukleációs és kondenzációs folyamata során jön létre a légekőrben és emiatt jórészt a finom frakciót alkotják. A másodlagos aeroszol többsége kénvegyületeket tartalmazó szulfát aeroszol, de jelentős még a nitrogénvegyületekből létrejött nitrát aeroszol mennyisége is.

Az aeroszol részecskéket csoportosíthatjuk az alapján is, hogy természetes, vagy mesterséges (antropogén) úton keletkeztek. A természetes aeroszol részecskék legfőbb forrásai a következők:

- 
- **Talajeredetű aeroszol:** a földkéreg mállása, aprózódása útján jutnak a légkörbe. Ezek elemösszetétele a földkéreg elemösszetételét tükrözi: Al, Si, Sc, Ti, Mn, Fe, Co, Zr, Nb. Ráadásul ezek koncentrációja állandónak is tekinthető helytől és évszaktól függetlenül, remek kiindulópontot adva a természetes eredetű komponensek szétválasztására a mesterségestől. Sivatagi homokviharok során, köszönhetően annak, hogy itt a talaj ráadásul száraz és nincs növénytakaró sem, igen nagy mennyiségű por jut a levegőbe, ami ezután légkörri áramlatokkal (széllel) hosszú utat tesz meg mielőtt kiüledne. Ezt támasztja alá az is, hogy a szaharai homok jelenlétét sikerült kimutatni Debrecen levegőjében [Bor04].
  - **Tengeri aeroszol:** a földfelszín 70 %-át kitevő óceánok és tengerek párolgásuk során, a nagy szelek által a hullámok vízpermetéből valamint az elnyelt légbuborékok szétpukkanásából nagy mennyiségű (évente 1,3 millió tonna) tengeri sót tartalmazó aeroszolt juttatnak a légkörbe. Ezek elemösszetételét elsősorban a tengeri sóból származó elemek teszik ki: Na, Mg, Cl, K, Ca, Br és Sr. Tengeri környezetben a fitoplanktonok nagy mennyiségű ként bocsátanak ki dimetil szulfid (DMS) formájában, amelyek másodlagos szulfát aeroszol létrejöttét eredményezik.
  - **Vulkáni por:** vulkánkitörés során egy adott helyen nagyon rövid idő alatt nagy mennyiségű aeroszol juthat a légkörbe, amely más aeroszol részecskékkal ellentétben a légkör magasabb rétegébe (sztratoszféra) is eljut, így akár évekig a légkörben maradhat. A vulkánok által kibocsátott gázokból is keletkezik természetesen másodlagos aeroszol.
  - **Biológiai aeroszol:** élő szervezetek hozzák létre. Például pollenek, gombák, vírusok, baktériumok, de növények mechanikai kopása,

mikroorganizmusok aktivitása, növények párolgása, anyagcseréje szintén produkál aeroszol részecskéket. Jelentős forrás még a már említett az óceánokban élő egyes algafajok által kibocsátott dimetilszulfid, aminek az oxidációjából szulfát aeroszol keletkezik [And97]. Biológiai források még az erdőtüzek is, amelyek adott helyen rövid idő alatt sokszorosára növelhetik a térségben uralkodó aeroszol koncentrációt.

A mesterséges aeroszol legfőbb forrásai:

- **Közlekedés:** a nagy gépkocsiforgalommal rendelkező városokban, így például Debrecenben is, a légszennyezettség jelentős hányada a közúti közlekedésnek köszönhető. Gépjárművekből aeroszol részecskék közvetlen úton egyrészt az üzemanyag tökéletlen égése során keletkező finom méretű koromrészecskéként, másrészt a járművek mechanikai részeinek (pl. fékbetétek, gumibroncs futófelületei) kopása következtében kerülnek a levegőbe [Col01]. De ide tartozik a forgalom által felvert por is, amelynek során az egyszer már az útestre kiülepedett főként durva részecskék újra visszajutnak a légkörbe (reszuszpenzió). Emellett a kipufogógázokkal emittálódó gáznemű légszennyező anyagok részt vesznek a másodlagos aeroszol részecskék keletkezésében is.
- **Energiatermelés:** igen jelentős antropogén eredetű forrás. Ide tartoznak a hőerőművek, háztartási tüzelés és a biomassza égetése is, amelyek során többek között a másodlagos aeroszol képződéséhez szükséges szerves gázok ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ) és illékony szerves vegyületek szabadulnak fel. Mindezek mellett a tökéletlen égés során jelentős mennyiségű korom is kerül a légkörbe.
- **Ipar:** az ipari tevékenység is jelentős aeroszol kibocsátási forrás az energiatermeléshez hasonló módon.

- **Mezőgazdaság:** mezőgazdasági tevékenységek, pl. földmunkák, szántás során is jut por a légtörbe.

Az 2.1.1 táblázat alapján is látható, hogy a légtörbe jutó teljes aeroszol-mennyiségnek alig több mint egytizede származik emberi tevékenységből. Viszont amíg a természetes források által kibocsátott aeroszol nagy területeken egyenletesen oszlik el a Föld felszínén a nagy kiterjedésű forrásterületek miatt, addig az antropogén eredetű jóval kisebb területekre, elsősorban nagyvárosokra és azok környékére koncentrálódik, ahol e területeken a mesterséges eredetű aeroszolkoncentráció megközelíti, sőt bizonyos helyeken és időszakokban meg is haladja a természetes forrásokból származót.

**2.1.1. táblázat** Légtörri aeroszol részecskék forrásai és becsült mennyisége [Kie95].

Forrás	Kibocsátás (Tg/év)			Méret Durva: > 1 µm Finom: < 1 µm
	Alacsony	Magas	Jellemző	
<b>Természetes</b>				
<b>Elsődleges</b>				
talaj eredetű por (ásványi aeroszol)	1000	3000	1500	Főleg durva
tengeri só	1000	10000	1300	Durva
vulkáni por	4	10000	30	Durva
biológiai hulladék	26	80	50	Durva
<b>Másodlagos</b>				
biogén gázokból származó szulfátok	80	150	130	Finom
vulkáni SO <sub>2</sub> -ből származó szulfátok	5	60	20	Finom
biogén VOC-ból származó szerves anyag	40	200	60	Finom
NO <sub>x</sub> -ből származó nitrátok	15	50	30	Finom és durva
<b>Természetes összesen</b>	<b>2200</b>	<b>23500</b>	<b>3100</b>	
<b>Antropogén</b>				
<b>Elsődleges</b>				
ipari por, stb. (kivéve korom)	40	130	100	Finom és durva
korom	5	20	10	Főleg finom
<b>Másodlagos</b>				
SO <sub>2</sub> -ből származó szulfátok	170	250	190	Finom
biomassza égetés	60	150	90	Finom
NO <sub>x</sub> -ből származó nitrátok	25	65	50	Főleg durva
antropogén VOC-ból származó szerves anyag	5	25	10	Finom
<b>Antropogén összesen</b>	<b>300</b>	<b>650</b>	<b>450</b>	
<b>Összesen</b>	<b>2500</b>	<b>24000</b>	<b>3600</b>	

## 2.2 Légekri aeroszol éghajlatra gyakorolt hatása

A légekri aeroszol jelentős hatást gyakorol a globális klímára. A globális éghajlatváltozás napjaink egyik legtöbbet kutatott és legnagyobb vitákat kiváltó kérdésköre. Az éghajlatváltozást a légekri sugárzási mérlegének megváltozása idézi elő, amely a légekri több komponensének együttes eredménye. Egy ilyen komponens alkotnak az üvegházhatású gázok (CO<sub>2</sub>, metán, N<sub>2</sub>O, freonok, stb.), amelyek viszonylag jól ismert módon és mértékben járulnak hozzá a légekri fölmelegedéséhez. Ezzel ellentétben a légekri aeroszol hatása csak elég nagy bizonytalansággal becsülhető.

Az aeroszol részecskék egyrészt közvetlen (direkt) hatásaik révén befolyásolják a légekri hőmérsékletét:

- **Szórás:** ebben az esetben a részecskék a besugárzott elektromágneses hullámokat (napfényt) változatlan hullámhosszon kisugározzák a tér minden irányába, viszont irányonként más-más intenzitással. Így ez a folyamat hűti a légekrit, amely olyan mérettartományba eső részecskéknél a legintenzívebb, ahol a részecske átmérője összemérhető a sugárzás hullámhosszával, vagyis a 0.1-1 µm-es tartományban. Ide a finom aeroszol részecskék tartoznak, amelyek ilyen módon hűtő hatást fejtenek ki, ráadásul ezeket nagy légekri tartózkodási idő is jellemzi.
- **Elnyelés (abszorpció):** ebben az esetben a beeső elektromágneses sugárzás (napfény) más energiafajtvává, pl. hővé vagy kémiai energiává alakul. Ez a folyamat fűti a légekrit. Ilyet hatást váltanak ki az égési folyamatokból származó korom és talajeredetű, ásványi anyagokat tartalmazó aeroszol részecskék [Sei98].

A fenti két folyamat együttesen adja a sugárgyengülést (extinkció). Általában a finom részecskék szóró hatása erősebb a fellépő abszorpciónál, de erősen

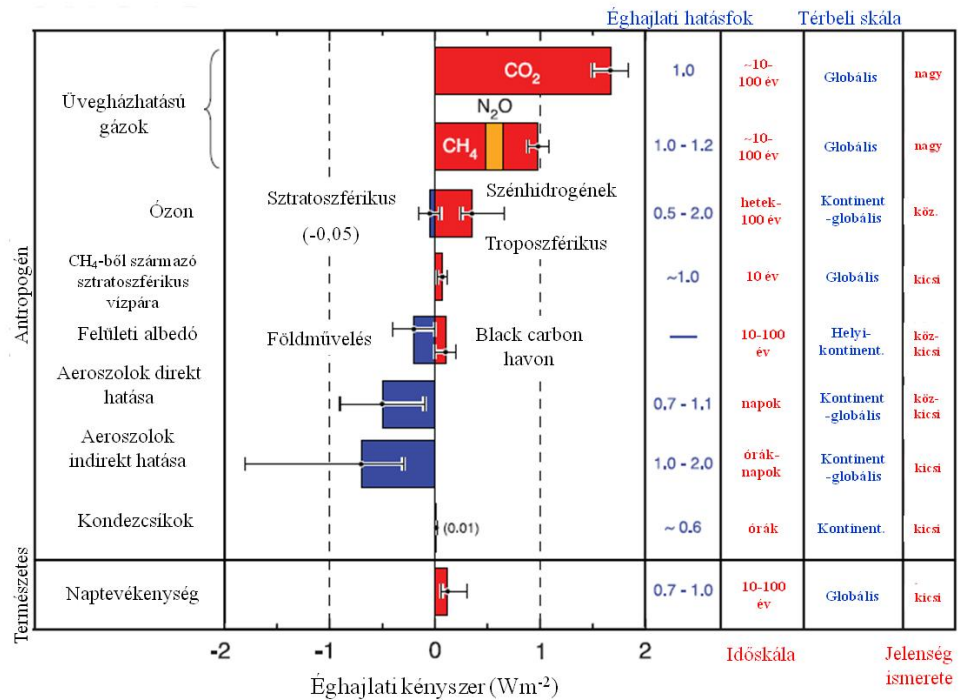
---

szennyezett városi területeken (pl. Mexikóvárosban) előfordul, hogy átmenetileg az abszorpció válik dominánssá [Eid02]. A Föld azon területein, ahol rendkívül nagy az aeroszol kibocsátás mértéke, már észlelték sugárzásgyengülés éghajlati hatásait. Például Dél-kelet Kínában, köszönhetően az utóbbi évtizedekben ugrásszerűen megnőtt fosszilis tüzelőanyagokkal történő tüzelésnek, megfigyelték a nyári maximum hőmérséklet csökkenését [Kai02].

Az aeroszol részecskék másrészt közvetett (indirekt) hatásuk révén is befolyásolják a klímát:

- **Felhőképződés:** az aeroszol részecskék fontos szerepet játszanak a felhőképződésben. A feláramló légtömeg hőmérséklete csökken, ami a vízgőzre vonatkoztatott kritikus túltelítődéshez vezethet. A telítetté válástól kezdődhet meg a kondenzáció az aeroszol részecskéken, mint kondenzációs magokon, ezáltal aktívvá válhatnak a felhőképződés szempontjából. Az aktívvá válás erősen függ a részecske fizikai (pl. méret) és kémiai (pl. higroszkóposság) tulajdonságaitól. Minél nagyobb a részecske mérete, illetve minél inkább vízoldható, annál alacsonyabb a kritikus túltelítettsége. Általában 0,01-0,05  $\mu\text{m}$ -nél nagyobb méretű, főleg vízben oldható anyagokból álló aeroszol részecskék aktiválódnak. Felhőképződés során a kondenzációs magvak számának megfelelően alakul a képződő felhőcseppek száma. Ha sok aeroszol részecske van a levegőbe, és ezek aktívvá is válnak, akkor több, de kisebb méretű felhőcsepp keletkezik, amelyekből létrejövő felhők hatékonyabban szórják vissza a földi légkörbe érkező napsugárzást, és stabilabbak is (kisebb valószínűséggel keletkezik benne csapadék), mint a nagyobb cseppekből álló felhők esetében. Ezen kisebb cseppekből álló felhők így hosszabb ideig hűtik a földfelszín hosszabb élettartamuk következtében, másrészt a csapadékképződés valószínűségének lecsökkentésével a víz

körforgását is befolyásolják [Ram01] és egyúttal az egyes nyomanyagok vertikális keveredését is.

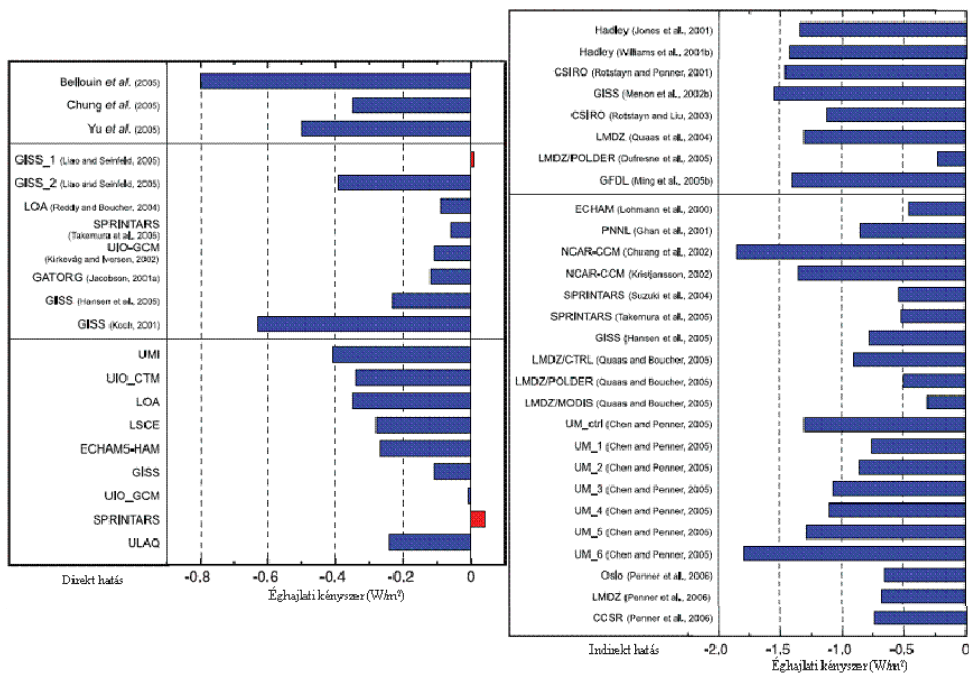


**2.2.1. ábra** 2005-re számított mesterséges forrásokból és naptevékenységből származó globális éghajlati kényszer ( $\text{W/m}^2$ ) 1750-hez képest (IPCC honlap: [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)).

A 2.2.1. ábra az emberi tevékenység által kibocsátott üvegházhatású gázok és a légköri aeroszol globálisan átlagolt éghajlatot módosító kényszereit mutatja 2005-re vonatkozóan 1750-hez viszonyítva a számítások hibáit is feltüntetve. Az ábrán látható, hogy az ipari tevékenységgel légkörbe jutó üvegházhatású gázok légkört melegítő hatása elég jól ismert és kis hibával modellezhető. Ezzel szemben az aeroszol direkt és indirekt hatásából származó negatív éghajlati kényszereket csak nagy bizonytalansággal és hibával lehet megbecsülni jelenleg is. Ráadásul a különböző modellek alapján történt számolások eredményei is igen nagymértékben különböznek egymástól (2.2.2. ábra). Ezért az éghajlatváltozás becslése szempontjából is rendkívül fontos lenne pontosabban megismerni a



légköri aeroszol forrásait, eloszlását és tulajdonságait, amihez további nagyszámú, megbízható és egymással összevethető megfigyelési és analitikai adatokra van szükség a Föld minél több pontjáról.



**2.2.2. ábra** Légköri aeroszol direkt és indirekt hatásából eredő globális éghajlati kényszer különböző modellszámítások alapján [IPCC: [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)].

A légköri aeroszol közvetett és közvetlen úton kifejtett hűtő és fűtő hatásai a légkör tetejére vonatkoztatva összeadódnak, de a Föld felszínén összességében a hűtő hatás érvényesül [And05]. Ezt a folyamatot elhomályosodásnak nevezzük, amelynek mértéke fokozatos növekvő tendenciát mutatott a 90-es évek elejéig [Lie02], de az utóbbi években inkább kifényesedés történik a csökkenő aeroszol kibocsátás következtében [Wil05]. Fontos megjegyezni, hogy a légköri aeroszol és az üvegházhatású gázok térben és időben másképp fejtik ki hatásukat. Amíg az üvegházhatású gázok éjjel-nappal, globális léptékben fejtik ki hatásukat, az aeroszol részecskék jóval rövidebb tartózkodási ideje miatt (néhány nap) csak regionális léptékben és csak nappal van hatással az éghajlatra, ezért csak az

aeroszol forrás környékén tapasztalható hűtő hatás, amelyek általában erősen iparosodott vagy gyors ipari fejlődéssel jellemzett szárazföldi területeket jelentenek [Kauf02]. E területektől távol már az üvegházhatású gázok melegítő hatása érvényesül. Természetesen minél nagyobb az egyes régiók között így kialakuló hőmérséklet különbség, annál nagyobb lesz a légkör dinamikájára gyakorolt hatás is.

A 2.2.1. és a 2.2.2. ábrák alapján azt is láthatjuk, hogy az aeroszol közvetett hatásából eredő éghajlati kényszer legvalószínűbb értéke  $-0,7 \text{ W/m}^2$ , de ez a számolások alapján  $-0,35$  és  $-1,8$  között változhat, attól függően, hogy mely modellt tekintjük. Azért is lenne fontos ennek az értéknek a pontosabb meghatározása, mert akkor meg tudnánk mondani, hogy a XXI. században milyen lesz a globális klíma változás tendenciája.

### 2.3 Légekri aeroszol egészségre gyakorolt hatása

A légekri aeroszol emberi egészségre gyakorolt negatív hatása régóta ismert és kutatott téma. Számos munka készült, amely során korrelációt találtak az aeroszol koncentráció és a megnövekedett halálozási arány között [Rei95]. Több országban végzett tanulmányok azt is kimutatták, hogy összefüggés van a megnövekedett aeroszol koncentráció és a légzőszervrendszeri (tüdőgyulladás, asztma) és más, érrendszeri és daganatos megbetegedések, halálesetek megnövekedett kockázata között [And94]. Eleinte csak a durva ( $2,5 \mu\text{m}$ -nél nagyobb átmérőjű) részecskékre kerestek korrelációkat, de később már vizsgálatokat végeztek a finom ( $2,5 \mu\text{m}$ -nél kisebb átmérőjű) részecskékre is, és kiderült, hogy ezekre a korreláció még erősebb [Wic00, Lip00]. USA-ban végzett több városra kiterjedő vizsgálat eredményeként arra jutottak, hogy  $10 \mu\text{g/m}^3$  tömegkoncentráció növekedés a durva részecskékre vonatkozóan  $2,7 \%$ -kal

---

[Sam00, Kni02], a finomakéra 4 %-kal növeli meg a napi halálozás kockázatát [Pop02].

Légtörri aeroszol részecskék elsősorban belégzéssel jutnak az emberi szervezetbe, amelyek egy része a légzőszervrendszer különböző régióiba kiülepedhet, és ezek egy része igen sokáig ott is maradhat és káros hatású lehet. Ilyen szempontból elsősorban a finom aeroszol részecskék a veszélyesek, mert ezek a tüdő mélyebb régióiba eljutva ott kiülepedhetnek, és gázcsere útján véráramba bekerülve eljuthatnak más szervekhez is [Obe05]. Ezáltal gyulladást nemcsak légzőszervrendszerben, hanem másutt is okozhatnak. Vérbe jutva megváltoztatják annak alvadékonyságát, ami növeli a trombózis kialakulásának kockázatát. Az egészségkárosító hatásokról részletesebben a Sztochasztikus Tüdőmodellel kapcsolatos fejezetekben szölok.