

3. AEROSOLY

Petr Skřehot

3.1 Atmosférický aerosol

Ačkoli si to neuvědomujeme, ale přirozenou součástí prostředí, ve kterém žijeme, jsou drobné částice nejrůznějších velikostí a původu nazývané aerosol. Aerosol je disperzní soustava s plynným disperzním prostředím a tuhým nebo kapalným disperzním podílem (označení „sol“ se zde používá i v případech kdy stupeň disperzity systému je nižší než koloidní).

V praktickém životě častěji než pojem aerosol běžněji používáme pojmy jako dým, mlha, oblak, zákal, kouř apod. Ty však reprezentují jen specifické skupiny aerosolu, které se liší podle složení, velikosti částic, způsobu vzniku nebo výskytu. Částice tvořící aerosol mají velikost od 1 nm do 100 μm , což odpovídá shlukům několika molekul až částecátkám materiálu tak hmotných, že už nemohou snadno poletovat v atmosféře a sedimentují (Manahan, 2005).

Aerosol se významně podílí na důležitých atmosférických dějích, jako je vznik srážek a teplotní bilance Země. Zároveň koncentrace aerosolu v atmosféře, velikostní distribuce částic, případně množství na ně vázaných toxických látek, jsou předmětem sledování z důvodu působení na vegetaci, živočichy, lidské zdraví i stavby a technická zařízení (Bartoňová a kol., 2004).

Snad nejběžnějším aerosolem, se kterým se můžeme denně setkávat, jsou oblaky. Ty lze charakterizovat jako viditelnou soustavu oblačných elementů, tedy částic kapalně vody nebo ledu (popřípadě obojího současně) rozptýlených v ovzduší (Munzar, 1989). Oblaky mají velký význam v meteorologii a zemědělství, neboť určují srážky a do značné míry podmiňují klima jednotlivých oblastí; déšť, sníh, bouře, duha jsou určovány přítomností aerosolů v atmosféře. Kromě běžných oblaků tvořených částicemi přirozeného původu, mohou být oblaky složeny také z částic pocházejících z umělých zdrojů, jako například z průmyslových exhalací, kouře či emisí letadel (Sobíšek a kol., 1993). Mezi oblaky patří také oblaky vzniklé výbuchy, které jsou tvořeny převážně prachem, nebo oblaky vzniklé zvířením sněhu či jemného písku.

Také v biologii mají aerosoly významnou funkci: rostlinný pyl, spóry bakterií a plísni se v přírodě přenášejí ve formě aerosolů. V některých případech jsou aerosoly záměrně připravovány, například při zplyňování tuhých nebo kapalných paliv

nebo při nanášení barev a laků, v zemědělství (rozprašování insekticidů, fungicidů a herbicidů), v lékařství apod., ale jejich vznik bývá nejčastěji nežádoucím jevem. Protože přirozená koagulace ani sedimentace k odstranění aerosolů často nestačí, je nutno je odstraňovat uměle (rozrušování aerosolu) (Bartovská a Šišková, 2005).

Velké množství atmosférického aerosolu vede ke snížení viditelnosti a je jedním z nejnejpříjemnějších znečišťovatelů životního prostředí. Tento aerosol se dostává do ovzduší především přirozenými procesy jako je sopečná činnost, lesní požáry, vířením ze zemského povrchu nebo z vod oceánů apod. Ovšem i lidská činnost jakou je doprava, spalování fosilních paliv, emise z průmyslu, exploze atd. jeho koncentrace v ovzduší zvyšují. Zvláště markantní je to v lokálním měřítku, nad urbanizovanými centry (nechvalně proslulá je v tomto ohledu přímořská oblast jihovýchodní Číny). Z historických zkušeností víme, že výrazné zvýšení koncentrace aerosolu v atmosféře by mohlo být příčinou změn globálního klimatu. Například před 65 miliony let, kdy došlo patrně následkem dopadu velkého kosmického tělesa, k vyhynutí prakticky všech dinosaurů a s nimi přibližně 75 % ostatních živočišných druhů. Následkem zmíněného impaktu došlo k rychlým a intenzivním změnám v prostředí, které jsou přisuzovány masivnímu znečištění ovzduší částicemi aerosolu. Tím byla ovlivněna radiační rovnováha atmosféry, což v konečném důsledku vedlo ke globálnímu ochlazení celé planety.

Pro studium globální cirkulace zemské atmosféry a jejího chemismu je předmětem zájmu sledování osudu částic vyvržených při silných sopečných erupcích. Měřeními již bylo například prokázáno, že částice vzniklé při výbuchu sopky El Chichon v Mexiku, byly schopny doputovat až do Grónska, kde byly detekovány ve spadu (Manahan, 2005). Při mimořádně silných erupcích se mohou některé částice aerosolu dostávat až do stratosféry, kde se více méně rovnoměrně rozptýlí nad danou hemisférou. Díky pomalé výměně vzduchu přes tropopauzu pak zde setrvávají po dlouhou dobu a ovlivňují radiační rovnováhu atmosféry. Poslední případ takto silné erupce byl v roce 1991, kdy vybuchla filipínská sopka Mt. Pinatubo. Podle satelitních měření NASA provedených v roce 1992 se prokázalo, že v některých částech světa poklesly následkem toho průměrné teploty až o 1 °C (ve srovnání s 30-letými teplotními průměry) (Skřehot, 2008).

Tabulka 25: Zdroje partikulárních částic v atmosféře a jejich globální rozsah.

Zdroj	Globální rozsah vstupu do atmosféry (10¹² g.rok⁻¹)
Větrný prach	5000
Oceánský sprej	1000
Průmysl	200
Vegetace	75
Lesní požáry	36
Vulkanismus	10

Aerosoly bývají rozdělovány podle skupenství disperzního podílu na:

- mlhy s kapalným disperzním podílem,
- dýmy a prachy s tuhým disperzním podílem,
- smogy a kouře, které současně obsahují tuhé látky i kapaliny.

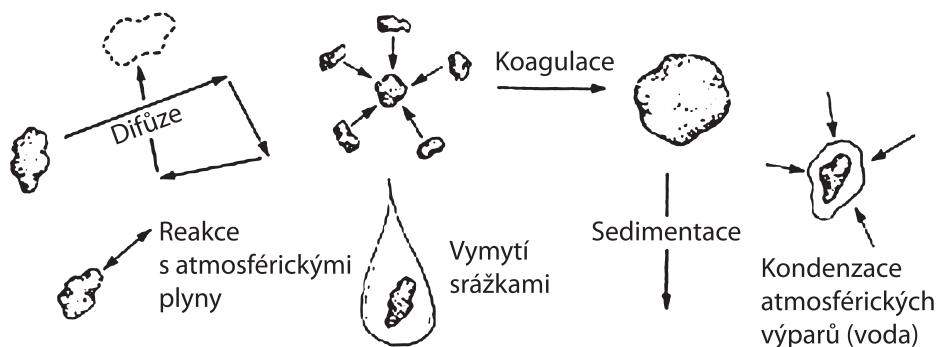
Částice vytvářející atmosférický aerosol mohou být do atmosféry emitovány z celé řady zdrojů. Nejvýznamnějším zdrojem je zemský povrch, ze kterého jsou částice vynášeny větrem, a dále pak oceánský sprej vznikající tříštěním vody. Naproti tomu antropogenní zdroje se na celkovém hmotnostním množství atmosférického aerosolu podílejí méně, než bychom očekávali (viz tabulka 25). Se zřetelem k prostorové lokalizaci zdroje rozlišujeme aerosol primární a sekundární. V prvním případě jsou částice aerosolu emitovány do atmosféry přímo ze zdroje. Naopak sekundární aerosol vzniká chemickou reakcí plynných složek atmosféry. Vznik sekundárního aerosolu se označuje zkráceně jako konverze plyn-částice (gas-to-particle conversion). Zvláštní kategorií aerosolu je bioaerosol, zahrnující životaschopné organismy jako jsou viry, bakterie, houby a případně jejich části a živočišné a rostlinné produkty jako spóry a pyl (Holoubek, on line). Podrobněji jsou velikostní skupiny a formy aerosolu vzhledem k velikosti částic shrnuty v obrázku 31.

3.2 Vznik aerosolů a oblaků

Aerosoly mohou vznikat různými způsoby (viz obrázek 30). Obvykle rozlišujeme dispergační procesy a kondenzační procesy (Bartovská a Šišková, 2005).

- Dispergační procesy jsou:
 - mechanické rozmělnění (drcení, mletí apod.) a následné rozptýlení částic v proudu plynu (např. uhlí, vápno, cement, mouka, cukr),
 - rozprašování kapaliny,
 - rozprašování kovů v elektrickém oblouku nebo vysokofrekvenčním výbojem (např. dýmy oxidů),
 - exploze traskavin.

- kondenzační procesy jsou:
 - chemické reakce – vznikají buď tuhé disperzní částice dýmů nebo hygroskopické zárodky umožňující kondenzaci,
 - kondenzace přesycené páry, vytvořené vhodným ochlazením soustavy. Nad teplotou tání disperzního podílu se tvoří většinou aerosoly složené z kapiček (atmosférické oblaky či mlhy); dýmy vznikají, poklesne-li teplota pod teplotu tání. Nejsou-li v soustavě přítomny kondenzační jádra, může se nová fáze tvořit spontánní kondenzací jednotlivých molekul podél tlakového gradientu, ovšem tento proces se uplatňuje v malém měřítku a pouze při vysokém přesycení párou.



Obrázek 30: Schéma vzniku atmosférického aerosolu a jeho interakce s ostatními příměsmi (Manahan, 2005).

Výlučně kondenzací probíhá v zemské atmosféře vznik oblaků. Pro ni je však nutná přítomnost kondenzačních nebo ledových jader (Bednář, 1989). Často panuje mylný názor, že oblaky vznikají spontánní kondenzací přesycené vodní páry. Tento stav však za reálných podmínek v atmosféře téměř nenastává. Na druhém místě hovoříme o vhodném termodynamickém stavu atmosféry. V tomto ohledu není řeč o ničem jiném, než o stavových veličinách, které vzduchovou hmotu popisují (objem, tlak, teplota), resp. o jejich hodnotách. Změna kterékoli z nich, jež je obvykle vyvolána působením vnějších vlivů, může vést ke vzniku oblaků. Nejlepším příkladem jsou změny stavových veličin, ke kterým dochází při výstupu vzduchu. Výstup vzduchu je v atmosféře běžným jevem, ke kterému dochází nejrůznějšími pochody (termický výstup, výstup podél frontální plochy či podél terénních překážek) (Podzimek, 1959).

Vzduch vystupující směrem vzhůru se postupně rozpíná (zvětšuje svůj objem), čímž se ochlazuje. Tuto skutečnost lze snadno demonstrovat při použití hustilky – foukáme-li hustilkou vzduch například do míče, dochází uvnitř pumpičky ke stlačování vzduchu a tedy i ke zmenšování jeho objemu. Každý, kdo použil hustilku, dobře ví, že se pumpička při foukání vždy zahřeje. Není to však třením pístu o plášť hustilky, nýbrž díky stlačování vzduchu při foukání míče. V atmosféře však dochází při výstupu vzduchu k jevu opačnému, takže analogicky při zvětšování objemu vzduchu dochází k jeho ochlazování. Sníží-li se tímto způsobem teplota vzduchu výrazně, pak pára v něm obsažená, začne postupně kondenzovat. Ochladí-li se vystupující vzduch na teploty nižší jak $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, může stejným způsobem dojít ke vzniku ledových krystalků. Jsou-li takto vzniklé ledové částice dostatečně malé a nedorostou-li až do rozměrů srážkových elementů, které mohou vypadávat z oblaku, jde o pochody vratné. Vzniklé kapičky nebo krystalky se tedy mohou snadno vypařovat, resp. sublimovat. Nedojde-li ke změně vnějších podmínek, množství vody v plynné formě a množství vody v podobě drobných kapiček nebo ledových krystalků se tak udržuje v rovnováze (Podzimek, 1959).

Při výstupných pochodech dochází při dosažení určité výšky ke kondenzaci vodních kapiček. V této výšce se nachází tzv. kondenzační hladina, což je hladina, ve které vzduch dosahuje stavu nasycení a vodní pára v něm obsažená se začíná srážet. Ke kondenzaci vodní páry dochází na okem nepostřehnutelných částech aerosolu, nazývaných kondenzační jádra. Kondenzačním jádrem v širším slova smyslu rozumíme částici podporující svou povahou tvoření kondenzačních produktů v atmosféře. Většina kondenzačních jader má velikost v rozmezí 10^{-7} až 10^{-9} metru. Rozpětí velikostí je však mnohem širší, takže pro zjednodušení se kondenzační jádra dělí do tří skupin:

- jádra Aitkenova o velikostech menších jak 10^{-7} metru,
- jádra velká o velikostech 10^{-7} metru až 10^{-6} metru a
- jádra obří, která jsou větší jak 10^{-6} metru (Podzimek, 1959; Bednář, 1989).

V 1 cm^3 vzduchu jich nad volnou krajinou a nad oceány jsou řádově tisíce až desetitisíce a v průmyslových oblastech a ve městech pak až statisíce. Dělení kondenzačních jader lze však provádět podle jiných hledisek, například podle skupenství, podle povrchových vlastností, podle elektrické povahy nebo povahy fyzikálně-chemické.

Jako kondenzační jádra mohou působit:

- Částice prachu, na jejichž rovných ploškách může nastat kondenzace již při tlaku nasycené páry, nebo které obsahují póry, ve kterých dochází ke kapilární kondenzaci při ještě nižším tlaku.

- Atmosférické ionty, které při srážkách dodávají kapičkám kapaliny elektrický náboj. Ten snižuje povrchovou energii (snížení závisí na velikosti náboje a na poloměru kapénky) a tím i tenzi jejich páry.
- Molekuly nebo koloidní částice hygroskopických látek, zavedené ve formě par nebo aerosolu do mírně přesycené vodní páry. Jejich rozpuštěním vznikají kapénky vodného roztoku hygroskopické látky, které mají nižší tlak nasycené páry než stejně velké kapénky vody (Bartovská a Šišková, 2005).

Koncentrace těchto částecek v ovzduší se mění během dne i roku. Jejich původ je značně rozmanitý. Do ovzduší se mohou dostávat přirozenou cestou z půdy, rozpadem hornin při erozi, z moří, při sopečných erupcích anebo z antropogenních zdrojů, například jako produkty hoření. Jako kondenzační jádra mohou posloužit také nejrůznější mikroorganismy nebo pyl, které se v ovzduší také hojně nacházejí. Určité množství kondenzačních jader může mít kosmický původ, nebo mohou vznikat ve vyšších vrstvách atmosféry (Podzimek, 1959).

3.3 Fyzikální a chemické charakteristiky aerosolů

3.3.1 Chemické složení aerosolů

Většinu hmotnosti atmosférického aerosolu tvoří sírany, nitráty, amonné ionty, organický materiál, materiál zemské kůry (částice půd, zvětraných hornin a minerálů, resuspendovaný prach), mořská sůl, vodíkové ionty a voda. Z těchto chemických entit sírany, amonné ionty, organický a elementární uhlík a některé přechodné kovy tvoří převážně jemný aerosol (viz tabulka 26) Materiál zemské kůry včetně křemíku, vápníku, hořčíku, hliníku, železa, stejně jako některý bioaerosol (pyl, spory, části rostlin) naopak tvoří většinu hmotnosti hrubého aerosolu. Nitráty jsou významnou složkou jak hrubého tak jemného aerosolu²⁴. Jako součást jemného aerosolu jsou zejména ve formě NH_4NO_3 zatímco v hrubém aerosolu jako produkt kondenzace par kyseliny dusičné na hrubých částicích (Bartoňová a kol. 2004).

Nejkomplikovanější chemické složení má městský aerosol. Je to dáno tím, že k jeho tvorbě přispívá široká škála různých zdrojů na rozdíl například od pozadového aerosolu (blíže je o městském aerosolu pojednáno v kapitole 3.8).

²⁴ Hrubým aerosolem obvykle nazýváme částice větší jak 2,5 mikrometru, zatímco jemným aerosolem částice o velikostech menších jak 2,5 mikrometru (blíže viz obrázek 31).

Tabulka 26: Typické koncentrační rozsahy jednotlivých prvků ve 24hodinových vzorcích jemného a hrubého aerosolu na pozadových, venkovských a městských stanicích.

Prvek	Hrubý-H	Koncentrace (ng.m ⁻³)		
	Jemný- J	Pozadový aerosol	Vesnický aerosol	Městský aerosol
Fe	H a J	0,6-4200	55-14500	130-13800
Pb	J	0,01-65	2-1700	30-90000
Zn	J	0,03-450	10-400	15-8000
Cd	J	0,01-1	0,4-1000	0,2-7000
As	J	0,01-2	1-28	2-2500
V	H a J	0,01-15	3-100	1-1500
Cu	H a J	0,01-15	3-300	3-5000
Mn	H a J	0,01-15	4-100	4-500
Hg		0,01-1	0,05-160	1-500
Ni	H a J	0,01-60	1-80	1-300
Sb	J	0-1	0,5-7	0,5-150
Cr	H a J	0,01-10	1-50	2-150
Co	H a J	0-1	0,1-10	0,2-100
Se	H a J	0,01-0,02	0,01-30	0,2-30

Koncentrační rozsah prvků uvedených v tabulce 26 je značný, což indikuje důležitost lokálních zdrojů. Obecně platí, že z těžkých kovů nejvyšších koncentrací dosahují železo, olovo, měď a nižších koncentrací pak kobalt, rtuť a antimon. Prvky, které jsou emitovány do atmosféry ze zdrojů spalování, jsou v aerosolu obvykle obsaženy ve formě oxidů (Fe₂O₃, Fe₃O₄, Al₂O₃), ale obecně je jejich molekulární forma nejistá (Holoubek, on line). Tuto skutečnost potvrzují také výsledky měření chemického složení mlhy, námrazy a deště v oblasti Šumavy (z období od 14. 2. 1988 do 24. 10. 1991), které jsou uvedeny v tabulce 27.

Tabulka 27: Porovnání základních charakteristik a chemického složení mlhy, námrazy a deště v oblasti Šumavy z období od 14.2.1988 do 24.10.1991 (Bartovská a Šišková, 2005).

Veličina	Mlha	Námraza	Děšť
pH	3,67	4,80	4,30
Vodivost (μS.cm ⁻¹)	248,5	62,7	32,0
Na (ppm)	0,49	0,27	0,10
K (ppm)	0,54	0,39	0,16
NH ₄ ⁺ (ppm)	17,41	2,66	0,80
Mg (ppm)	0,32	0,22	0,07
Ca (ppm)	3,27	1,51	0,47
Mn (ppb)	36,50	26,50	11,00
Zn (ppb)	223,00	43,00	21,00
F ⁻ (ppm)	0,22	0,07	0,03
NO ₃ ⁻ (ppm)	32,71	5,24	2,69

3.3.2 Velikosti částic a jejich koncentrace

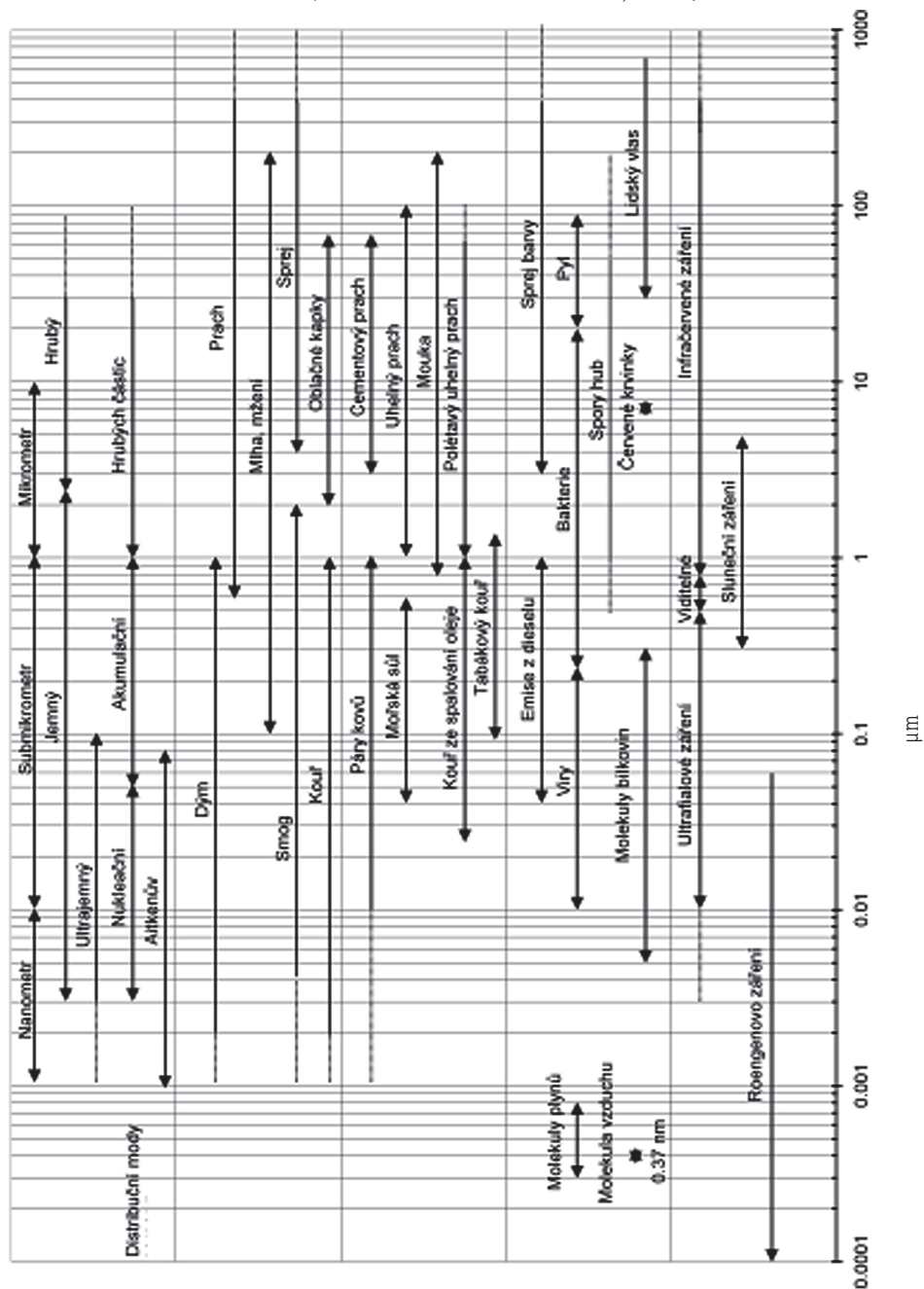
Jedním z nejdůležitějších parametrů ovlivňujících chování aerosolu v atmosféře je **velikost částic aerosolu**. S ohledem na nehomogenitu aerosolů, která závisí na způsobu vzniku aerosolu i na vnějších podmínkách, se velikosti částic pohybují v širokém rozmezí (viz obrázek 31).

Distribuce velikostí získaná měřeními však ukázala, že aerosolové částice s největší hustotou pravděpodobnosti výskytu v atmosféře mají velikost kolem $0,3\text{ }\mu\text{m}$. Prostým okem takto malé částičky nerozlišíme (nejmenší jednoduše viditelné částice mají velikost větší než $50\text{ }\mu\text{m}$), přestože jejich četnosti (koncentrace) jsou poměrně vysoké (Holoubek, online). Aby byl aerosol v ovzduší dobře viditelný, je potřeba, aby jeho hustota byla výrazně větší než hustota vzduchu. V případě aerosolu tvořeného vodními kapičkami je s ohledem na jejich obvyklé velikosti a optické vlastnosti toto kritérium na úrovni pouhých 110 % hustoty vzduchu (Dohányosová a kol., 2007). Čím má aerosol větší hustotu, tím je opticky výraznější a jeho objemové vlastnosti se velmi liší od zředěnějšího aerosolu. Zředěné aerosoly vnímáme jako jemnou mlhu či zákal, husté pak jako oblaky s viditelnou vnitřní strukturou a ostrým ohraničením.

O mlze lze hovořit v případě kapalného aerosolu vzniklého kondenzací přesycených vodních par nebo atomizací kapaliny, kdy částice mají kulový tvar a velikost v rozsahu desetin mikrometru do $100\text{ }\mu\text{m}$. Za opar se označuje obdobný aerosol mající vliv zejména na viditelnost v atmosféře. Jako dým se jeví aerosol z pevných částic obvykle menších než $0,05\text{ }\mu\text{m}$, které mají tvar shluků nebo řetězců tvořených aglomerací částic primárně vzniklých kondenzací par generovaných zejména při vysokoteplotních procesech. Podobně lze definovat kouř, který navíc obsahuje kapalně částice a je výsledkem nedokonalého spalování. Naopak soubor hrubých částic (větších než $0,5\text{ }\mu\text{m}$) vzniklých působením mechanických sil na mateřskou pevnou hmotu, označujeme jako prach podobně jako sprej nebo tříšť vzniklé působením mechanických sil na kapalinu.

Smog je obecný termín označující viditelné znečištění atmosféry zejména v městských oblastech. Termín vznikl složením slov smoke-fog (kouř-mlha). Aerosol fotochemického smogu tvoří kapalně nebo pevné částice obvykle menší než $2\text{ }\mu\text{m}$ (Holoubek, online). Ještě větší rozměry než částice tvořící dýmy a mlhy mají částice prachů, které tvoří s ohledem na svůj původ i nebezpečnost specifickou skupinu (viz kapitola 3.6.2).

Obrázek 31: Velikostní rozsahy, skupiny a definice atmosférického aerosolu vzhledem k velikosti částice (autor: J. Hovorka dle Hinds, 1999).



Jak ukazuje obrázek výše, mezi velmi malé částice patří částice obsažené v produktech spalování jako například saze, dým, svářečský prach, ale také anorganické soli, například jodid stříbrný či částičky mořské soli. Naopak velké částice lze nalézt ve všech druzích průmyslových prachů (např. cement, popílký, slévárenské prachy) a také v aerosolu tvořeném částičkami půdy unášenými větrem (Manahan, 2005).

Koncentrace disperzních částic bývá v aerosolech podstatně menší než v lyosolech asi 10^{10} až 10^{11} částic v 1 m^3 . Tvar částic aerosolů závisí na skupenství disperzního podílu. Kapalně částice mají kulový tvar, který se nemění ani při jejich narůstání. Tuhé částice mohou být například jehlicovité, destičkovité nebo hvězdíkovité a často se vyskytují i řetězovité agregáty primárních částic.

3.3.3 Vyjadřování kvalitativních charakteristik aerosolu

Velikost, tvar a měrná hustota částic aerosolu jsou nejdůležitějšími parametry ovlivňující chování aerosolu v atmosféře, přičemž velikost částic je zároveň determinující pro výběr vhodných fyzikálních zákonů k popisu jejich chování. Například částice svou velikostí blízké velikosti průměrné molekuly vzduchu ($0,37 \text{ nm}$) se budou pohybovat v ovzduší převážně Brownovým pohybem daným zejména difúzí, zatímco pohyb prostým okem viditelné částice je určen převážně silami setrvačnosti a gravitace (viz kapitola 3.4.2). Popis částice je pak omezen na měřenou fyzikální veličinu, jejímž měřitelným nebo spočitatelným indexem je ekvivalentní průměr částice (Holoubek, online).

Ekvivalentní průměr částice

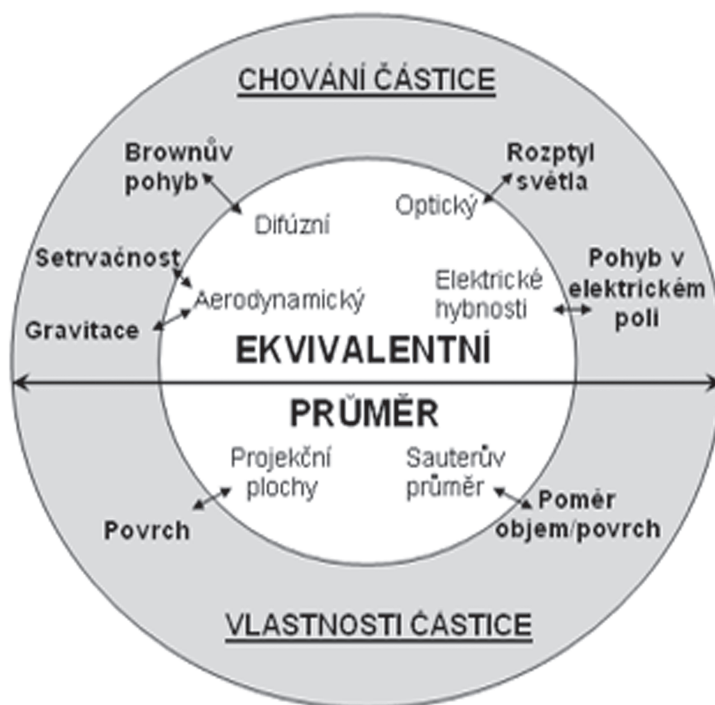
Ekvivalentní průměr částice je průměr hypotetické kulové částice o standardní měrné hustotě (1000 kg.m^{-3}), která má stejnou hodnotu měřené fyzikální veličiny jako sledovaná částice. Používají se různé druhy ekvivalentních průměrů, které se odvozují buď od chování, nebo od vlastností částice. Příkladem je shrnutí uvedené na obrázku 32, kde jsou uvedeny základní typy veličin používaných pro odvozování ekvivalentních průměrů.

Pro částice menší než $1 \text{ }\mu\text{m}$ je charakteristická ale jejich rychlost difúze a příslušným parametrem je difúzní ekvivalentní průměr. Měření difúzního ekvivalentního průměru jsou poměrně nepřesná a pomalá, a proto je vhodné měřit pohyblivost částice v elektrickém poli. V takovém případě pak hovoříme o ekvivalentním průměru elektrické pohyblivosti, což je tedy průměr kulové částice jednotkové hustoty, která se v elektrickém poli pohybuje stejnou rychlostí jako příslušná částice. Výhodou použití elektrického pole je, že zde se částice pohybují rychleji a přesnost

stanovení příslušného parametru je větší. Rychlou a jednoduchou metodou, jak měřit charakteristiky aerosolu, je měření rozptylu světla na aerosolu. Rozptyl světla aerosolem je velmi komplexní funkcí velikosti, tvaru, refrakčního indexu částic a jejich souboru a vlnové délky použitého světla. Příslušným parametrem je optický ekvivalentní průměr definovaný ve vztahu ke kalibrační částici (aerosolu), která v daném přístroji rozptyluje stejné množství světla jako sledovaná částice (aerosol).

Ekvivalentní aerodynamický průměr

Atmosférický aerosol je souborem částic obvykle značného počtu ($10^2 - 10^8$ v cm^3) a různé velikosti (rozsah až 5 řádů). Takový soubor je velmi nepraktické nebo nevhodné charakterizovat výpisem charakteristik jednotlivých částic. Naopak, vhodné je určit počet (povrch, hmotnost) částic ve vybraných velikostních skupinách neboli stanovit velikostní distribuci částic aerosolu. Pro tento účel bylo ale nutné zavést veličinu, která bude dobře charakterizovat velikost částic aerosolu s ohledem na jejich chování v reálné atmosféře (tj. s ohledem na rychlost sedimentace v tíhovém poli Země) nezávisle na jejich složení (a hustotě materiálu tvořících částici). Touto veličinou je ekvivalentní aerodynamický průměr, který značíme D_p .



Obrázek 32: Definice ekvivalentního průměru částice odvislá od měření jejího chování nebo vlastností (Baron a Willeke, 2001).

Geometrický průměr

Občas se můžeme setkávat také s geometrickým průměrem částic. Tento průměr je v podstatě standardní velikost částice, kterou by bylo možné zjistit prostým změřením. Jelikož ale částice aerosolu (vyjma kapalného) nemají obvykle tvar koule, postrádá používání tohoto parametru smyslu (protože většina částic nemá pravidelný tvar). Vzájemný vztah geometrického D_g a ekvivalentního aerodynamického průměru D_p se odvozuje od pádových rychlostí zkoumané a standardizované částice. Jsou-li totiž tyto rychlosti rovné, máme-li dvě kulové částice, pak pro ně platí vztah:

$$\rho_p C_{cD_g} D_g^2 = \rho_o C_{cD_p} D_p^2 \quad (\text{rovnice 3-1})$$

kde ρ je hustota sledované (p) a kulové standardizované (o) částice, C_c Cunninghamův korekční faktor²⁵ (je funkcí velikosti částice) pro geometrický (D_g) a aerodynamický (D_p) průměr částice.

Neliší-li se příliš měrné hustoty měřené a standardní částice, a nebo je-li částice větší než 1 μm , pak poměr Cunninghamových korekčních faktorů je přibližně roven 1 a rovnice 3-1 aerodynamického průměru částice D_p se zjednoduší na

$$D_p = D_g \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_o}} \quad (\text{rovnice 3-2})$$

Z rovnice 3-2 vyplývá, že geometrický a aerodynamický průměr částice se mohou velmi lišit v závislosti na měrné hmotnosti částice. Například se obecně předpokládá, že průměrná hodnota hustoty částic menších než 1 μm je 1.5 g cm^{-3} . Aerodynamický průměr takové částice je tudíž přibližně 1,22 krát větší než její geometrický průměr. Naopak částice z materiálu o malé hustotě (polystyrén) se budou chovat jako částice podstatně menší.

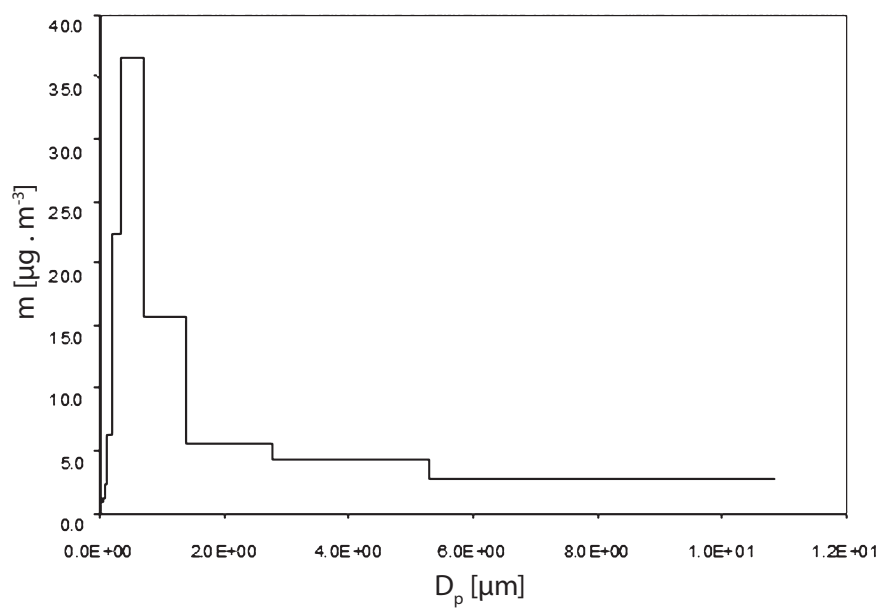
²⁵ Faktor, který umožňuje korigovat rovnice pro výpočet aerodynamického odporu platící pro spojité prostředí (kontinuum) tak, aby bylo možné je použít i pro klouzání plynu podél povrchu.

Velikostní distribuce částic

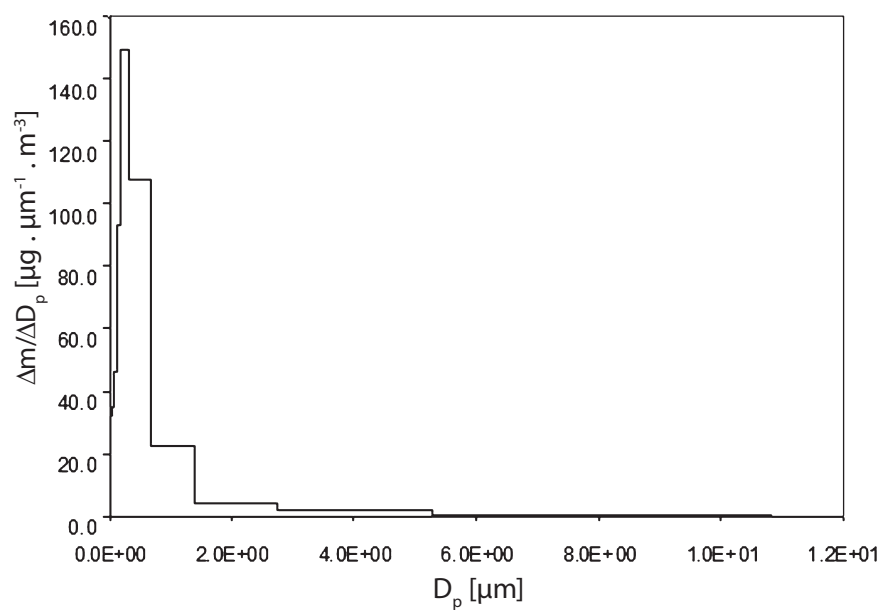
Pro nejvhodnější charakterizaci aerosolu z hlediska počtu částic, velikosti jejich povrchu nebo jejich celkové hmotnosti se konstruuje velikostní distribuce částic. Toto kvantitativní vyjádření umožňuje přiřadit i vhodné statistické rozdělení dat, takže z něj můžeme určit příslušné charakteristiky aerosolu, včetně bodových nebo intervalových charakteristik příslušného rozdělení.

Vhodnou bodovou charakteristikou je aerodynamický průměr částice o hmotnosti (četnosti, povrchu), který se v souboru vyskytuje nejčastěji (mod) nebo přesně v polovině souboru hodnot (medián), případně dosahuje průměrné hodnoty (průměr). Má-li distribuční křivka četnosti pouze jedno maximum, jedná se o monomodální; v případě dostatečně úzkého maxima hovoříme o monodisperzním aerosolu (tj. aerosolu o částicích o jedné převažující velikosti) atp. (Holoubek, on line).

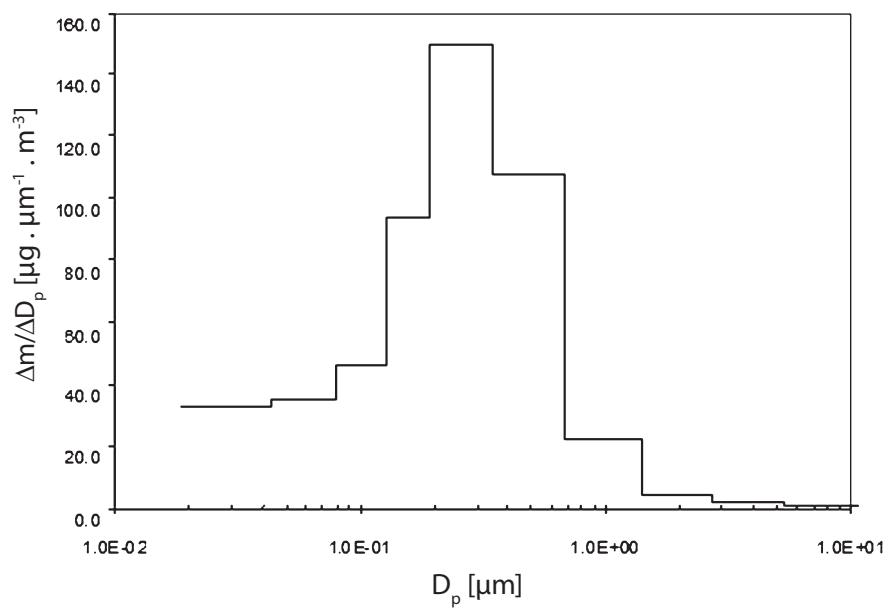
Prosté zobrazení hmotnosti aerosolu Δm příslušné velikostní frakce vůči D_p v lineární škále je nevhodné (viz obrázek 33). Z grafu se ztrácí informace o distribuci hmoty částic menších než $1\ \mu\text{m}$ a navíc šířka jednotlivých sloupečků příslušné velikostní skupiny je závislá na rozsahu velikosti částic, tj. plocha příslušného sloupce neudává celkovou hmotnost částic v daném velikostním rozsahu. Obrázek 33 by bylo možné chybně interpretovat tak, že částice větší než $1,4\ \mu\text{m}$ tvoří většinu hmotnosti vzorku, což ale rozhodně není pravda. Proto je třeba hodnoty hmotností pro jednotlivé velikostní skupiny Δm vydělit rozsahem velikostí ve skupině, tj. provést normalizaci na jednotku velikosti D_p . V příslušném grafu normalizovaných hodnot $\Delta m / \Delta D_p$ versus D_p (viz obrázek 34) je plocha pro jednotlivé sloupce úměrná celkové hmotnosti aerosolu dané velikostní skupiny, ale informace o příspěvku částic menších než $1,4\ \mu\text{m}$ se opět ztrácí. Zobrazení $\Delta m / \Delta D_p$ vůči D_p v logaritmické stupnici (viz obrázek 35) sice zlepšuje informovanost o podílu částic menším než $1,4\ \mu\text{m}$ na celkové hmotnosti aerosolu, ale opět je chybné zobrazení plochy sloupců, které neodpovídá celkové hmotnosti aerosolu v dané velikostní skupině. Například z plochy sloupců pro částice menší než $0,19\ \mu\text{m}$ by bylo možné chybně usoudit, že tyto částice tvoří téměř polovinu celkové hmotnosti aerosolu, což je opět v rozporu s naměřenými hodnotami. Proto je nezbytné v případě zobrazení Δm proti logaritmické škále D_p normalizovat Δm rozdílem logaritmů horní a dolní velikostní hranice příslušného intervalu $\Delta \log D_p$ (nebo $\Delta \ln D_p$). Graf normalizované hodnoty $\Delta m / \Delta \log D_p$ versus D_p v logaritmické škále (viz obrázek 36) splňuje veškeré požadavky správnosti a názornosti a je správnou variantou zobrazení velikostní distribuce aerosolu.



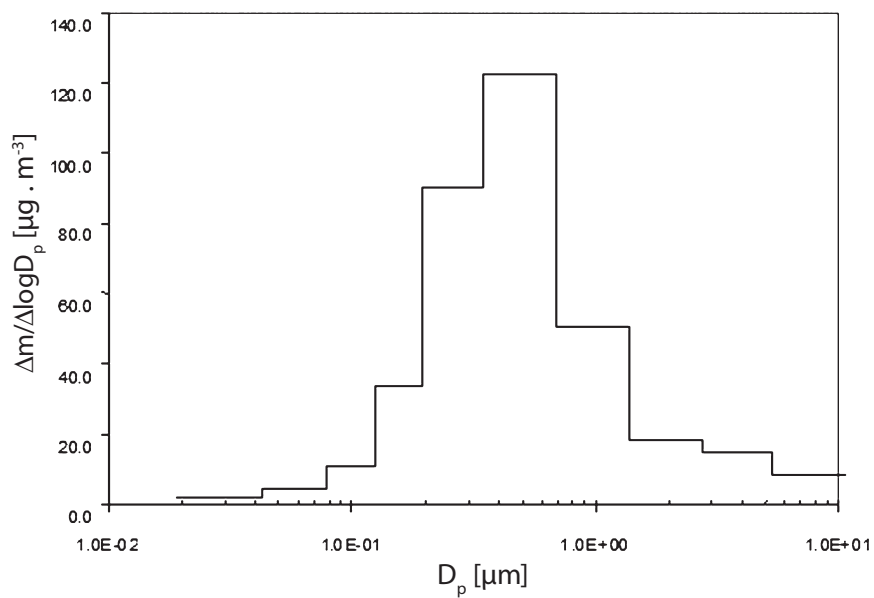
Obrázek 33: Hmotnost „ m “ aerosolu dané velikostní skupiny versus D_p .



Obrázek 34: Normalizovaná hmotnost $\Delta m / \Delta D_p$ dané velikostní skupiny versus D_p .



Obrázek 35: Normalizovaná hmotnost $\Delta m / \Delta D_p$ dané velikostní skupiny versus logaritmus D_p .



Obrázek 36: Normalizovaná hmotnost $\Delta m / \Delta \log D_p$ dané velikostní skupiny versus logaritmus D_p . (správné grafické vyjádření velikostní distribuce hmotnosti aerosolu).

Informace o příspěvku hmotnosti jednotlivých velikostních skupin k celkové hmotnosti aerosolu jsou snadno dostupné v celém rozsahu velikostí. Se stejnou platností jako se využívá dekadický logaritmus aerodynamického průměru částice, lze použít i přirozeného logaritmu \ln . Plocha sloupce, neboli hmotnost aerosolu i-té velikostní skupiny je rovna

$$\Delta m_i = m_i \Delta \log D_p \quad (\text{rovnice 3-3})$$

m_i je velikostní distribuce hmotnosti i-té velikostní skupiny.

Plocha všech sloupců je celková hmotnost aerosolu ve vzorku $M = \Sigma \Delta m_i$. Pro celkovou hmotnost aerosolu M pak platí rovnice 3-4

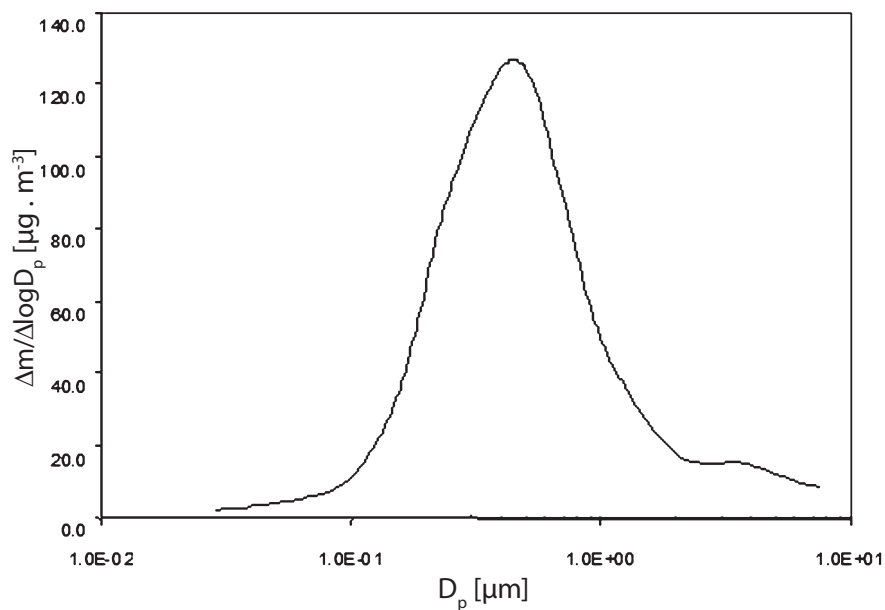
$$M = \Sigma m_i \Delta \log D_p \quad (\text{rovnice 3-4})$$

Budeme-li chtít zpřesnit informaci o distribuci hmotnosti aerosolu, je třeba zvýšit počet velikostních skupin „ i “ neboli zmenšit $\Delta \log D_p$. Nejúplnější informace o distribuci pak lze dosáhnout v případě, že ΔD_p nabývá infinitezimální velikosti, tj. rovnici 3-4 lze napsat jako

$$M = \int m_i d \log D_p \quad (\text{rovnice 3-5})$$

kde hodnota integrálu je celkovou hmotností aerosolu ve vzorku. Zároveň pro distribuci hmotnosti aerosolu vyplývá rovnice 3-5 a graficky jí odpovídá hladká křivka na obrázku 37.

$$m_i = \frac{dM}{d \log D_p} \quad (\text{rovnice 3-6})$$



Obrázek 37: Velikostní distribuce hmotnosti aerosolu po normalizaci a integraci naměřených hodnot.

V mnoha případech jsou vlastnosti aerosolu funkcí zejména povrchu S (např. reaktivita) nebo počtu N (např. toxicita) částic. Proto je nezbytné znát příslušné distribuční funkce. Nejjednodušší situace je u distribuce četnosti, kde n_i značí počet částic v intervalu velikostí $\log D_p$ až $\log D_p + d(\log D_p)$

$$n_i = \frac{dN}{d \log D_p} \quad (\text{rovnice 3-7})$$

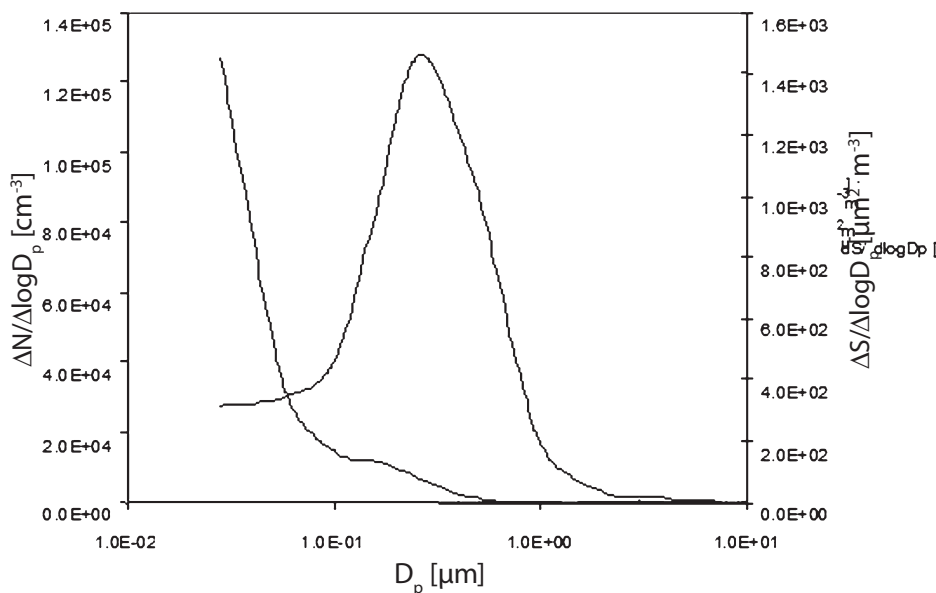
obdobně

$$s_i = \frac{dS}{d \log D_p} \quad (\text{rovnice 3-8})$$

Vztah mezi jednotlivými distribucemi vyplývá z přepočtu povrchu a objemu koule (rovnice 3-9 a 3-10) a příslušné hladké distribuční křivky povrchu a četnosti aerosolu jsou uvedeny na obrázku 38.

$$s_i = \frac{\pi D_p^2 dN}{d \log D_p} \quad (\text{rovnice 3-9})$$

$$m_i = \frac{\rho \pi}{6 D_p^3} * \frac{dN}{d \log D_p} \quad (\text{rovnice 3-10})$$



Obrázek 38: Velikostní distribuce plochy S a četnosti N aerosolu (jedná se o stejný vzorek aerosolu jako v případě obrázku 37).

Stejně jako v případě distribuce hmotnosti, plocha pod příslušnou křivkou udává celkový povrch nebo počet částic ve vzorku aerosolu. Pro případ, kdy se experimentálními metodami získá distribuce četnosti a je třeba znát např. hmotnosti jednotlivých velikostních frakcí, pak lze s výhodou využít rovnici 3-10, kde za hodnotu měrné hmotnosti ρ se dosadí obvykle hodnoty 1,5 až 1,6 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$).

Jak již bylo uvedeno, velikostní distribuci aerosolu nejlépe svými parametry vyhovuje log-normální rozdělení, tj. normální rozdělení logaritmu dat, které připomíná rovnice 3-6 až 3-8. Teoreticky není důvod, proč by velikostní rozdělení

aerosolu mělo splňovat parametry log-normálního rozdělení. Vhodnost aproximace velikostní distribuce aerosolu log-normálním rozdělením je dána zejména dostatečným rozsahem hodnot (poměr minima a maxima ≥ 10) a skutečností, že log-normální rozdělení na rozdíl od normálního nepočítá se zápornými hodnotami, které nemají fyzikální interpretaci.

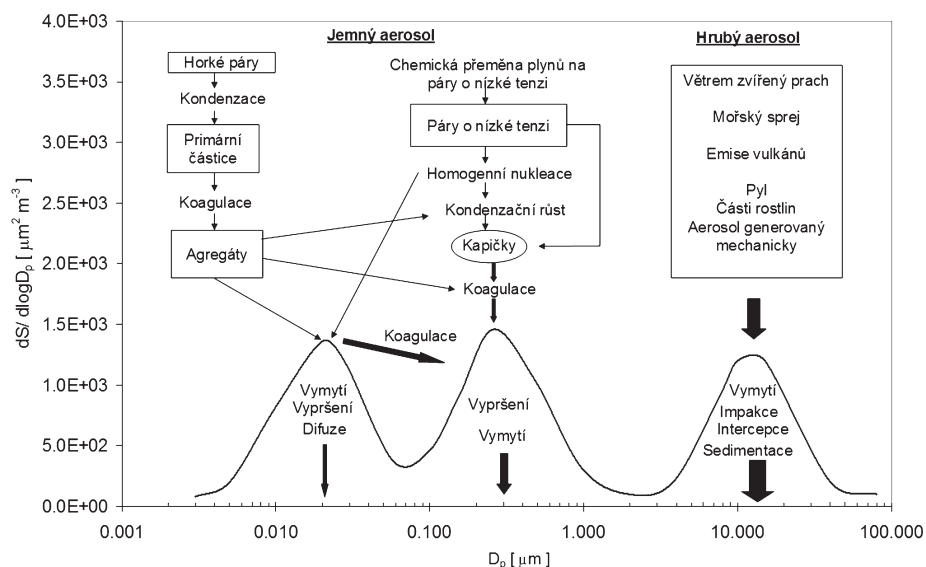
Log-normální rozdělení četnosti n_i dle aerodynamického průměru D_p je uvedeno v rovnici 3-11. Základní charakteristikou rozdělení je geomerický průměr D_{pg} (N-tá odmocnina součinu N částic o průměru D_p) a jeho standardní směrodatná odchylka σ_g v rovnici 3-12.

$$n_i = \frac{N}{(2\pi)^{1/2} \log \sigma_g} \exp\left[-\frac{(\log D_p - \log D_{pg})^2}{2 \log^2 \sigma_g}\right] \quad (\text{rovnice 3-11})$$

$$\log \sigma_g = (\sum n_i (\log D_p - \log D_{pg})^2 / (N - 1))^{1/2} \quad (\text{rovnice 3-12})$$

D_{pg} v rovnici lze fyzikálně interpretovat jako průměr částice o mediánu četnosti – CMD, tj. průměr částice, kdy přesně polovina počtu částic má menší průměr a polovina počtu částic větší průměr nežli sledovaná částice. Standardní odchylka geometrického průměru σ_g je bezrozměrná charakteristika, dosahuje hodnot ≥ 1 , a je takovou mírou šířky příslušného maxima distribuční křivky, že 95 % částic leží v rozsahu velikostí $\exp(\text{CMD} \pm 2 \ln \sigma_g)$.

Obvyklý tvar distribuční křivky povrchu „přirozeného“ atmosférického aerosolu má obvykle tři maxima (viz obrázek 39). Distribuce je trimodální, se dvěma mody v oblasti jemných částic aerosolu a jedním modem v oblasti hrubých částic. Rozlišení na hrubé a jemné částice vychází z obrázku 39, přičemž hraničním rozměrem je přibližně 1 μm . U jemných částic lze na obrázku rozlišit mody nukleační (20 nm) a akumulační (300 nm). Částice v jednotlivých distribučních modech se od sebe liší způsobem vzniku i chemickým složením.



Obrázek 39: Idealizované schéma distribuce povrchu částic atmosférického aerosolu doplněné o zjednodušené reakční schéma a zdroje jednotlivých velikostních skupin aerosolu, jejich formy a hlavní procesy vedoucí k odstraňování aerosolu z atmosféry.

Částice nukleačního modu vznikají zejména jako důsledek vysokoteplotních procesů (hoření, tavení rud, kovů, svařování) a fotochemických reakcí v atmosféře. Kondenzací horkých par vznikají primární, převážně kulové částice, které vzájemnou koagulací vytvoří typicky řetězovité agregáty a jejich shluky, nebo mohou koagulovat s částicemi akumulárního modu. To je také principiální proces jejich odstraňování z atmosféry. Částice nukleačního modu jsou velmi reaktivní a jejich doba setrvání v troposféře se pohybuje řádově od vteřin po desítky minut. Doba setrvání je nemonotonní funkcí velikosti částic a exponenciálně klesá s rostoucí koncentrací částic, s kterými částice nebo jejich agregáty koagulují (Bartovská a Šišková, 2005).

Tyto částice, ač jsou nejmenší, tvoří největší podíl z celkového počtu částic tvořícího atmosférický aerosol s největším celkovým povrchem (Manahan, 2005).

Částice akumulárního modu tvoří převážnou část povrchu a podstatnou část hmotnosti atmosférického aerosolu. Vznikají zejména kondenzací plynů (konverze plyn-částice) chemickou reakcí, kondenzací vody nebo ostatních par na již existující částice a koagulací částic nukleačního modu. Jako primární částice je emitována pouze menší část částic akumulárního modu. Obecně je jejich doba setrvání

v atmosféře řádově dny až týdny, a z toho důvodu jsou částice akumulčního modu v průměru také nejpočetnější skupinou částic v troposféře. Odstraňují se z atmosféry zejména v mokré depozici (Bartovská a Šišková, 2005) (viz kapitola 3.4.3).

Mod hrubých částic o aerodynamickém průměru kolem 10 μm tvoří částice primárně vzniklé působením mechanických sil. Jedná se zejména o prach vytvářený větrem nebo dopravní a stavební aktivitou, spoluemisí s plynnými produkty při spalování uhlí nebo zpracování rud. Nejmenší částice generované mechanicky mají aerodynamický průměr kolem 1 μm . Omezení je dáno adhezními silami mezi částicemi navzájem a mezi částicemi a povrchem na kterém ulpívají. Pro částice o aerodynamickém průměru menším jak 1 μm prudce roste síla adheze a jejich tvorba působením mechanických sil, ať již desintegrací nebo resuspenzí již vytvořených, ale adherovaných částic, je velmi nepravděpodobná. Pro částice o aerodynamickém průměru větším jak 10 μm pak platí, že se působením větru neuvolňují jednotlivé částice, ale jejich shluky nebo vrstvy (Bartovská a Šišková, 2005).

Těchto částic je v atmosférickém aerosolu ve srovnání s počtem částic nukleárního modu přítomno nejméně, avšak jejich příspěvek k jeho celkové hmotnosti je zásadní (Manahan, 2005).

3.3.4 Fyzikální vlastnosti částic

Povrchový náboj

Vlastnosti aerosolů jsou výrazně ovlivněny především jejich kvalitou a dále velikostí částic. Ačkoli částice aerosolu mohou nést malý povrchový náboj, skutečnost, že nejsou obklopeny kapalinou ale plynem, brání vzniku elektrické dvojvrstvy. Náboj částic aerosolu je do jisté míry náhodný a závisí na příčinách, které ho vyvolaly. Aerosol obvykle obsahuje vedle sebe částice nenabitě i nabitě, které nesou různě velké náboje různých znamének. Neplatí přímá závislost mezi a velikostí částice a velikostí jejího náboje; náboj částice však bývá tím větší, čím větší jsou její rozměry. Působením nábojů může docházet k vzájemnému přitahování či odpuzování částic. Částice mohou získat náboj:

- Při kondenzaci na iontu jako zárodku.
- Adsorpcí iontů z atmosféry.
- Při rozštěpení iontových krystalů (v každém úlomku nemusí být vyvážen náboj kationtů stejným nábojem aniontů).

- Při rozstřikování kapaliny z trysky – malé kapičky vznikající mlhy nesou opačný náboj než větší kapky; je-li rozstřikovač zapojen na zdroj stejnosměrného napětí, mají všechny kapky náboj stejného znaménka.

Umělé nabití částic nábojem stejného znaménka sice zabraňuje jejich agregaci při srážkách, ale vlivem odpuzivých elektrostatických sil se zvyšuje počet nárazů částic na stěny nádoby, kde se pak usazují. Aerosoly jsou tedy obvykle agregátně nestálé systémy. I když při velkém stupni disperzity mají dostačující sedimentační stabilitu, vždy v nich probíhá koagulace, která není příliš rychlá jen díky tomu, že koncentrace disperzních částic je v případě atmosférického aerosolu obecně poměrně nízká.

Protože téměř každá srážka dvou částic (např. mlhy nebo dýmu) vede k agregaci, lze pro popis kinetiky koagulace aerosolů použít Smoluchowského vztahy pro rychlou koagulaci. Koagulaci aerosolů je možno urychlit zahřáním a rovněž jí napomáhá anizometrický tvar částic nebo přítomnost nesouhlasně nabitých částic. Nižší než u lyosolů²⁶ (Bartovská a Šišková, 2005).

V aerosolech těkavých látek se rozměry částic mohou v malé míře měnit i v důsledku rozdílných tenzí páry disperzního podílu nad velkými a malými částicemi, což vede ke zvětšování velkých částic na úkor vypařování drobnějších (Bartovská a Šišková, 2005).

Optické vlastnosti aerosolů

Optické vlastnosti aerosolů závisí na rozptylu světla, který se v důsledku rozdílu hustot a indexů lomu disperzního podílu a disperzního prostředí, projevují na částicích aerosolu velmi výrazně. Systémy s částicemi menšími než je vlnová délka světla jsou průhledné a jeví opalescenci²⁷. Při pohledu kolmém vůči směru procházejícího světla se jeví modravé a při pohledu proti procházejícímu světlu pak červenavě žluté. Tento rozptyl se nazývá Rayleighův, který se uplatňuje i na molekulách plynů (viz modré zbarvení oblohy). Jsou-li přítomny i částice větší než je střední volná dráha molekul plynu, nastávají odchylky od Rayleighovy rovnice a aerosol jeví zřetelný zákal a v silnějších vrstvách je zcela neprůhledný.

²⁵ Lyosol je heterogenní disperzní systém s kapalným disperzním prostředím a tuhým disperzním podílem, tvořeným částicemi koloidních rozměrů, které jsou v daném disperzním prostředí nerozpustné.

²⁷ V tenkých vrstvách jsou koloidní disperze v procházejícím světle čiré a teprve v tlustých vrstvách nebo pozorovány ze strany jeví jemný zákal, který se nazývá opalescence. Opalescenci můžeme pozorovat například také na vnitřních stranách lastur mlžů.

Svazek paprsků, procházející systémem, v němž jsou rozptýleny částice koloidních nebo větších rozměrů, se v důsledku rozptylu světla na částicích stává při bočním pozorování viditelným. Tento úkaz, který se nazývá Tyndallův jev, má tvar kužele s vrcholem v místě, kde světlo vchází do nehomogenního prostředí, který se rozšiřuje ve směru postupujícího paprsku. Jsou-li disperzní částice dostatečně velké, mohou být ve světelném kuželi pozorovány jako jasné zářící body; u menších částic je pozorován jen difuzní světelný pruh. V homogenním prostředí tento jev nenastává.

Při použití infračerveného světla o dostatečně dlouhé vlnové délce, nastává opět jen rozptyl světla a aerosol může být pro takové záření průhledný (Bartovská a Šišková, 2005).

Kinetické vlastnosti aerosolů

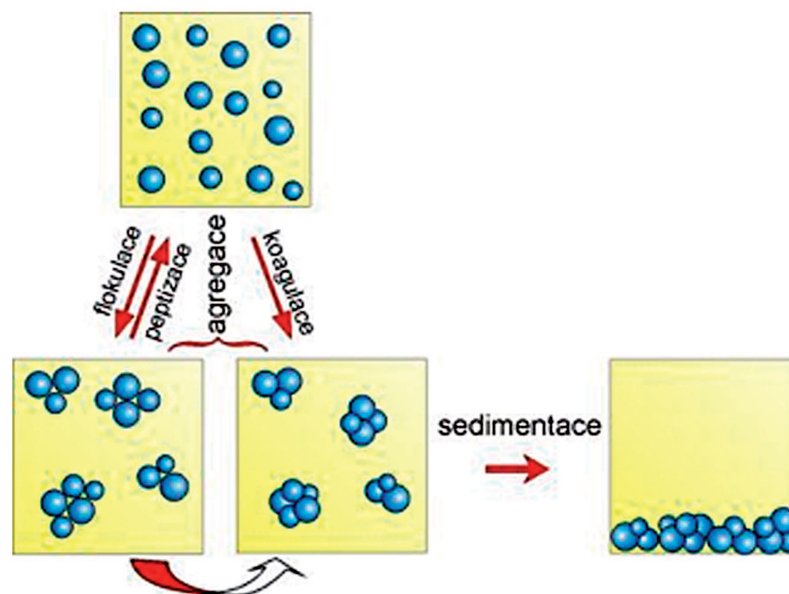
Kinetické vlastnosti aerosolů se řídí stejnými principy jako vlastnosti lyosolů; podstatně nižší koncentrace disperzních částic v aerosolu, hustota a kapalného a plynného disperzního prostředí jsou však příčinou výrazných odlišností. Difuzní koeficient v aerosolech je díky nižší viskozitě disperzního prostředí mnohem větší než v lyosolech a pro disperzní částice značně menší než střední volná dráha molekul plynného prostředí je difúzní koeficient nepřímo úměrný nikoliv prvé, ale druhé mocnině poloměru částice.

Větší částice podléhají působením zemské tíže sedimentaci. **Sedimentační rychlost** v aerosolech je vlivem většího rozdílu hustot a menší viskozity disperzního prostředí větší než v lyosolech. U malých částic vyrovnává přirozený tepelný pohyb (Brownův pohyb) účinky gravitační síly, což vede k ustavení rovnováhy a částice jsou tak v trvalém vznosu. Jelikož se v přírodě vzduch neustále promíchává turbulentní či konvektivními proudy, je přirozená sedimentace aerosolů narušována a její rychlost se značně snižuje. To vede k potlačení sedimentace i větších částic, které se však v klidném ovzduší, jako například v uzavřených prostorách (budovy, tunely apod.), běžně usazují na horizontálních površích.

3.4 Procesy probíhající v disperzním prostředí

3.4.1 Agregace částic

Agregace je pochod, při němž se malé částice shromažďují do větších útvarů (agregátů), aniž při tom dochází ke zrušení fázového rozhraní mezi jednotlivými částicemi a disperzním prostředím a ke zmenšení plochy jejich povrchu (na rozdíl od koalescence). Malé částice si zachovávají identitu, pouze ztrácejí kinetickou nezávislost – agregát se pohybuje jako celek (kinetická jednotka).



Obrázek 40: Agregace disperzních částic.

Agregace, při níž vznikají shluky volně vázaných částic, se nazývá **flokulace**. Je to vratná reakce, takže agregáty mohou být velmi mírným zásahem převedeny zpět na koloidní systém (**peptizace**). Mohou ale také přecházet na pevněji vázané shluky. Pochod, při kterém vznikají agregáty pevně vázaných částic (vzdálenost částic v agregátu je řádově rovna velikosti molekul), je označován jako **koagulace**. Koagulace není vratná a vytvořený koagulát nelze bez vynaložení dostatečně velké energie peptizovat – převést zpět na koloidní systém. Po dosažení určité velikosti agregátů dochází k sedimentaci (podle rozdílu hustot dolů nebo vzhůru), což vede k zániku disperzního systému a jeho rozdělení na makrofáze. Není-li známa povaha agregátu, nebývají tyto termíny rozlišovány a často se používá pouze termínu koagulace (Bartovská a Šišková, 2005).

3.4.2 Sedimentace aerosolů

Sedimentace je usazování částic disperzního podílu v tíhovém poli (např. působení gravitační síly, či odstředivé síly). Pohyb částic v gravitačním poli Země je rovnoměrný; částice padají směrem dolů, je-li jejich hustota větší než hustota disperzního prostředí, v opačném případě se vlivem archimédovských vztlačových sil pohybují směrem vzhůru (vzplývají). V odstředivém poli sedimentují částice radiálním směrem; specificky těžší částice směrem od osy otáčení, specificky lehčí částice naopak; rychlost pohybu částic se mění s jejich vzdáleností od osy otáčení.

Průběh sedimentace závisí na velikosti částic, rozdílu hustot a v odstředivém poli také na rychlosti otáčení.

Dynamická rovnováha v disperzním systému, při níž se rychlost sedimentace disperzních částic rovná rychlosti jejich difúze opačným směrem. Tento případ přichází v úvahu především u koloidních disperzí, neboť u analytických disperzí nedochází k měřitelné sedimentaci, u hrubých disperzí je naopak neměřitelná difúze (Bartovská a Šišková, 2005).

V rovnováze je sedimentační tok roven toku difúznímu a koncentrace v daném místě se nemění s časem. Při konstantní teplotě T plynou z rovnosti sedimentační a difúzní rychlosti tyto vztahy pro rozdělení koncentrací v sedimentační rovnováze (viz rovnice 3-13 až 3-16).

- v gravitačním poli s výškou z :

$$\ln c = -\frac{v \cdot g}{k_B \cdot T} \cdot (\rho - \rho_0) \cdot z + konst = -\frac{M \cdot g}{R \cdot T} \cdot \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right) \cdot z + konst \quad (\text{rovnice 3-13})$$

nebo

$$\ln \frac{c_2}{c_1} = \frac{v \cdot g}{k_B \cdot T} \cdot (\rho - \rho_0) \cdot (z_1 - z_2) = \frac{M \cdot g}{R \cdot T} \cdot \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right) \cdot (z_1 - z_2) \quad (\text{rovnice 3-14})$$

kde v je objem sedimentující částice, ρ její hustota, ρ_0 hustota disperzního prostředí a M hmotnost jednoho molu disperzních částic, c je koncentrace disperzních částic ve výšce z , g gravitační zrychlení, k_B Boltzmannova konstanta, R univerzální plynová konstanta,

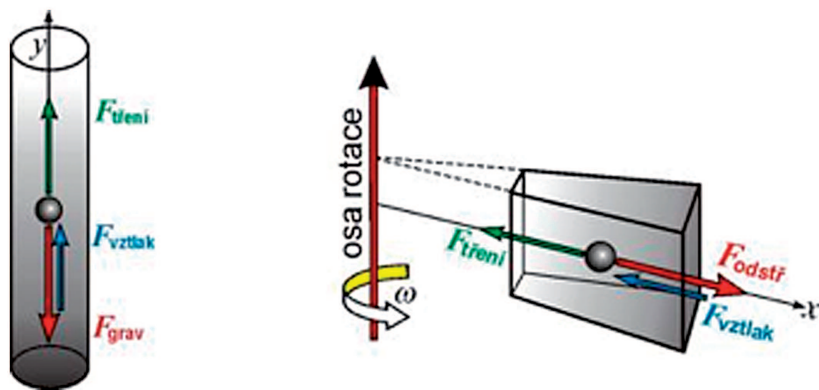
- v odstředivém poli se vzdáleností od osy rotace:

$$\ln c = \frac{v \cdot \omega^2 \cdot (\rho - \rho_0)}{2 \cdot k_B \cdot T} \cdot x^2 + konst \quad (\text{rovnice 3-15})$$

nebo
$$\ln \frac{c_2}{c_1} = \frac{v \cdot \omega^2 \cdot (\rho - \rho_0)}{2 \cdot k_B \cdot T} \cdot (x_2^2 - x_1^2) \quad (\text{rovnice 3-16})$$

kde ω je úhlová rychlost otáčení, n je počet otáček za jednotku času, c je koncentrace disperzních částic ve vzdálenosti x od osy otáčení.

Rychlost, jakou se usazují disperzní částice, nazýváme sedimentační rychlostí. Je-li zanedbatelná rychlost difúze, působí na sedimentující částici síla gravitační nebo odstředivá, zmenšená o vztlak, a proti ní síla tření (viz obrázek 41)



Obrázek 41: Síly působící na částici při sedimentaci v gravitačním a v odstředivém poli.

Rychlost sedimentace v gravitačním poli je konstantní; pohyb částice v ustáleném stavu je rovnoměrný (viz rovnice 3-17):

$$u_{sed} = \frac{v \cdot g}{f} \cdot (\rho - \rho_0) = \frac{m \cdot g}{f} \cdot \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right) = \frac{M \cdot g}{N_A \cdot f} \cdot \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right) \quad (\text{rovnice 3-17})$$

kde v je objem sedimentující částice, $m (= v \cdot \rho)$ její hmotnost, ρ její hustota, ρ_0 hustota disperzního prostředí a M hmotnost jednoho molu disperzních částic. Koeficient tření f může být vyjádřen z Einsteinovy rovnice pomocí difúzního koeficientu. Pro kulovité částice, velké ve srovnání s molekulami disperzního prostředí, platí Stokesova rovnice a vztah pro sedimentační rychlost (viz rovnice 3-18):

$$u_{sed} = \frac{2}{9} \cdot \frac{(\rho - \rho_0)}{\eta_0} \cdot r^2 \cdot g \quad (\text{rovnice 3-18})$$

kde η_0 je viskozita prostředí.

Pro rychlost sedimentace v odstředivém poli platí:

$$u_{sed} = \frac{dx}{d\tau} = \frac{v \cdot \omega^2 \cdot x}{f} \cdot (\rho - \rho_0) \quad (\text{rovnice 3-19})$$

kde ω je úhlová rychlost otáčení ($= 2 \pi n$; n je počet otáček), x vzdálenost disperzní částice od osy otáčení. Částice, vzdalující se při odstředování od osy otáčení, se pohybuje proměnnou, stále vzrůstající rychlostí. Pro časovou závislost vzdálenosti disperzní částice od osy otáčení platí rovnice 3-20 a 3-21.

$$\ln x = \frac{v \cdot \omega^2}{f} \cdot (\rho - \rho_0) \cdot \tau + konst \quad (\text{rovnice 3-20})$$

nebo

$$\ln \frac{x_2}{x_1} = \frac{v \cdot \omega^2}{f} \cdot (\rho - \rho_0) \cdot (\tau_2 - \tau_1) \quad (\text{rovnice 3-21})$$

Rychlost usazování roste s velikostí částic a rozdílem v hustotách, $(\rho - \rho_0)$, u sedimentace v odstředivém poli také s druhou mocninou úhlové rychlosti otáčení, klesá s rostoucí viskozitou prostředí. Velké částice se usazují mnohem rychleji než částice malé, u koloidních částic je sedimentační rychlost v gravitačním poli většinou malá, často neměřitelná. Měření sedimentační rychlosti může být použito ke stanovení velikosti částic (Bartovská a Šišková, 2005).

V reálné atmosféře však depozice částic probíhá poněkud odlišně, protože je zde velký vliv dalších faktorů, které v nemíchaném (laboratorním) prostředí nejsou zohledněny. Modely pro výpočet depoziční rychlosti v reálné atmosféře zahrnují obvykle informace o morfologii terénu, meteorologických podmínkách a velikosti částic. Modely, do kterých vstupují pouze údaje o velikosti částic, jsou omezeny jen na jeden určitý typ terénu, na což je potřeba si dávat pozor. V nedávné době několik studií pojednávalo o uplatnění setrvačnosti (hybnosti určené jejich hmotností) na účinnost zachytu částic. Další model zveřejněný nedávno bere v úvahu také shlukování částic do větších aglomerátů, které nastává díky přítomnosti mikroturbulencí. Pro modelování depozice částic aerosolu v podmínkách reálné

atmosféry se velmi osvědčuje Raupachův model (Raupach, 2001). Tento model zahrnuje do výpočtu depoziční rychlosti jak sedimentaci, tak i Brownovu difúzi²⁸, takže je parametrizován Schmidtovým číslem, frikční rychlostí a Stokesovým číslem. První člen rovnice 1-1 popisuje sedimentaci v gravitačním poli, první část druhého členu pak účinnost záchytu částice na daném povrchu a druhá část druhého členu uplatnění Brownovy difúze.

Bylo zjištěno, že účinnost záchytu závisí především na Stokesově čísle²⁹ (St) a typu povrchu. Přitom platí, že se účinnost záchytu zvyšuje, je-li $St < 1$; je-li $St \gg 1$ pak se blíží hodnotě 1 (viz obrázek 42). Je-li St menší než 1, pak je nutné účinnost záchytu extrapolovat. Zjednodušený vztah pro výpočet depoziční rychlosti, který z Raupachova modelu odvodili Bae a kol., je uveden níže (viz rovnice 3-22).

$$V_d = V_t + \frac{u_*^2}{u_r} \left[0,75a_f \left(\frac{St}{St + \alpha} \right)^2 + (0,25a_v Sc^{-2/3}) \right] \quad (\text{rovnice 3-22})$$

kde

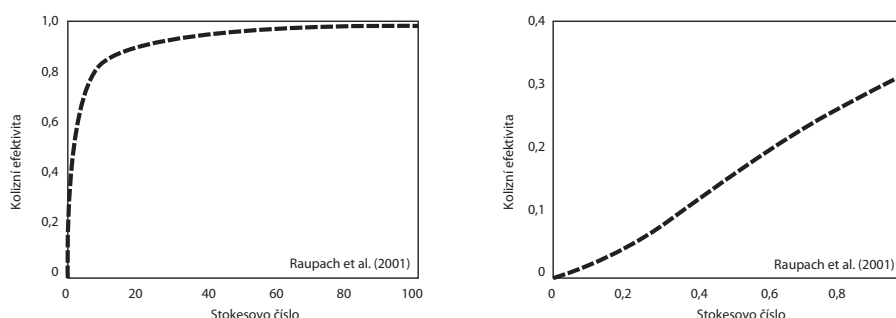
$$V_t = \frac{\rho_p d_p^2 g C_c}{18\mu_a}; St = \frac{\rho_p d_p^2 u_*^2}{18\mu_a \nu}; Sc = \frac{3\pi\mu_a^2 d_p}{\rho_a k_b T C_c}; C_c \cong 1 + 3,34 \frac{\lambda}{d_p}$$

Zde V_d je depoziční rychlost pro suchou depozici (cm.s^{-1}), ρ_p je hustota materiálu tvořící částice aerosolu (g.cm^{-3}), ρ_a je hustota vzduchu (g.cm^{-3}), d_p je aerodynamický průměr částic (cm), g je gravitační zrychlení (cm.s^{-2}), C_c je Cunninghamův korekční faktor, μ_a je viskozita vzduchu (g.cm^{-1}), u_* je frikční rychlost (cm.s^{-1}), u_r je rychlost větru v referenční výšce (cm.s^{-1}), Sc je Schmidtovo číslo³⁰, St je Stokesovo číslo, ν je kinematická viskozita ($\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$), k_b je Boltzmannova konstanta ($\text{g.cm}^2.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-2}$), T je teplota (K) a a_f jsou empirické parametry ($a_f = 2$; $a_v = 8$).

28 Jev, vedoucí k vyrovnávání koncentrací v systému, vyvolaný Brownovým pohybem.

29 Stokesovo číslo v obecné rovině vyjadřuje poměr brzdné dráhy částice k charakteristickému rozměru překážky, obecně se používá jako indikátor podobnosti chování částic při obtékání překážek.

30 Schmidtovo číslo v obecné rovině vyjadřuje poměr kinematické viskozity k difúznímu koeficientu.



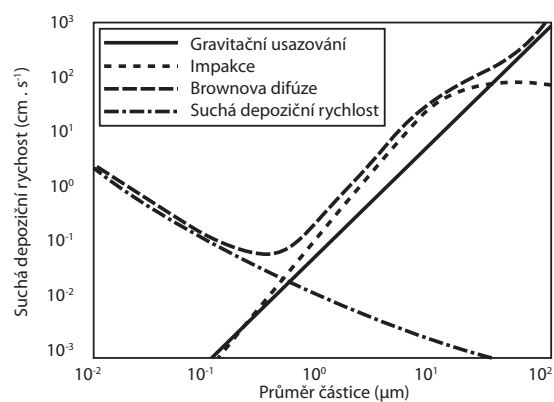
Obrázek 42: Účinnost záchytu v závislosti na hodnotě Stokesova čísla (Bae a kol., 2009).

Nespornou výhodou uvedené rovnice je, že ji lze úspěšně použít v praxi, protože hodnoty uvedených proměnných lze relativně snadno zjistit. Rovnice také umožňuje zahrnout charakter povrchu, nad kterým se oblak aerosolu rozptyluje. Tento parametr, který úzce souvisí s účinností záchytu částic, je popsán koeficientem α . Koeficient α lze snadno odečíst z tabulky (viz tabulka 28), která vychází z kategorizace navržené Weselym (Wesely, 1989).

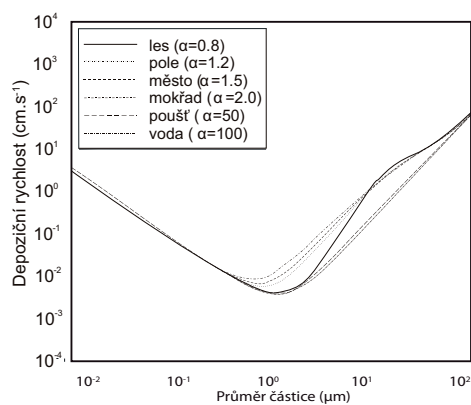
Tabulka 28: Hodnoty koeficientu α podle jednotlivých typů povrchů navržených Weselym (Zhang a kol., 2001).

Typ povrchu	α
Urbanizovaná krajina	1,5
Zemědělská krajina	1,2
Louky, pastviny	1,2
Listnatý les	0,8
Jehličnatý les	0,8
Smíšený les a mokřadní porosty	2,0
Vodní hladina a zamrzlé plochy	100
Poušť	50
Nezalesněné bažiny	1,2
Hory a skaliska	50

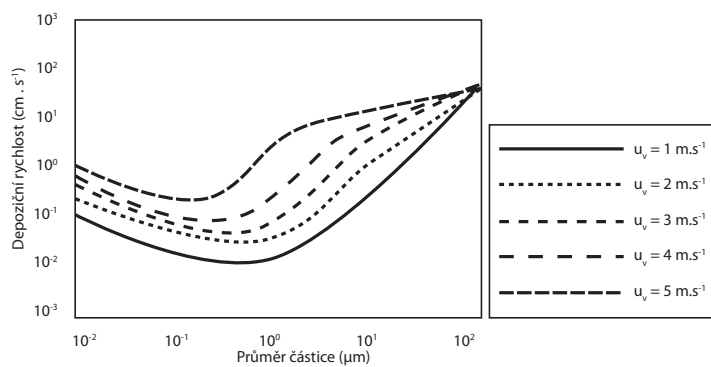
Obrázek 43 ukazuje, že z hlediska depoziční rychlosti je kritická hodnota velikosti částic $D_p = 0,5$ mikronu. Při této velikosti mají částice nejmenší V_d . Pro částice menší je dominantní Brownova difúze, pro částice větší pak impakce a gravitační sedimentace. Pro částice od $D_p 0,5$ do $10 \mu m$ převažuje impakce, pro částice větší pak sedimentace. Obrázek 44 prezentuje průběh hodnot depoziční rychlosti pro různé typy povrchů a obrázek 45 zohledňuje vliv rychlosti větru měřený v referenční výšce 10 metrů nad zemským povrchem.



Obrázek 43: Vliv jednotlivých procesů na sedimentaci částic.



Obrázek 44: Závislost depoziční rychlosti na typu povrchu (Bae a kol, 2009).



Obrázek 45: Závislost depoziční rychlosti na rychlosti větru (Bae a kol, 2009).

3.4.3 Emisní tok částic a depozice

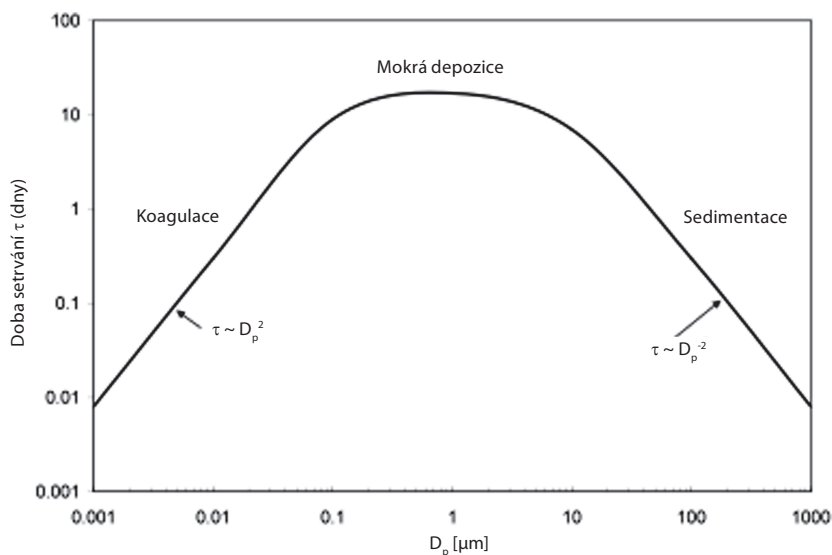
Emisní tok a doba setrvání aerosolu v atmosféře

Doba setrvání hrubého aerosolu v atmosféře je výsledkem rovnováhy mezi sedimentací a turbulentním promícháváním v přízemní vrstvě atmosféry. Uvažujeme-li tloušťku vrstvy kolem 1 km (tj. mezní vrstvu atmosféry), pak se doba setrvání částic pohybuje řádově od hodin po jeden až dva dny (Holoubek, online). Odhady emisí hrubého nebo jemného aerosolu z různých typů zdrojů jsou shrnuty v tabulce 29.

Tabulka 29: Globální odhadované emisní toky jemného a hrubého aerosolu (odhady provedeny v 90. letech 20. stol.).

Zdroj	Odhad emisního toku částic (10 ¹² g.rok ⁻¹)			Velikostní kategorie aerosolu
	Nizký	Vysoký	Nejlepší	
Přírodní				
Primární aerosol				
Prach (minerální aerosol)	1000	3000	1500	Hlavně hrubý
Mořská sůl	1000	10000	1300	Hrubý
Vulkanický prach	4	10000	30	Hrubý
Bioaerosol	26	80	50	Hrubý
Sekundární aerosol				
Sulfáty z biogenních zdrojů	80	150	130	Jemný
Sulfáty z vulkanického SO ₂	5	60	20	Jemný
Organická hmota z biogenních VOC	40	200	60	Jemný
Nitráty z NO _x	15	50	30	Jemný a hrubý
Přírodní celkem	2200	23500	3100	
Antropogenní				
Primární aerosol				
Prach z průmyslu, mimo saze	40	130	100	Jemný a hrubý
Saze	5	20	10	Hlavně jemný
Sekundární aerosol				
Sulfáty z SO ₂	170	250	190	Jemný
Spalování biomasy	60	150	90	Jemný
Nitráty z NO _x	25	65	10	Hlavně hrubý
Organická hmota z antropogenních VOC	5	25	10	Jemný
Antropogenní celkem	300	650	450	
Celkem emise	2500	24000	3600	

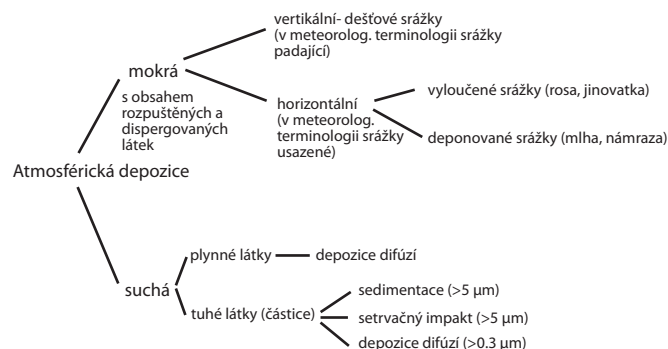
Obecně lze velikostní distribuci doby setrvání aerosolu v atmosféře zobrazit jako symetrickou nehomogenní funkci na obrázku 46. Pro částice menší nežli 0,1 μm , které jsou zejména zachytávány částicemi akumulárního modu vlivem Brownova pohybu, je jejich doba setrvání přibližně nepřímo úměrná velikosti difúzního koeficientu, tedy přímo úměrná druhé mocnině D_p . Naopak nepřímo úměrná druhé mocnině D_p je doba setrvání pro částice přibližně větší nežli 2,5 μm v důsledku jejich rychlé sedimentace. Pro částice o velikosti v rozmezí 0,1 až 2,5 μm (což odpovídá částicím akumulárního modu) dosahuje křivka v hodnotách doby setrvání maxima v řádu několika týdnů. Tato hodnota je daleko menší než by odpovídalo hodnotě průsečíku funkcí D_p pro předchozí dvě velikostní skupiny částic. Tento rozdíl je důsledkem faktu, že částice akumulárního modu se z atmosféry odstraňují zejména v mokré depozici, kdy se kromě sedimentace a difúze významně uplatňují další fyzikální jevy, jako je impakce a intercepce částic aerosolu na padající vodní kapičky (déšť, mrholení apod.), anebo koalescence, kdy tyto částice fungují jakožto kondenzační jádra.



Obrázek 46: Velikostní distribuce doby setrvání atmosférického aerosolu v hraniční vrstvě atmosféry (Hinds, 1999).

Atmosférické srážky a vznik mokré depozice

Depozice je obecně proces, kdy dochází k ukládání částic na površích (stěnách, podlaze, stropě, v trubkách, apod.) (Dohányosová a kol., 2007). V reálné atmosféře probíhá několik typů depozice, jejichž průběh a charakter závisí na řadě faktorů. Níže je uvedeno základní členění atmosférické depozice (viz obrázek 47).



Uvedené členění horizontálních srážek (vyloučené, deponované) v principu rozlišuje, zda voda, která se v tomto případě k zemskému povrchu dostává převážně advekčním přenosem nebo turbulentní difúzí, je ve skupenství plynném, nebo je již zkondenzována ve formě drobných kapiček (mlha). V prvním případě dochází ke kondenzaci až při kontaktu s povrchem, na kterém vznikají vyloučené srážky.

V meteorologické terminologii se v rámci mokré depozice rozlišují srážky padající a usazené (mlha). Další členění (vyloučené- deponované) se neužívá.

U suché depozice není daný typ členění- na vertikální a horizontální zaveden.

Obrázek 47: Jednotlivé procesy spojené s atmosférickou depozicí (Bartovská a Šišková, 2005).

Depoziční rychlosti částic různých velikostí lze vypočítat podle základního modelu (viz rovnice 3-23):

$$N = N_0 \exp(-\beta t) \quad (\text{rovnice 3-23})$$

kde N je aktuální počet částic, N_0 je počáteční počet částic a β je konstanta depoziční rychlosti.

Tento model lze aplikovat na data získaná měřeními aerodynamických průměrů částic ve sledovaném vzorku uvnitř hermeticky uzavřené komory, kdy lze vypočítat depoziční rychlost podle rovnice 3-24.

$$V = \frac{V\beta}{S}, \quad (\text{rovnice 3-24})$$

kde S je geometrický povrch měřicí komory a V je její objem.

Mokrá depozice představuje proces odstraňování plynných látek a tuhých částic z atmosféry přirozenou srážkovou činností³¹. Způsobují ji padající (vertikální) a usazené (horizontální) srážky. Mezi srážky vertikální patří déšť, mrznoucí déšť, mrholení, mrznoucí mrholení, sníh, sněhové krupky, sněhová zrna, krupky, zmrzlý déšť, ledové jehličky a kroupy. Kdežto rosu, jíní, námrazu a ledovku řadíme mezi srážky horizontální. Do srážkové vody se různé znečišťující příměsi dostávají buď již při samotném vzniku srážkových elementů tj. vodních kapiček nebo ledových krystalků uvnitř oblaku (hovoříme o vypršení), nebo v průběhu jejich padání v podoblačné vrstvě vzduchu (hovoříme o vymývání). Horizontální srážky se v oblastech nad 800 m.n.m. mohou výraznou měrou podílet na celkové atmosférické depozici. Ve výškách nad 1000 m.n.m. může dokonce mlha přispívat k celkovému vstupu atmosférických srážek do lesních půd větší měrou než padající srážky (Hůnová a Janoušková, 2004).

Hlavní podíl na odstraňování znečišťujících příměsí z atmosféry, tj. aerosolů a plynů, mají padající srážky. Vymývání aerosolu padajícími dešťovými kapkami je ale poměrně komplikovaný proces. Bylo zjištěno, že účinnost zachytu aerosolu v dešti roste s délkou jeho trvání, intenzitou padajících srážek, pádovou rychlostí kapek a se zmenšující se velikostí kapky (Hinds, 1999). Všechny tyto parametry jsou však odrazem druhu oblačnosti, ze kterých tyto srážky vypadávají, resp. procesů, které k jejich vzniku vedou.

Nejrůznější srážková činnost je spojena s většinou oblaků, ovšem ne každé padající srážky dosahují zemského povrchu (Skřehot, 2008). Jestliže při pádu srážky procházejí oblastí vzduchu dostatečně suchého, mohou se postupně vypařovat a dříve než dopadnou na zemský povrch, vypaří se zcela. To nastává především u oblaků středního a vysokého patra, protože srážky z nich vypadávající musejí procházet přes širší vrstvu vzduchu (Pretor-Pinney, 2006). Z oblaků vysokého patra často vypadávají ledové krystalky, které se při svém pádu také vypařují – sublimují. Podobně jako vodní kapky, ani krystalky nedosahují ve zmíněných případech zemského povrchu. Tento druh padajících srážek je nazýván virga. Virga má vzhled tenkých úponků řasového nebo nitkového vzhledu vycházejících víceméně kolmo ze základny oblaku. Vyskytne-li se virga pod základnou oblaku nízkého patra, bývá složena výhradně z vypařujících se dešťových kapek, ne větších jak 1 mm. Zkosený, zvlněný nebo šikmý vzhled virgy vypovídá o značném vertikálním střihu větru, který tvaruje vzhled padajících srážek (Podzimek, 1959).

Vysoké oblaky druhu Cirrus jsou de facto samy o sobě vlastně virgou, protože mají stejné složení jako pruhy vypadávající z oblaků Altocumulus, Altostratus, Cirrocumulus a z rozšířených částí vrcholových partií oblaků Cumulonimbus.

31 Z hlediska sledování kvality ovzduší je pojem depozice používán pro vyjádření hmotnosti atmosférické příměsi, která je uložena na jednotku plochy zemského povrchu za jednotku času v důsledku procesů vymývání příměsí z atmosféry

Virga tvořená ledovými krystalky bývá také pozorována v takzvaných „Hole-Punch Clouds“ – zvláštních kruhových oblačných dírách vznikajících v tenké, obvykle horizontálně rozsáhlé oblačnosti nacházející se ve středním nebo vysokém oblačném patře (Pretor-Pinney, 2006). Srážkové pruhy v podobě virgy tvořené vodními kapkami se vyskytují pod základnami oblaků Cumulonimbus, Cumulus, Stratocumulus a výjimečně i Nimbostratus. V případě kumulonimbu a nimbostratu je však běžnější, že pruhy dosahují až k zemskému povrchu (Delmas a kol., 2007; Diot, 2006) a proto se při vymývání částic aerosolu z ovzduší významně uplatňují.

Je tedy zjevné, že pokud mají vodní kapky dosáhnout zemského povrchu, musejí mít určitou minimální velikost, která zaručí, že se průchodem podoblačnou vrstvou nestačí vypařit. Množství vody, které každá kapka v sobě pojímá, určuje také rychlost jejího pádu. Čím je rychlost vyšší, tím snáze mohou větší kapky strhávat kapky menší a tak postupně narůstat. Dosáhne-li však kapka určitých limitních rozměrů, povrchové napětí vody již není schopné udržet kapku pohromadě a kapka se roztříští na dva až tři větší a několik menších fragmentů. Nárůst kapek však neprobíhá pouze při jejich pádu, ale i řadou jiných fyzikálních procesů, které souhrnně nazýváme koalescence.

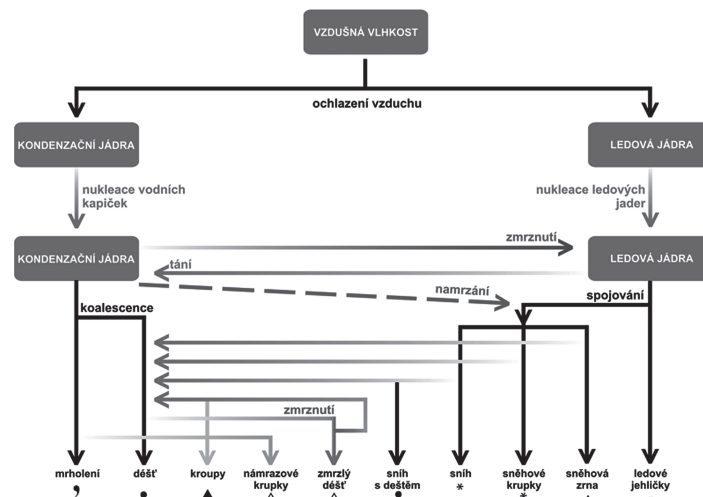
Koalescence a vznik padajících srážek

Koalescence je podobně jako agregace proces vedoucí ke spojování částic za vzniku jedné částice větší. Zatímco o agregaci hovoříme v souvislosti se spojováním tuhých částic, koalescence představuje spojování dvou nebo více kapalných částic v jednu, jejíž objem odpovídá součtu objemů původních kapiček. Spojování kapek je energeticky příhodné, protože jím dochází ke zmenšení povrchu a tedy ke zmenšení povrchové energie (při splnutí dvou stejných kapek se zmenší plocha povrchu o 41 %). Nejprve se mezi kapkami musí vytvořit tenký film disperzního prostředí, jehož zánik je v celém procesu energeticky nejnáročnější a splnutí kapiček de facto brání. Jeho odolnost tedy určuje rychlost celého pochodu a na stabilitu emulze vůči koalescenci má rozhodující vliv (Bartovská a Šišková, 2005). V okamžiku, kdy dojde k jeho porušení, proběhne ve zlomku vteřiny splnutí kapiček v jednu.

Podle druhu oblaku je velikost kapalných oblačných elementů obvykle mezi 10 a 100 μm (Podzimek, 1959). Největší z oblačných kapek pak opakovanou koalescencí dále narůstají a dosáhnou-li velikosti přibližně 1,2 mm začínají vypadávat z oblaku v podobě mrholení. Probíhá-li další narůstání kapek, vznikají již srážky dosahující zemského povrchu. Běžné dešťové kapky mívají obvykle velikost okolo 3 mm a kapky přívalových lijáků mohou díky intenzivním výstupným proudům, které je udržují v oblaku po dlouhou dobu, dorůstat až 6 mm (Day a Schaefer, 1991).

Ve středních a vysokých zeměpisných šířkách vznikají padající srážky téměř výhradně v oblacích smíšených. Srážky vznikají tak, že nad povrchem ledových

krystalků dojde ke stavu nasycení vodní páry za jejího nižšího parciálního tlaku, než je tomu za stejných podmínek vůči povrchu vodních kapiček. V případě, že jsou vodní páry vůči vodní kapičce v nasyceném stavu (nebo blízkém stavu nasycení), vůči ledu jsou již ve stavu přesyceném. Vodní pára tak začne přecházet difúzí podél koncentračního gradientu směrem k povrchu ledových částic, na kterých postupně namrzá. Jak ledové krystalky narůstají, vodní kapky se postupně vypařují, přičemž ledové krystalky tímto způsobem narůstají až do velikostí, kdy je jejich pádová rychlost dostačující k překonání vztlačkové síly tvořené hlavně vzestupnými pohyby vzduchu. Během pádu se ledová částice sráží s ostatními ledovými částicemi, se kterými se může postupně spojovat (agregovat) a dále tak narůstat. Průběžným spojováním, roztáváním, či opakovaným namrzáním srážkového elementu během jeho pádu tak vznikají různé druhy srážek, především pak kroupy. Schématicky jsou procesy vedoucí ke vzniku jednotlivých druhů srážek prezentovány na obrázku 48.



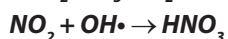
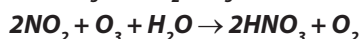
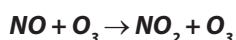
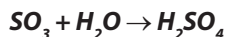
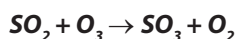
Obrázek 48: Schéma vzniku jednotlivých druhů padajících srážek upravený podle Delmase a kol. (Skřehot, 2008).

Z výše uvedeného schématu je zjevné, že pro **vymývání** i **vypršení** je nutné, aby se srážkový element během své existence alespoň po krátký čas vyskytoval v kapalném stavu. Srážky v podobě ledových jehliček, které vznikají pouhým spojováním (koagulací) ledových jader, nemohou k odstraňování částic znečišťujících příměsí téměř vůbec přispívat (s výjimkou adsorpce pevných částic na jejich povrchu). Naproti tomu ledové částice, na jejichž povrchu se byl po velmi krátkou dobu, může kapalná fáze vyskytovat (během jejich postupného namrzání), již mohou k vymývání přispívat (srážky v podobě sněhu, sněhových kroup a sněhových zrn). Jejich příspěvek v celkové mokré depozici je ale poměrně malý. Největší význam

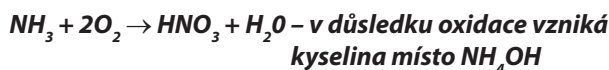
proto mají částice, které se po většinu doby své existence vyskytují v kapalném stavu. Vznikají-li díky přítomnosti kondenzačních jader, které jsou samy o sobě aerosolem, účastní se nejen vymývání, ale také vypršení. Vznikají-li roztátím ledových částic a následným vypadáváním v podobě kapalných srážek (mrholení a déšť), anebo zmrznutím kapalných částic a následným vypadáváním v podobě pevných srážek (kroupy, námrazové krupky a zmrzlý déšť), pak se účastní pouze procesu vymývání. V případě deště se uvádí se, že 1 cm³ dešťové vody tímto způsobem účinně vymyje cca 1 m³ vzduchu (Hůnová a Janoušková, 2004).

Atmosférické srážky se přirozenou cestou sytí také kyselinotvornými plyny obsaženými v ovzduší. Díky tomu dochází k jejich acidifikaci, tj. poklesu pH. Rozpouští-li se ve srážkách jen oxid uhličitý, je *pH* srážek přibližně 5,7, avšak v důsledku přítomnosti antropogenních imisí SO₂, NO_x (ze spalování fosilních paliv) se srážky acidifikují mnohem výrazněji. Pokles pH srážek tak může v průmyslových oblastech dosahovat hodnoty 3 až 4. Nejvíce se na acidifikaci srážek podílejí dusíkaté sloučeniny (emise NO_x) a to cca z 50 %.

Silné kyseliny vznikají prostřednictvím oxidačních a hydrolytických reakcí (viz obrázek 49). Konverze oxidů na kyselinu sírovou či dusičnou je velmi rychlá, přibližně 100 % za 1 hodinu v létě a 20 % za 1 hodinu v zimě. V „suché atmosféře“ se na vzniku obou kyselin podílí komplex fotochemických reakcí, zahrnujících vysoce reaktivní složky, jako např. ozón. Konverze oxidů na kyseliny je ve srovnání s „vlhkou atmosférou“ mnohem pomalejší, přibližně 16 % za den v létě a 3 % za den v zimě (Švehláková a kol., 2006).



(Přítomnost radikálu OH• v důsledku UV záření)



Obrázek 49: Chemické reakce spojené s okyselením srážek.

Kyselá atmosférická depozice (vertikální, horizontální) způsobuje významné zvýšení rychlosti chemického zvětrávání, neboť dochází k vyčerpání pufracích mechanismů půd (spotřeba reaktivních uhličitů a hydrogenuhličitů vápníku a hořčíku) a ke kyselé hydrolyze silikatických a alumosilikatických

minerálů. To vede k mobilizaci (přechodu do rozpustné formy) toxických prvků v půdách a sedimentech vodních toků (zejména Al, těžké kovy). Padající srážky obsahují oproti srážkám usazeným v průměru asi třikrát vyšší koncentrace kontaminujících látek, což se negativně odráží především na lesních porostech v horských oblastech (Bartovská a Šišková, 2005).

Obecně schopnost sytit se kyselinotvornými plyny s jejich následnou konverzí na příslušné minerální kyseliny je nejvyšší u nejmenších kapiček; naopak větší kapičky se výrazněji podílejí na zachytávání pevných částic (Manahan, 2005).

Tabulka 30: Klasifikace srážek vypadávajících z jednotlivých druhů oblaků podle Diota (Skřehot, 2008).

Hydrometeor	Značka	Druh oblaku						Hlavní charakteristiky		
		As	Ns	Sc	St	Cu	Cb	Nevypadává z oblaků	Velikost částic v mm	Při dopadu na tvrdou podložku odskakují
Déšť	●	x	x	x		x	x		0,5 až 5	Ne
Mrholení	☉				x				0,1 až 0,5	Ne
Sníh	*	x	x	x	x	x	x		2 až 20	Ne
Sněhová zrna	⚡				x				méně než 1	Ne
Sněhové krupky	*△			x		x	x		1 až 5	Ano
Ledové jehličky	↕							x	0,03 až 0,2	Ne
Kroupy	▲						x		5 až 50	Ano
Námrazové krupky	△						x		2 až 5	Ano
Zmrzlý déšť	△●	x	x						méně než 5	Ano
Charakteristika srážek		Víceméně homogenní, přerušované nebo déletrvající					Intenzivní až přiválové srážky			

Depozice plynných látek CO₂, NO_x, SO₂

K zemskému povrchu se dostávají difúzním transportem (turbulentní rozptýl) také plyny, u nichž se gravitace v důsledku zanedbatelné hmotnosti molekul plynu příliš neuplatňuje. Na povrchu (v půdách, povrchových vodách) jsou zachycovány v důsledku adsorpčních procesů (nebo i biologických procesů, jako např. fotosyntéza). Depozice plynů je kontinuálním procesem (oproti epizodickým srážkám). Např. u síry se polovina celkového množství dostává na zemský povrch v plynné formě (Ochrana ovzduší, 2002).

Depozice partikulární hmoty

Sedimentace částic v důsledku gravitace. Může probíhat:

- Difúzním transportem – záchyt částic na površích (uplatněním elektrostatických sil).
- Setrvačným impaktem – částice v důsledku mnohonásobně vyšší hmotnosti oproti molekulám atmosférických plynů nestačí reagovat na změnu směru proudění (např. při obtékání kopce apod.).
- Termoprecipitací – částice aerosolu se mohou usazovat také na chladných površích, neboť při styku s takovými povrchy částice ztrácejí svou kinetickou energii. Tento proces je využíván například pro měření množství tuhých aerosolových částic v ovzduší. Vysvětluje také usazování prachu na stěnách a stropě, poblíž kamen, radiátorů, lamp apod. (Bartovská a Šišková, 2005).

3.4.4 Resuspenze částic aerosolu

Velice důležitým zdrojem hrubých částic atmosférického aerosolu je prach produkovaný mnoha různými povrchy, jako jsou pouště bez vegetace, zemědělské plochy, povrchy silnic a cest, zdevastovaná krajina, staveniště a průmyslové zóny, nebo aerosoly produkované těžbou hornin či spalovacími procesy v průmyslu na celé naší planetě a v neposlední řadě pak při haváriích nebo teroristických útocích. V samých počátcích této problematiky čekala proto vědce celá řada výzkumů zaměřených na zjištění podílu geologických „matečných“ materiálů na celkové koncentraci atmosférického aerosolu. Zatím co částice frakcí PM₁₀ a PM_{2.5} jsou emitovány do atmosféry zejména vysokoteplotními procesy nebo vznikají konverzí plyn-částice, na formování jak hrubé tak jemné frakce se podílí proces nazývaný resuspenze.

Resuspenze je proces, který je velice úzce spjat s adhezí, odtrhnutím částic z povrchu matečného materiálu a jejich transport do atmosféry. Vzniká v důsledku silného vzdušného proudění, mechanickými silami, dopadem jiných částic nebo elektrostatickými silami. Reentrainment neboli odvátlí je specifický termín, který se váže na vysokorychlostní proudění. Na rozdíl od statické adheze může resuspenze obsahovat rolování a klouzání částic před jejich samotným vzletem. Síly potřebné ke vznosu těchto částic jsou stokrát menší než síly potřebné ke statickému odtržení částic v centrifuze.

Reentrainment je stochastický proces, kdy je možné pouze za určitých podmínek proudění spočítat aerosolové frakce dané velikosti, které budou odtrženy z povrchu. Čím je velikost částice a rychlost proudění větší, tím je větší pravděpodobnost reentrainmentu. Během častých turbulentních proudění vzniká na povrchu těles takzvaná tenká mezní vrstva. Částice menší než je tato vrstva jsou částečně chráněny před reentrainmentem. Pokud dojde k reentrainmentu těchto částic, je to jen díky vzniku náhodných turbulentních proudů, které pronikají skrze mezní vrstvu a odtrhávají částice. Tento reentrainment je časově závislý, čím delší časová expozice spolu se změnami rychlosti proudění (pulzování), tím větší reentrainment částic dané velikosti. Situace je jiná, pokud se na povrchu nachází vrstva částic. V tomto případě mohou vzniknout dva procesy. Prvním případem je odtržení jednotlivých částic z horní části této vrstvy v podobě jednotlivých částic nebo malých shluků. Tento proces se nazývá **eroze**. Druhým procesem je **denudace**, která spočívá v odtržení částic. Proces reentrainmentu, který převládne, bude vždy záviset na adhezivních silách mezi částicemi navzájem a mezi částicemi a povrchem. Eroze sílí v závislosti na době expozice vzdušnému proudění, zatímco denudace je kompletní v čase kratším než jedna sekunda. Některé studie ukázaly, že denudace různých částic minerálních prachů o velikostech od 10 do 87 μm probíhaly během rychlosti proudění vzduchu od 3 do 10 m.s^{-1} (Zimon, 1982).

Vrstva částic může být také kromě vzdušného proudění resuspendována dopadem jiných částic. Tento způsob resuspenze je dokonce častější a má podstatný význam pro erozi půdy, emisi pouličního prachu a záchytu nesprávných částic při gravimetrických měřeních atmosférického aerosolu. Resuspendovaný aerosol z pouličního prachu a zemědělských ploch přilehlých k městu se výrazně podílí na celkovém množství aerosolu rozptýleného v městském i periferním ovzduší (Watson a kol., 1989). Studie prováděné na západním pobřeží USA v 90. letech 20. století ukazují, že na celkové imisi PM_{10} se až z 80 % podílí resuspendovaný aerosol (California Air Resources Board, 1990).

Některé druhy resuspendovaného aerosolu o vysoké koncentraci mají schopnosti velice destruktivně explodovat. V průměru je ve Spojených státech více než 40 explozí prachů za rok (Factory Mutual, 1998).

3.4.5 Reaktivita aerosolů a jejich chemismus

V posledních letech je předmětem zkoumání také chemismus atmosférických aerosolů, tedy jakých chemických reakcí se účastní, a jaké jsou produkty těchto reakcí. Tyto reakce jsou velmi složité a není jednoduché je studovat. Aerosol se může účastnit přímých chemických reakcí nebo reakcí katalytických, tj. může být jak reaktantem tak i katalyzátorem. Základním kritériem, které určuje chemismus aerosolu, je chemické složení materiálu, z něhož jsou částice tvořeny.

Specifická reaktivita aerosolů je vzhledem k velké disperzitě a tedy obrovské ploše fázového rozhraní vysoká. V atmosféře částice aerosolu reagují výlučně s plyny, takže se jedná o reakce heterogenní. Díky velkému měrnému povrchu se na částice snadno adsorbují nejrůznější plyny. Je-li na povrchu částic adsorbováno značné množství kyslíku, pak může i při jeho relativním nedostatku ve vzduchu snadno dojít k jejich zahoření. Jelikož částice aerosolu mají také malou tepelnou vodivost (pomalý odvod reakčního tepla, který způsobí místní přehřátí), mohou hořet i látky, které v kompaktní formě se vzduchem nereagují (např. mouka, cukr, síra, pyroforické kovy). Exotermní chemické reakce, zvláště oxidace, mohou díky tomu dosáhnout velikých rychlostí, což může vést až k výbuchu (Bartovská a Šišková, 2005). Výbuchy aerosolů jsou nebezpečnější než výbuchy plynů, neboť při výbuchu tuhé látky dochází k podstatně větším objemovým změnám (blíže je o této problematice pojednáno v kapitole 3.6.2).

V případě katalytických reakcí zajišťují částice aerosolu výměnu elektronů. Relativně dobře je prozkoumána hydrolýza oxidu dusičitého NO_2 , která probíhá za přítomnosti vodní páry na povrchu křemičitých částic. Oxid dusičitý se oxiduje a rozkládá za vzniku hydroxidu nitrosylu (HONO). Díky schopnosti částic přenášet náboj vzniká z této látky hydroxylový radikál $\text{HO}\bullet$, který se sorbuje na jejich povrchu a dále reaguje s karbonylovými sloučeninami (např. aceton, acetaldehyd, formaldehyd apod.) nebo s celou řadou dalších látek (např. i NaCl za vzniku hydroxidu sodného).

Chemismus velice závisí také na velikosti částic. Velmi malé částice podléhají fotochemickým reakcím, protože snadno absorbují fotony, zatímco velké částice snadněji adsorbují plyny či páry (Jungwirth, 2003).

3.5 Oblaky

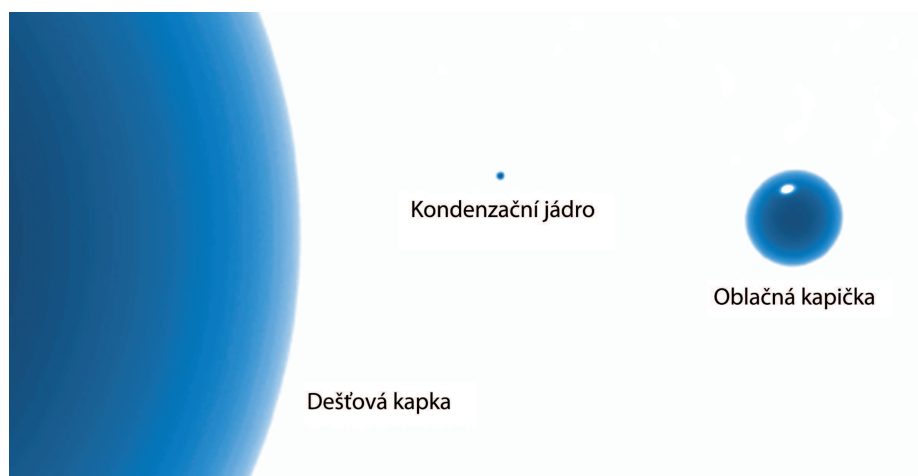
Narůstání kapiček pouhou molekulární difúzí, tj. agregací jednotlivých molekul vody, je jev velmi pomalý, a proto se v reálných podmínkách na vzniku oblačných elementů tvořených kapalnou vodou podílí jen minimálně. Stejně je tomu i v případě vzniku ledových krystalků, kde je narůstání částic desublimací par, takřka vyloučen. Naproti tomu procesy související s kondenzací vody na kondenzačních jádrech, resp. mrznutí kapiček při tvorbě krystalků, jsou mnohem významnější a také rychlejší. Výrazně se též při vzniku oblačných elementů uplatňuje narůstání kapiček koalescencí, která může probíhat různými způsoby (gravitační koalescence, turbulentní, elektrostatická, spontánní a aerodynamická).

3.5.1 Oblačné kapičky

Velikostní distribuce kapiček v jednotlivých druzích oblaků má obvykle tvar jednodálí asymetrické křivky s jedním vrcholem nazývaným modální průměr. Ten vyjadřuje průměr kapiček o velikosti nejvíce zastoupených v celém souboru (oblaku), avšak pro vyjadřování velikostí kapiček v oblaku se více používá hodnota středního průměru kapiček, jehož absolutní hodnota je vždy o něco větší, než hodnota modálního průměru (Bednář, 1989).

Velikosti kapiček v jednotlivých druzích oblaků nejsou stejné (viz obrázek 50). Větší průměrné velikosti můžeme nalézt v oblacích s vertikálním vývojem (Cumulus congestus, Cumulonimbus) a v dešťových oblacích (Nimbostratus). Ve spodní části nimbostratu byly naměřeny velikosti kapiček od několika mikrometrů do 42 μm a v horní části oblaku až 100 μm . Menší velikosti kapiček, a to 6 až 40 μm , byly zjištěny ve vrstevnatých oblacích (Stratus) a nejmenší v oblacích Altostratus a Stratocumulus. Střední velikosti kapiček v oblacích Cumulus a Stratus činí okolo 9 μm , v oblacích Stratocumulus okolo 12 μm a v oblacích Nimbostratus okolo 18 μm . V přízemních mlhách pak mají kapičky střední velikost 21 μm (Podzimek, 1959; Bednář, 1989).

Nejlépe probádaným druhem oblaků je v tomto ohledu Cumulus. Při leteckých výstupech bylo zjištěno, že průměrná velikost kapiček od základny oblaku se stoupající výškou roste. Maximální hodnoty průměrných velikostí kapiček lze nalézt v horní polovině oblaku, přičemž směrem k vrcholu pak velikost kapiček již zůstává víceméně stejná, nebo se mírně zmenšuje (Podzimek, 1959).



Obrázek 50: Porovnání velikostí dešťové kapky (2 mm), oblačné kapičky (0,02 mm) a kondenzačního jádra (0,0002 mm).

3.5.2 Ledové krystalky

Vznik ledových krystalků probíhá mrznutím kapalných zárodků vzniklých na kondenzačních jádrech. Ovšem mrznutí oblačných kapiček je v reálných podmínkách děj energeticky náročný, protože při něm dochází k uvolnění latentního tepla tuhnutí do okolního prostředí v souvislosti se změnami povrchové energie v povrchové bláně kapky. Z tohoto důvodu kapky často zůstávají v kapalně fázi i velmi hluboko pod bodem mrazu (existence kapiček byla v oblacích prokázána až k teplotám $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$). Kapička pro zmrznutí totiž potřebuje, aby v ní existovalo nebo se vytvořilo jádro, které působí jako centrum krystalizace. Pokud takové krystalizační jádro kapka obsahuje, dojde k jejímu zmrznutí prakticky ihned, jakmile teplota v oblaku s ohledem na aktivitu daného jádra dosáhne kritické teploty. Je prokázáno, že nejaktivnější ledová jádra působí mrznutí kapiček při teplotách kolem $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$. S dalším poklesem teploty (resp. výstupem vzduchového elementu do vyšších výšek) pak počet ledových částic skokově narůstá, takže ve výšce nad 9000 metrů, kde již panují teploty nižší jak $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$, se vyskytují pouze ledové krystalky (Bednář, 1989).

3.6 Aerosoly v pracovním prostředí

V hovorové řeči často slyšíme pojem **prašnost** (například ve spojitosti s kvalitou pracovního prostředí nebo emisemi z průmyslu či dopravy). Je však důležité zmínit, že prašností rozumíme znečištění ovzduší hrubými částicemi. Z hlediska mikrostruktury je prašnost aerosolem, který je složen z částic pevných materiálů

nebo drobných kapiček (obvykle se jedná o směs obou) rozptýlených v ovzduší anebo reverzibilně usazených na površích předmětů. Podle mechanismu vzniku a velikosti částic se tento aerosol dělí na **prach** (vzniká drcením a mletím pevných hmot), **kouř** (vzniká spalováním organických látek) a **dým** (vzniká oxidací anorganických látek). V případě kapalného aerosolu vzniklého kondenzací vodní páry pak hovoříme o mlze. Prach je pak definován jako částice hmoty nespecifikovaného původu nebo složení o velikosti od 1 µm do 150 µm (ČSN EN 60068-2-68).

Tabulka 31: Průměrné hmotnostní koncentrace prachu ve venkovním ovzduší a v pracovním prostředí bez odsávání (Richter, 2003).

Místo	Hmotnostní koncentrace (mg.m ⁻³)
vzduch na venkově	cca 0,02
lázeňská města	0,07 – 0,134
průmyslová velkoměsta	0,2 – 5,0
obchody a obchodní domy	5,0 – 8,0
školy	18,0
pily	15 – 20
hutě	nad 15
strojířny, papírny	20 – 25
slévárny	20 – 60
obilné mlýny	45 – 50
čištění odlitků, výlisků, plechů, brusířny	75 – 550
důlní vzduch	100 – 300
složisté a zásobníky rud	100 – 500
nakládka stavebních hmot	100 – 950
příprava surovin porcelánek a skláren	cca 120
pivovary a sladovny	cca 240
balení a pytlování sypkých hmot	do 700
drtírny a mlýnice stavebních hmot	150 – 1000
dopravníky slínku cementáren	225 – 2000

Z tabulky 31 je patrný široký rozsah koncentrací prachu v průmyslových plynech s kolísáním v rozmezí až dvou řádů v extrémních provozních režimech vyvolaných např. změnami teploty a vlhkosti materiálu i plynu, změnami jemnosti mletí, aglomerací nebo rozpadem částic prvotně vzniklých (Richter, 2003). Kromě výše uvedených způsobů, mohou prachy vznikat také následkem výbuchů. Ty lze s ohledem na kauzální příčinu rozdělit do tří skupin:

- výbuchy účelové vzniklé řízenou činností,
- výbuchy vzniklé jako následek vojenských operací,
- výbuchy vzniklé jako následek nežádoucích událostí,
- výbuchy vzniklé jako následek teroristických útoků.

Mezi řízené exploze lze řadit výbuchy spojené s těžbou nerostů a hornin nebo se stavebními dobývacími pracemi (např. při ražbě tunelů, při stavbách přehrad, silnic apod.). Mezi výbuchy, které vznikají v důsledku rozvoje nežádoucích událostí, pak lze zařadit provozní havárie v průmyslu nebo výbuchy vzniklé v důsledku nehod při přepravě nebezpečných látek. V poslední době se také stále více rozmáhá fenomén teroristických útoků, při nichž mohou teroristé využít průmyslových nebo vojenských výbušnin, nebo mohou svým záměrným přičiněním způsobit explozi zařízení obsahující výbušnou látku.

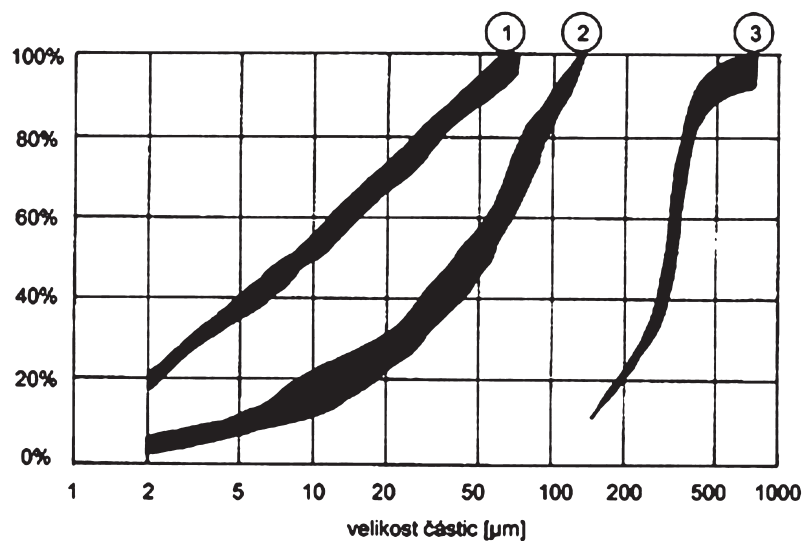
Prach je pro účely jeho hodnocení a stanovování v pracovním prostředí charakterizován koncentrací částic, jejich velikostí a jejich fyzikálními, chemickými a biologickými vlastnostmi. Většina částic prachu má rozměry, které si jsou ve všech třech geometrických osách blízké. V případě, že jeden rozměr převyšuje výrazně zbývající dva (obvykle minimálně třikrát) hovoříme o prachu vláknitém. Bylo prokázáno, že aerodynamický průměr vláknitých částic závisí zejména na jejich průměru (tloušťce). Minerální vlákna o průměru menším než 3 μm jsou respirabilní.

Prachové částice rostlinného a živočišného původu jsou lehčí než částice původu anorganického. Jsou většinou vláknité, rozvětvené nebo v chomáčcích, zatímco anorganické částice jsou hranolovité nebo kulovité s hladkými i ostrými hranami, velmi často hranaté nebo špičaté.

Jelikož ale chování částic v dýchacím ústrojí je opět závislé na jejich velikosti, užívá se i v toxikologii aerosolů ekvivalentního aerodynamického průměru částic. Díky tomu lze eliminovat komplikace související se složitými tvary těchto částic a lze pak různé částice vzájemně srovnávat. Zkoumáním směsi prachu křemene, živce a olivínu širokého spektra velikostí primárních částic bylo zjištěno, že v obecné rovině lze tento prach (drť) rozdělit na tři základní frakce:

- jemný prach: $D_p < 75 \mu\text{m}$,
- hrubý prach: $75 \leq D_p \leq 150 \mu\text{m}$,
- jemný písek: $150 < D_p \leq 850 \mu\text{m}$.

Rozdělení velikosti částic v celkovém spektru lze pak vyjádřit pomocí níže uvedeného grafu (viz obrázek 51). Na ose x je vynesena velikost částic, na ose y pak celkové zastoupení všech částic příslušného rozměru a menších (z celku). Šíře jednotlivých oblastí vystihuje odchylku naměřených hodnot.



Obrázek 51: Rozdělení velikosti částic jemného prachu (1), hrubého prachu (2) a jemného písku (3) podle IEC 725-2-5.

V prachovém oblaku jsou zastoupeny částice s geometrickým průměrem řádově od setin do několika desítek mikrometru. Všeobecně se však s ohledem na své sedimentační vlastnosti dělí prachové částice podle geometrického průměru D_g do tří skupin:

- $D_g > 10 \mu\text{m}$,
- $1 \mu\text{m} \leq D_g < 10 \mu\text{m}$,
- $D_g < 1 \mu\text{m}$.

Z hlediska interakce prachu s dýchacím ústrojím se pak podle velikosti dělí soubor částic obsažených v aerosolu do několika frakcí. Soubor všech částic, které mohou být vůbec vdechnuty, je aerosol (dříve často označovaný jako prach) **vdechovatelný**. Aerosol **thorakální** je tvořen částicemi, které mohou proniknout do dýchacích cest na úroveň hrtanu; prach **respirabilní** tvoří částice, které se mohou dostat až do plicních sklípků.

3.6.1 Usazování prachů v pracovním prostředí

Díky svým mikroskopickým rozměrům se aerosol usazuje natolik pomalu, že vytváří po určitou dobu kvazistabilní systém. V oblaku aerosolu se v průběhu času mění zastoupení částic podle velikostí. Částice větší postupně sedimentují, nejmenší částice se naproti tomu díky Brownovu pohybu trvale vznášejí ve vzduchu.

Při usazování různých částíček prachu z ovzduší se uplatňují různé vlivy. Nejvýznamněji působí zemská přitažlivost a elektrická přitažlivost částic, které usazování podporují, naproti tomu usazování znesnadňuje odpor vzduchu, proudění vzduchu a elektrická repulze sousedních částic. Elektrický náboj nese většina prachových částic. Získávají ho zejména absorpcí iontů z okolního prostředí, nebo třením mezi sebou nebo o jiná pevná tělesa. Nekovový prach stejně jako kyselinotvorné oxidy se nabíjí kladně, kovový prach a zásadotvorné oxidy záporně. Různě nabitě částice se spojují a tedy i rychleji sedimentují. Dostanou-li se pak tyto částice do elektrického pole, pohybují se v závislosti na intenzitě pole a velikosti svého náboje.

Obecně platí, že částice větší jak 10 μm sedimentují poměrně rychle. Částice velikosti 1 μm sedimentují pozvolna a částice menší jak 0,1 μm se již prakticky neusazují vůbec, neboť vlivy, které usazování brání, zcela převáží. Nejvýznamnější rušivý faktor je proudění vzduchu. Bylo zjištěno, že i velmi slabé proudění zcela znemožní sedimentaci částic menších jak 1 μm . V klidném prostředí se částice větší jak 10 μm usazují za několik minut po svém vzniku a to v těsné blízkosti místa zdroje. V ovzduší zamořeném prachem proto převládají částice menší jak 10 μm , dominantně pak s rozměry do 2 μm . Rychlost usazování prachu byla podrobně studována také v závislosti na typu oblasti. Typem oblasti se rozumí tři základní charakteristická prostředí (venkovní a předměstská, městská a průmyslová), k nimž byly zjištěny střední hodnoty rychlostí usazování (viz tabulka 32).

Tabulka 32: Hodnoty přirozené sedimentace polévatého prachu v jednotlivých oblastech (zdroj Hinds, 1999).

Oblast	Rychlost usazování ($\text{g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$)
Venkovská a předměstská	0,01 – 0,36
Městská	0,36 – 1,00
Průmyslová	1,00 – 2,00

Koncentrace prachu v pracovním prostředí se udává v hmotnosti veškerých částic obsažených v jednotce objemu vzduchu (mg.m^{-3}) nebo počtem částic v jednotce objemu vzduchu, což je obvyklé u vláknitých prachů (cm^{-3}).

3.6.2 Výbušnost aerosolů a protivýbuchová prevence

V podstatě jakýkoliv materiál schopný oxidace včetně organických materiálů a některých anorganických prvků a kovů hoří, pokud je přítomen ve vzduchu v podobě aerosolu v dostatečně vysokých koncentracích. Minimální koncentrace těchto aerosolů vedoucí k explozím je 20 až 200 g.m⁻³. K výbuchům směsí hořlavých plynů či aerosolů (tj. par kapalin a prachových částic) se vzduchem popř. s kyslíkem dochází především působením vnějších příčin, tj. vadným nebo nevhodně zvoleným materiálem nebo zařízením, poruchou měřicího a zabezpečovacího zařízení, nedbalým a nezodpovědným přístupem osob a v neposlední řadě neznalostí příslušných předpisů a bezpečnostních opatření (Mokoš, 2007).

Podstatný vliv na výbušnost aerosolů má velikost částic. Čím jsou částice menší, tím více se snižuje teplota jejich vznícení, a tak se může stát, že látka, která je v kompaktním stavu za normálních podmínek nehořlavá, ve formě prachu velice dobře hoří a vybuchuje. Obecně lze říci, že ve formě prachu hoří téměř všechny pevné látky s výjimkou čistě anorganických, jako je dolomit, vápenec a další oxidy a soli kovů. Ze samostatných prvků jsou nebezpečné prachy kovů jako je hliník, který má největší rychlost narůstání tlaku a jednu z nejvyšších hodnot maximálního výbuchového tlaku, dále hořčík, případně titan, zirkon, železo a další. Z nekovových prachů je nebezpečný prach síry, která má nízkou teplotu vznícení a sklon k tvorbě elektrostatických nábojů. Uhelný prach je nebezpečný výbuchem hlavně v dolech, výbušnost závisí na kvalitě uhlí a výbuch uhelného prachu bývá většinou následný po výbuchu metanu, který rozvíří uhelný prach a iniciuje ho. Samozřejmě rozvířený uhelný prach je výbušný i v jiných uzavřených provozech (Mokoš, 2007).

Řada přírodních výbušných prachů je skoro neomezená. Veškeré organické prachy jsou výbušné, ať už vznikají jako nežádoucí produkt při zpracování nebo jsou hlavním produktem výroby. Je to senný a obilní prach, škroby a mouky, cukr, kakao, čaj, koření, tabák, kávoviny, sušené mléko, dřevěný a korkový prach, prachy vláknitých látek – lnu, bavlny, buničiny, kouděle, konopí, juty. Jsou velmi náchylné k tvorbě elektrostatického náboje a mají nízké dolní meze výbušnosti. Patří sem i prachy vyráběných látek jako jsou mýdlové prášky, barviva, léčiva, výbušniny, tuhé uhlovodíky, plasty aj. (Mokoš, 2007). Pokud je tento prach navíc rozptýlen ve vnitřních prostorech budov a exploduje, stává se, že po prvním výbuchu následuje několik dalších explozí. Příčinou je tlaková vlna vzniklá při první explozi, která resuspenduje prach deponovaný na zemi a stěnách, čímž sekundárně vzniká nová výbušná směs.

Značným rizikem vzniku pracovních úrazů, havárií a nehod je provozování zařízení a objektů, kde se vyskytují rizika s nebezpečnými plyny, parami a prachy bez realizovaných zásadních preventivních bezpečnostních opatření. Ochrana

před nebezpečím výbuchu je tak součástí zabezpečení vyšší úrovně bezpečnosti a ochrany zdraví zaměstnanců (Kořínek, 2005). Výbušnost vykazují hořlavé (oxidovatelné) materiály za následujících podmínek:

- koncentrace hořlavého plynu nebo aerosolu je v mezích výbušnosti,
- plynné prostředí obsahuje určité minimální množství kyslíku,
- iniciace zážehu má dostatečnou energii.

Všechny výše uvedené podmínky musí být splněny současně, má-li dojít k výbuchu. Stručný přehled odvětví, ve kterých je možné s ohledem na výše uvedené podmínky předpokládat nebezpečí výbuchu aerosolů, je uveden v následující tabulce 33:

Tabulka 33: charakteristika nebezpečí výbuchu aerosolu ve vybraných průmyslových provozech (Kořínek, 2005).

Odvětví	Nebezpečí výbuchu
Chemický průmysl	Hořlavé plyny, kapaliny a pevné látky jsou přeměňovány a zpracovávány v mnoha různých procesech v chemickém průmyslu. Tyto procesy mohou vést ke vzniku výbušných směsí.
Rafinérie	Všechny uhlovodíky, které jsou zpracovávány v rafinériích, jsou hořlavé látky a v závislosti na jejich bodech vzplanutí může vzniknout výbušná atmosféra dokonce i při okolní teplotě. Prostory okolo zařízení pro zpracování ropy jsou obvykle považovány za prostory, ve kterých může vznikat výbušná atmosféra.
Farmaceutický průmysl	Při výrobě léků jsou často používány alkoholy jako rozpouštědla. Mohou být používány i přísady a pomocné materiály, jako je laktosa, které mohou způsobit výbuch prachu.
Plynárenský průmysl	Při úniku zemního plynu, např. z netěsností může vznikat směs výbušného plynu se vzduchem.
Energetický průmysl	Kusové uhlí, které netvoří se vzduchem výbušnou směs, může být přepracováno při dopravě, mletí a sušení na hořlavý uhelný prach, schopný vyvolat výbušnou směs prachu se vzduchem.
Čištění odpadních vod	Při zpracovávání odpadní vody v čističkách mohou vznikající plyny vytvářet výbušné směsi plynu se vzduchem.
Skládkování odpadů	Na skládkách mohou vznikat hořlavé plyny. Je nutné vypracování technického řádu, aby bylo vyloučeno nekontrolované uvolňování plynů a možnost vznícení.
Recyklace odpadů	Zpracování odpadu při recyklaci může způsobit nebezpečí výbuchu, např. z plechovek nebo jiných kontejnerů hořlavých plynů a/nebo kapalin, které nebyly úplně vyprázdněny nebo prach z papíru nebo plastů.
Dřevozpracující průmysl	Při zpracovávání dřeva vzniká dřevný prach. Tento prach může vytvářet výbušnou směs prachu se vzduchem, např. ve filtrech nebo odlučovačích.
Povrchové úpravy	Přestřiky, které vznikají ve stříkacích boxech a uvolňované páry ředidel mohou vést ke vzniku výbušné atmosféry, po jejich smíchání se vzduchem.
Provozy kovoobrábění	Při výrobě tvarovaných částí z kovů mohou vznikat během povrchové úpravy (broušení) hořlavé kovové prachy. To platí zvláště pro lehké kovy. Tyto kovové prachy mohou způsobit nebezpečí výbuchu v odlučovací prachu.

Odvětví	Nebezpečí výbuchu
Potravinářský průmysl a výroba krmiv	Při dopravě a skladování zrní, cukru apod. mohou vznikat hořlavé prachy. Pokud jsou prachy odsávány a odlučovány ve filtrech, může ve filtru vznikat výbušná atmosféra.
Zemědělství	Na některých farmách jsou zařízení pro výrobu bioplynu. Při úniku bioplynu, např. z netěsností, může vznikat směs výbušného plynu se vzduchem.

Z hlediska výbušnosti prachů je důležitá jejich koncentrace ve směsi se vzduchem. Toto pásmo je pro každou látku specifické a je omezeno horní mezí, známou jako horní mez výbušnosti (HMV, anglicky UEL) a spodní mezí, známou jako dolní mez výbušnosti (DMV, anglicky LEL). Uvnitř tohoto pásma tvoří látka se vzduchem hořlavou (výbušnou) směs (viz tabulka 34). U plynů a par hořlavých kapalin se dolní a horní mez udává v objemových procentech nebo u par kapalin (g.m^{-3}) (Mokoš, 2007).

Tabulka 34: Dolní meze výbušnosti některých prachů (Richter, 2005).

Skupina	Druh prachu	Minimální koncentrace kyslíku (obj. %)	Minimální koncentrace prachu (g.m^{-3})
1	černé uhlí, koks	16	10 – 12
2	hnědé uhlí, rašelina	14	6 – 8
3	dřevěný prach, uretany, syntetické pryskyřice	10	8 – 12
4	polystyren, kasein, bavlna	5	6 – 12
5a	hliník	cca 1	7
5b	hořčík, zirkon	cca 1	5

Poznámka: do skupiny 4 lze také řadit suché jemné prachy s nízkým obsahem popelovin, např. prach korkový, cukrový, sladový, škrobový, z kůže a bavlny, prach sirný, dusíkatých hnojiv aj. práškovitých chemikálií; do skupiny 2 a 3 lze řadit suché práškovité hmoty s vyšším obsahem popelovin, např. saze, prach z kakaa, koření, mýdel, pracích prášků, jantarového a zinkového prachu.

Problematika bezpečnosti a ochrany zdraví zaměstnanců vystavených nebezpečí výbuchu je v české legislativě ošetřena nařízením vlády č. 406/2004 Sb. Aby byla opatření provedená zaměstnavatelem přesně určená a průkazná, ukládá nařízení vlády zaměstnavateli povinnost vypracovat dokumentaci o ochraně před výbuchem, jejíž obsah je následující (Petrus, 2006):

- identifikace všech výbušných prachů a zjištění jejich výbuchových charakteristik,
- stanovení zón v prostředí s nebezpečím výbuchu,
- analýza iniciačních zdrojů,
- návrh technických opatření,
- návrh organizačních opatření.

Jak je zřejmé z tabulek 33 a 34, má každý aerosol (prach) své specifické výbuchové charakteristiky, které určují jeho nebezpečnost. Řada prachů a jejich charakteristik je vzhledem k jejich četnému výskytu dobře známa, u prachů, které se vyskytují zřídka nebo jsou tvořeny jako speciální směsi, je třeba tyto parametry zkouškou zjistit.

Uvnitř všech zařízení, ve kterých se vyskytuje prach, a v jejich okolí je třeba na základě doby trvání nebezpečné výbušné atmosféry stanovit zóny v prostředí s nebezpečím výbuchu prachů. Následně je potřeba podle stanovené zóny provést analýzu iniciačních zdrojů. Výsledkem této analýzy je definování rizikových zařízení, u kterých není možné v požadovaném rozsahu vyloučit současný výskyt výbušné atmosféry a iniciačního zdroje. U těchto zařízení je třeba pro dosažení požadované úrovně bezpečnosti provést návrh technických opatření, která mohou vést k vyloučení iniciačních zdrojů (preventivní opatření) nebo mohou případné účinky výbuchu omezit na přijatelnou úroveň (ochranná opatření). Při návrhu ochranných opatření se vždy vychází z výbuchových charakteristik konkrétního výbušného prachu, umístění, instalace a konstrukce zařízení. Tyto informace rozhodují o způsobu zabezpečení, kterým může být odlehčení výbuchu, potlačení výbuchu, zabránění přenosu výbuchu anebo jejich kombinace (Petrus, 2006).

Kontinuální, anebo dostatečně častá odvětrávání prostor s nebezpečím výbuchu a taktéž vhodné prostorové uspořádání pracoviště, jsou základní systémová/organizační preventivní opatření. Ovšem jistým úskalím může být, že v místech, která nejsou dostatečně odvětrávána, může nastat situace, kdy koncentrace hořlavého prachu, která zde trvale překračuje horní mez výbušnosti, se po otevření vstupního otvoru a vstupu vzduchu náhle sníží a vznikne tak směs schopná výbuchu (Mokoš, 2007).

Zabezpečení proti výbuchu prachu odlehčením výbuchu je naproti tomu technický způsob zabezpečení, který umožňuje minimalizovat následky v případě, že k výbuchu dojde. Principem tohoto zabezpečení je, se na plášti zařízení umístí dostatečný počet odlehčovacích prvků (membrány, ventily, apod.), které umožní odlehčit tlak při výbuchu tak, aby nebyla překročena tlaková odolnost konstrukce zařízení. Ve směru odlehčení je třeba vymezit bezpečnostní zónu, ve které se nesmí vyskytovat osoby, překážky ani prostředí s nebezpečím výbuchu. Protože se do průběhu výbuchu nijak nezasahuje, je nutné všechny trasy, napojené na odlehčované zařízení, zabezpečit proti přenosu výbuchu. Odlehčení výbuchu se obvykle používá u zařízení umístěných úplně nebo z části vně budovy, výjimečně uvnitř budovy. Potlačení výbuchu je zabezpečení, které se skládá z řídicí jednotky, akčních prvků a detektorů výbuchu. V případě výbuchu detektory zachytí nárůst tlaku nebo plamen a řídicí jednotka vyšle signál k otevření jednoho nebo několika akčních prvků, které vnesou do chráněného zařízení hasivo. Přestože se do průběhu výbuchu aktivně zasahuje, je nutné i v tomto případě u všech tras, napojených na zařízení, zvážit potřebu zabezpečení proti přenosu výbuchu. Potlačení výbuchu

se obvykle používá u zařízení umístěných uvnitř budovy (Petrus, 2006). Jiným způsobem prevence je pak inertizace směsi plynu a prachu s potlačením rizika výbuchu. Toho lze dosáhnout zředěním směsi přídatkem inertní složky – např. dusíku, oxidu uhličitého či vodní páry (Kořínek, 2007).

Ať již je zvolen jakýkoli způsob ochrany před výbuchem, vždy by se mělo v prevenci pamatovat na uzemnění provozních zařízení a vzduchotechnického systému (výbuch může iniciovat výboj statické elektřiny); minimalizaci vodorovných ploch a prostor, kde by se mohl usazovat prach, zavedení mokřých metod odlučování prachu z pracovního ovzduší a monitorování koncentrace kyslíku a prachu v ovzduší s blokováním chodu zařízení v případě přiblížení se k limitním hodnotám (Mokoš, 2007).

3.7 Aerosoly vznikající při průmyslových haváriích

Aerosol, který může vznikat v přímé vazbě na případnou průmyslovou havárii, tvoří bezesporu specifickou skupinu polutantů, se kterými se běžně nesetkáváme. Jeho složení nelze nikdy předem zcela jasně definovat. V případě průmyslové havárie velkých rozměrů se vždy totiž uplatňují vlivy značného množství rozličných fyzikálních a chemických parametrů, které charakteristiky výsledné směsi velmi výrazně ovlivňují. Množství a kvalita vzniklého aerosolu proto nezávisí jen na charakteru a množství látky (látek), ze kterých vzniká, ale také na procesních parametrech porušené technologie (a to před vznikem havárie i během ní), na chemických vlastnostech a povaze zúčastněných/reagujících látek, na teplotě a tlaku v místě havárie, na materiálních vlastnostech zasažených technologických celků, staveb a okolních materiálů a v neposlední řadě nelze zanedbat ani případný vliv počasí. Tato charakteristika je jen velmi hrubým výčtem možných vlivů, jejichž vzájemné interakce vytvářejí široké spektrum aerosolů, resp. směsí, rozličné kvality, kvantity a toxicity i velikosti částic. Dlužno poznamenat, že právě toxické vlastnosti výsledné směsi se vždy liší od toxických vlastností jednotlivých primárních složek.

Z pohledu kvalitativního je ve většině případů havarijních událostí možné určit složení vzniklého oblaku aerosolu pouze analýzou měření. Ačkoli existuje síť měřících stanic Českého hydrometeorologického ústavu, které jsou schopny detekovat základní plynné polutanty, měření prašnosti není dostatečně podrobné. V pravidelných hlášeních se můžeme proto dozvědět pouze obecnou informaci o množství polétavého prachu o velikostních frakcích PM_{10} nebo $PM_{2.5}$. Exaktní zjištění složení aerosolů je proto velmi komplikované. Obecný model kontinuální detekce zaveden není, neboť aerosol průmyslového charakteru obecně nepředstavuje v běžném životě významné riziko pro okolní obyvatelstvo (vyjma blízkých provozů, které kontinuálně emitují do atmosféry větší množství prachu – např. průmysl dobývání a zpracování hornin a nerostů, energetické závody, hutě apod.).

Možností zjišťování charakteru a kvality detekovaných aerosolů proto zůstává stále jen jednorázový sběr a následná laboratorní expertíza. Kvalita prachových částic se následně zjišťuje pomocí detekčních metod analytické chemie. Obecně se dá říci, že charakter a složení vzniklého prachu závisí na složení mateřských látek a materiálů. Podle charakteru průmyslového provozu proto můžeme přibližně odhadnout, o jaký druh aerosolu se v případě havárie může jednat, aniž bychom museli provádět složité měření.

Závažná havárie charakteru požáru na technologiích petrochemického, chemického a gumárenského průmyslu, nebo průmyslu, kde se nakládá s hořlavými organickými látkami, bude vždy doprovázena vznikem značného množství sazí. V průmyslu zabývajícím se výrobou zemědělských hnojiv, pak můžeme naproti tomu očekávat jako hlavní složku vzniklého oblaku zejména ledky, uhličitany a další anorganické příměsi. Podobnou úvahu lze na základě dostatečných informací o technologii provést pro většinu provozů.

Značná část havárií je provázena také destrukcí technologických celků. Z tohoto důvodu lze očekávat ve vzniklém oblaku také složky pocházející z těchto zdrojů. Jedná se zejména o konstrukční materiál zařízení a staveb či fragmenty ostatních materiálů, které se nacházejí v epicentru havárie.

3.8 Městský aerosol

Nad urbanizovanými centry či průmyslovými aglomeracemi se setkáváme se specifickými aerosoly, které nazýváme městským aerosolem. V tomto aerosolu převažují částice o průměru menším jak $2,5\ \mu\text{m}$, přičemž jeho typická velikostní distribuce je velmi podobná idealizované křivce uvedené na obrázku 39. Je také obvykle trimodální se dvěma mody v oblasti jemného aerosolu ($0,1$ až $1\ \mu\text{m}$) a jedním modem pro hrubý aerosol (větší jak $1\ \mu\text{m}$). Kondenzační mod (kolem $0,2\ \mu\text{m}$) je především výsledkem kondenzace sekundárního aerosolu z plynné fáze zatímco akumulární mod (kolem $0,7\ \mu\text{m}$) tvoří kapičky formované heterogenní reakcí zahrnující vodnou fázi okludovanou na částicích aerosolu. Zdroji jsou především lokální a průmyslová topeniště. Kromě částic pevného aerosolu jsou v tomto aerosolu obsaženy také tzv. sekundární produkty, jako například sírany, nitráty a amonné ionty, které vznikají chemickými reakcemi z plynných produktů hoření (SO_2 , NO_x , NH_3) (Manahan, 2005). Více než dvě třetiny celkové hmotnosti síranů a amonných iontů jsou obsaženy v částicích jemného aerosolu. Nitráty, ale také sodík a chloridové ionty, jsou rovnoměrně distribuovány mezi hrubý a jemný aerosol. Významný podíl tvoří také částice organického původu a částice pocházející z dopravy (především spalovací motory, ale také otěr pneumatik apod.). Hojné jsou také ionty kovů, jejichž velikostní distribuce jsou uvedeny v tabulce 26 (viz kapitola 3.3.1).

V oblastech blízko moře složení aerosolu odráží složení mořské vody (zejména NaCl) a dále organické sloučeniny, které se vyskytují v povrchové vrstvičce vody. Významnou roli v kondenzačních procesech v městském aerosolu hraje vodní vlhkost. Díky ní se může za určitých povětrnostních situací kvalita ovzduší výrazně zhoršit, protože vzduch proudící od moře s sebou přináší vlhkost, která na částicích městského aerosolu snadno kondenzuje. Za inverzních situací tímto způsobem vzniká smog, který představuje značné nebezpečí pro obyvatele.

V období od 4. prosince 1952 do března 1953 zasáhl velmi silný smog Londýn. Tato dnes již nechvalně proslulá situace způsobila smrt tisíců obyvatel a byla hybnou silou pro změny k modernímu přístupu k životnímu prostředí. Nástup smogu z počátku připomínal obvyklé mlhavé počasí, na které byly Londýňané zvyklí. Výrazně se ochladilo a vznikla tak radiační mlha. Snížení teplot vedlo vyšší spotřebě uhlí k vytápění než obvykle a ve stejné době byla rovněž ukončena výměna původních elektrických tramvají na dieselové autobusy. Jelikož byl silně znečištěný vzduch uzavřen chladnou vzduchovou vrstvou ve výšce (výšková inverze), nedocházelo k jeho naředování a rozptýl polutantů tak byl silně potlačen. Koncentrace nečistot se proto velmi rychle dramaticky zvýšila, takže smog byl nakonec tak hustý, že špatná viditelnost (114 hodin nebylo vidět dále jak na 500 metrů, a 48 hodin dokonce jen na 10 až 50 metrů) znemožňovala nejen dopravu, ale také byly rušeny filmové projekce, protože diváci neviděli na plátna kin. Vzhledem k tomu, že Londýn byl známý výskytem mlhy, zpočátku nezavládla panika. Po určité době ale začala zdravotní služba srovnávat počet úmrtí s předchozími lety a bylo zjištěno, že v důsledku smogu zemřelo asi 4000 lidí – většinou velmi mladí nebo velmi staří lidé, kteří měli nějaké dýchací problémy. Do konce období smogu zemřelo asi dalších 8000 obyvatel Londýna (Wikipedia, online). Příčinou byla intoxikace nečistotami obsaženými ve smogu (odhaduje se, že během této epizody bylo v ovzduší rozptýleno 1000 tun sazí, 2000 tun CO_2 , 140 tun chlorovodíku, 14 tun fluóru a 370 tun SO_2 ze kterého vzniklo asi 800 tun kyseliny sírové). Lidé nejčastěji umírali na zápal plic, bronchitidu, tuberkulózu, selhání srdce a mnoho lidí zemřelo doma v posteli následkem zadušení smogem. Kromě těchto akutních následků byly v následujících letech pozorovány zvýšené výskyty rakoviny a imunitních selhání spojených s nárůstem infekčních chorob u dětí.

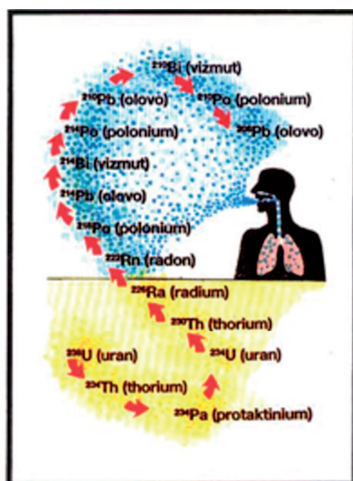
3.9 Radioaktivní aerosoly

3.9.1 Podstata a základní vlastnosti

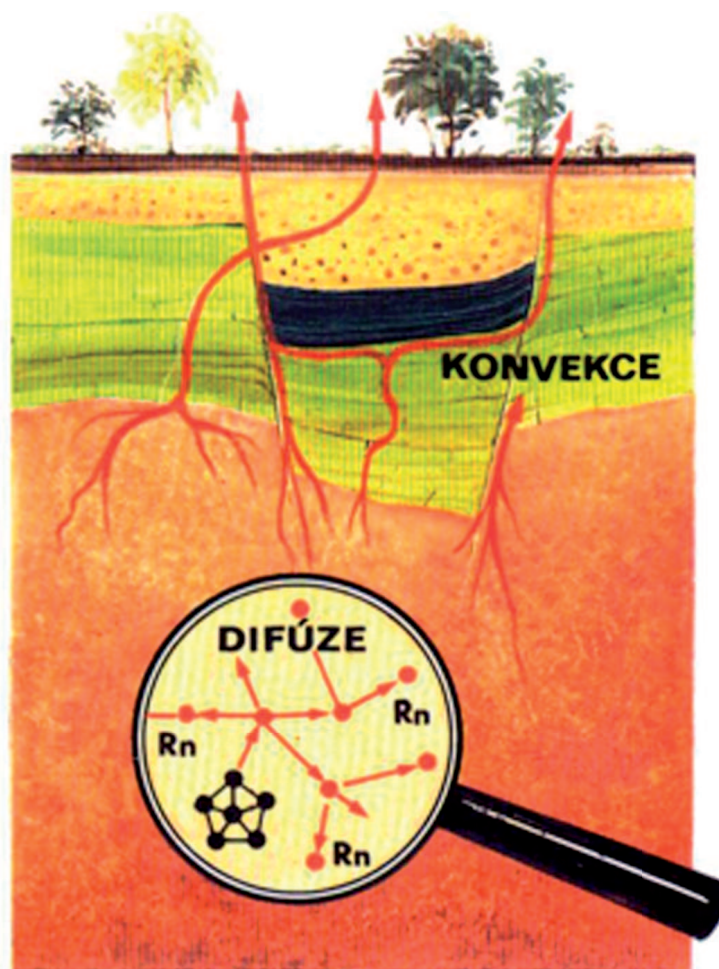
V ovzduší se mohou vyskytovat stopová množství tuhých nebo kapalných radioaktivních látek v disperzní formě. Takový systém se nazývá radioaktivní aerosol (radioaerosol). Ten je tvořen buď vlastní radioaktivní látkou (např. prach oxidů uranu), nebo neaktivní látkou, na jejímž povrchu je radioaktivní látka

Tak jako ostatní aerosoly charakterizují se i radioaktivní aerosoly velikostí částic a jejich velikostní distribucí, koncentrací ve vzduchu, nábojem, chemickou formou, tvarem a strukturou částic a stupněm jejich agregace. Podle rozměrového rozdělení rozeznáváme aerosoly monodisperzní, jejichž částice jsou stejně velké a které lze zpravidla získat jen uměle a radioaktivní aerosoly polydisperzní s částicemi různé velikosti. Jejich charakteristikou je distribuční křivka částic udávající jejich četnost v určitých intervalech velikostí; většinou je to křivka s jedním maximem, podobná Gaussově křivce, avšak zpravidla asymetrická. Na rozdíl od neaktivních aerosolů, jejichž koncentrace se vyjadřuje v hmotnostních jednotkách na určitý objem (např. v $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$) nebo počtem částic v určitém objemu (např. v cm^{-3}), udává se koncentrace radioaerosolu nejčastěji objemovou aktivitou (např. v $\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-3}$).

V přírodě se vyskytuje radioaktivní aerosol jako stálá složka atmosféry vytvořená převážně z produktů přeměny radioaktivních emanací o aktivitě průměrně v jednotkách $\mu\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-3}$ pro ^{222}Rn a do $10\text{ nBq}\cdot\text{cm}^{-3}$ pro ^{220}Rn . Zdrojem těchto aerosolů je tedy především radium v rovnováze s uranem, který je v poměrně velkém množství obsažen v litosféře (průměrná koncentrace asi $3\cdot 10^{-4}\%$). Radon vzniklý přeměnou radia difunduje půdními póry do atmosféry (viz obrázek 53) a atomy aktivního depozitu vytvořené jeho přeměnou se krátce po svém vzniku shlukují nebo se adsorbují na neaktivním aerosolu (viz obrázek 52).



226



Obrázek 53: Difúze radonu zemskou kůrou do atmosféry.

Koncentrace přirozeného radioaerosolu za normálních podmínek odpovídá přibližně rovnovážnému stavu mezi radioaeroselem a mateřským nuklidem (radonem). Jinak se částice radioaktivního aerosolu o průměru asi $0,5 \mu\text{m}$ po dobu života krátkodobého aktivního depozitu nemění. Dospěje-li přeměna až k ^{210}Po ($T_{1/2} = 21$ let), chemická podstata částic se dále výrazně nemění a je tak dosti času k tomu, aby částice agregovaly. Tím ale vzrůstá také pravděpodobnost jejich vylučování z atmosféry suchou nebo mokrou depozicí. Proto je koncentrace dlouhodobého aktivního depozitu v atmosférickém aerosolu mnohem menší, než by odpovídalo radioaktivní rovnováze.

3.9.3 Umělé radioaktivní aerosoly

Mnohem větší význam, především z hlediska tvorby a ochrany životního prostředí, mají umělé radioaktivní aerosoly vznikající lidskou činností. Na pracovištích s radioaktivními látkami a v jaderných zařízeních vznikají radioaktivní aerosoly v podstatě těmito způsoby:

- Z tuhé fáze – mechanickým rozmělněním a rozprašováním, spalováním nebo kalcinací radioaktivních látek.
- Z kapalně fáze – rozstřikováním radioaktivních roztoků při přelévání, míšení, probublávání apod.
- Z plynné fáze – kondenzací a reakcemi radioaktivních plynů; adsorpcí radioaktivních plynů nebo záchytem tuhých dceřiných produktů radioaktivních plynů na neaktivních aerosolech; aktivací částic neaktivních aerosolů v blízkosti silných zdrojů jaderného záření.

V radiochemických laboratořích vedou ke vzniku radioaktivních aerosolů různé manipulace s práškovými aktivními látkami (např. přesypání, plnění radioforů), vystřikování aktivních roztoků (při odpařování atd.), spalování organického radioaktivního materiálu apod. Jejich zdrojem mohou být dále neuzavřené nebo nedokonale utěsněné radiofory obsahující radon, radium nebo jiné emanující látky, a exploze takových radioforů při jejich nesprávné přípravě nebo při neopatrném otevírání a při havárii.

V dolech, kde se těží radioaktivní rudy, a v jaderných technických provozech vzniká radioaktivní aerosol oxidů uranu při těžbě (částice o průměru až 100 μm), při transportu a technologickém zpracování rud, při obrábění oxidů uranu a výrobě palivových článků /částice o průměru asi 0,02 μm). Uranové aerosoly poměrně rychle sedimentují (2krát až 10krát rychleji než organický prach). Při provozu jaderných reaktorů, zejména chlazených vzduchem, mohou vznikat radioaktivní aerosoly jednak rozprášením jaderného paliva a produktů štěpení při poškození povlaků palivových článků, jednak aktivací prachových částic ve vzduchu účinkem intenzivního neutronového záření. Při běžném provozu jaderná elektrárna emituje do ovzduší stopová množství radionuklidů ^{131}I , ^{85}Kr a ^{133}Xe vznikajících při štěpení paliva. Při zpracování vyhořelého paliva a radioaktivních odpadů a také při výrobě radionuklidů vznikají radioaktivní aerosoly například při odstraňování obalu článků, při rozpouštění palivových článků (průměr částic asi 0,2 μm), při kalcinaci vysoce aktivních odpadů (oxidy produktů koroze a štěpení jaderných paliv) atd. V zařízeních na přípravu plutonia mohou vzniknout zvláště nebezpečné aerosoly oxidu plutoničitého (PuO_2).

Exploze jaderných zbraní jsou největším zdrojem radioaktivních aerosolů. Tyto jsou tvořeny především produkty štěpné reakce (částečně i zaktivované atomy původně neaktivních součástí bomby). Kombinovaným účinkem větru, zemské tíže a atmosférických srážek dochází ke spadu částic (nad mořskou hladinou i vodního) radioaerosolu z troposféry nad zemský povrch. Depozit, tzv. **radioaktivní spad**, se usadí z poloviny do tří týdnů, zbytek asi do tří měsíců (Dušek a Píšala, 2007). Jelikož se jedná o poměrně rychlý proces, jsou v tomto tzv. troposférickém spadu významněji zastoupeny krátkodobější radionuklidy. Ve spadu můžeme nalézt celou řadu radionuklidů, jako např. ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{91}Y , ^{95}Nb , $^{115\text{m}}\text{Cd}$, $^{129\text{m}}\text{Te}$, ^{131}I , ^{132}Te , ^{144}Ce , ^{141}Ce , ^{147}Nd , ^{147}Pm , ^{151}Sm , ^{153}Sm , ^{155}Eu , ^{156}Eu , ^{140}Ba , ^{140}La a další (Manahan, 2005). U vodíkové pumy (ráže nad 100 kt TNT) vystoupí většina radioaktivních produktů až do stratosféry, z níž se pozvolným spadem rozšíří na celý zemský povrch v podobě globálního spadu. Doba ukládání depozitu je obecně tak dlouhá, že zatím z největší části vymřou radionuklidy s kratším poločasem. Prakticky zbydou jen dva dlouhodobé produkty štěpení a to ^{90}Sr a ^{137}Cs a dále ^{14}C ($T_{1/2} = 5730$ let) a ^3H ($T_{1/2} = 12,26$ let), které se vytvořily působením neutronů na vzdušný dusík ^{14}N reakcemi (n,p) a (n,t). Podle složení radioaktivního spadu lze usuzovat na charakter výbuchu, tj. typ a velikost jaderné nálože a výšku exploze nad zemí.

Aktivita spadu klesá úměrně s t^n ; exponent n má průměrnou hodnotu 1,2 a zmenšuje se se stářím spadu, protože se stále více uplatňuje dlouhodobá aktivita. Extrapolací reciproké hodnoty aktivity krátkodobých radionuklidů spadu na nulu lze podle uvedeného časového zákona určit dobu, kdy došlo k výbuchu.

Kromě výše uvedených zdrojů, které jsou ryze jaderného charakteru, jsou však nejvýraznějším kontinuálním zdrojem znečištění atmosféry radioaerosoly elektrárny spalující hnědé uhlí. Toto nepřítli kvalitní uhlí obsahuje celou škálu produktů uranové rozpadové řady, zejména pak ^{210}Pb , ^{210}Po , ^{226}Ra , ^{232}Th a ^{222}Rn , které se vázané na částice aerosolu dostávají do atmosféry.

3.10 Toxikologické vlastnosti aerosolů

3.10.1 Nebezpečné vlastnosti malých částic

Nebezpečí, které může inhalace aerosolových částic pro člověka je spojena s jejich depozicí v respiračním systému. Důležitou roli také hraje jejich chemické složení a místo, kde k depozici dochází. Usazování částic v plicích spočívá na stejném základním mechanismu, jaký způsobuje shromažďování částic ve filtru, ale relativní důležitost každého mechanismu je zcela odlišná. Zatímco filtrace nastává v pevném systému za stabilní velikosti proudu, depozice v plicích nastává v systému s proměnlivou geometrií, za neustálých cyklických změn velikosti proudu s časem

a také za cyklických změn směru proudu. Tato dodatečná složitost znamená, že předpověď depozice na základě teorie je mnohem obtížnější a musíme se v mnohem větší míře spolehnout na experimentální údaje a na empiricky odvozené rovnice. V dalších kapitolách proto budou zmíněny základní mechanismy usazování částic v plicích a vstup částic ústy nebo nosem při vdechování. Důležité jsou v tomto ohledu charakteristiky lidského respiračního systému, které je potřeba dobře pochopit a popsat, abychom byli schopni správně vyhodnotit zdravotní rizika související s expozicí aerosolům. Samozřejmě, jako v případě expozice chemickým látkám, i v případě aerosolů, disponuje dýchací systém člověka určitými mechanismy chránícími člověka před nežádoucími dopady expozice aerosolům. Je to mechanismus omezující přístup částic do citlivých oblastí plic a mechanismus samočištění (clearance) (Hinds, 1999).

Atmosférický aerosol

Znečištění ovzduší aerosolem vzhledem k výšce koncentrací, překračování limitních hodnot i prostorovému rozšíření patří k jednomu z největších problémů současné kvality ovzduší v industrializovaném světě. Zatímco důsledky působení plyných polutantů na lidské zdraví jsou již relativně dobře prozkoumány a zpracovány, o původu, chování a působení aerosolových částic je známo méně.

Smogová událost z Londýna v roce 1952 poukázala na nebezpečnost aerosolu pro lidské zdraví – zemřelo tehdy asi 4000 osob, a to i přes to, že hlavní příčiny zmíněných úmrtí byly připisovány především působení plyných polutantů (viz kapitola 3.8). Až poměrně nedávno se řada studií zaměřila na nepříznivé účinky aerosolových částic na lidské zdraví a vegetaci (např. Dockery et al., 1993; Pope et al., 1995). Pokusy prováděnými na krysách bylo například zjištěno, že pro aerosol tvořený částicemi menšími jak 10 μm , lze sledovat zjevnou korelaci mezi koncentrací a mortalitou. Zvýšení koncentrace v ovzduší o 10 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ vedl u krys k nárůstu denní mortality o 0,5 % (Manahan, 2005).

Radioaerosol

Opomeneme-li nebezpečnost částic jako takových, je riziko expozice radioaerosolům zřejmě už z jejich radioaktivní podstaty. Je ovšem třeba zmínit, že toto riziko je jevněraznější především u aerosolů, které jsou alfa zářiči. Jestliže se depnoují v plicích, ozařují následně bunky plicního epitelu vysokými dávkami. U gama a beta aktivních aerosolů je riziko vzniku negativních účinků mnohem menší a v případě nižších aktivit se riziko nedá prokázat takřka vůbec. Je to dáno tím, že poškození živé tkáně ionizujícím zářením se v případě gama a beta záření „rozloží“ na mnohem větší dráhu než u alfa záření a jednotlivé buňky jsou tedy mnohem méně radiačně zatěžovány. Prvkem, který je podstatou problémů souvisejících

s výskytem přirozených radioaerosolů je radon. Ten je uvolňován ze zemské kůry jakožto produkt rozpadu uranu a thoria, resp. radia. Z chemického hlediska radon není toxický, protože je to plyn inertní a v lidském těle se nedeponuje (člověk jej prostě vydechne). Poločas rozpadu radonu vznikajícího z ^{232}Th je extrémně krátký (55 sekund), takže z podloží se prakticky neuvolňuje do atmosféry a nepodílí se tedy na vzniku radioaerosolů. Poločas rozpadu radonu vznikajícího z ^{238}U je sice větší, ale stále relativně krátký (3,8 dne), takže se dostává do atmosféry jen zvolna a průběžně se přeměňuje na radionuklidy těžkých kovů (konkrétně ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi a ^{214}Po), které jsou alfa a beta zářiče. Ty se ještě v atmosféře adsorbují velmi dobře (protože jsou nabitě) na povrch částic přirozeného atmosférického aerosolu. Po vdechnutí se tyto aerosoly mohou usazovat v plicích a způsobovat vnitřní ozáření. V souvislosti s tím byla zjištěna zajímavá skutečnost, a to, že kouření snižuje riziko plynoucí z ozáření plic produkty přeměny radonu. Na částice cigaretového kouře se totiž ve vzduchu adsorbují rozpadové produkty radonu a takto vzniký radioaktivní aerosol se pak usazuje především na zdech místností, takže do plic člověka se dostávají v mnohem menší míře. Ovšem je potřeba také dodat, že u kuřáků působí vliv kouření a radioaerosolů synergicky, než pouhý součet těchto dvou jednotlivých rizik. V této souvislosti bylo také zjištěno, že u lidí žijících v oblastech se zvýšenou koncentrací radonu v ovzduší, a u kterých se vyvinula rakovina plic, byla tato způsobená kouřením v 80 % případů a radonem v 10 až 15 % případů (Křivohlávek, 2008). Průměrná aktivita samotného radonu v domech dosahuje v našich oblastech 40 Bq.m^{-3} ³² a ve volném prostoru 10 Bq.m^{-3} . Nebezpečnost radonu s ohledem na možné následky v podobě rakoviny plic zobrazuje tabulka 35.

Tabulka 35: Pravděpodobnost vzniku rakoviny plic způsobené produkty přeměny radonu (Křivohlávek, 2008)

Měrná aktivita produktů přeměny (Bq m^{-3})	Obržená ekvivalentní dávka (mSv.rok^{-1})	Celoživotní dávka (mSv)	Pravděpodobnost vzniku rakoviny plic působením radioaerosolů (rok^{-1})
15	0,915	55	$1,65 \cdot 10^{-5}$
50	3,05	183	$5,5 \cdot 10^{-5}$
75	4,58	275	$8,2 \cdot 10^{-5}$
100	6,10	366	$1,1 \cdot 10^{-4}$
200	12,20	732	$2,2 \cdot 10^{-4}$
400	24,40	1454	$4,39 \cdot 10^{-4}$

Cigaretový kouř

Asi nejvýraznější vliv aerosolu na lidské zdraví souvisí s kouřením. V průběhu 20. let minulého století mnoho lidí začalo kouřit cigarety. O dvacet let později začala stoupat frekvence výskytu rakoviny plic. Ve 40. letech 20. stol. začaly kouřit více i ženy a dvacet let poté vzrostl výskyt rakoviny plic i u žen. Nádory plic většinou

³² Při radonovém programu (1991 – 1996), kdy byla proměřena aktivita radonu v 95 000 domech po celé České republice, bylo ve 14344 případech zjištěno, že jeho aktivita přesahuje 200 Bq.m^{-3} , z toho v 580 případech dokonce 1000 Bq.m^{-3} .

začínají ve stěně průdušek a bylo zjištěno, že kouření může vést až ke dvaceti typům maligních nádorů. Proto je s podivem, že boj proti kouření se výrazněji prosazuje až v posledních letech. Přitom už v roce 1956 měla britská vláda k dispozici fundované informace o vztahu mezi kouřením a rakovinou plic, ale z obav o ztrátu daňových příjmů je před veřejností tajila (Volný noviny, online). Samozřejmě ale i v případě kouření není zcela známo, jak výrazně k těmto následkům přispívají částice aerosolu obsažené v cigaretovém kouři. V něm bylo dodnes prokázáno na šedesát možných karcinogenů, z nichž nejnebezpečnější jsou N-nitrosaminy, benzen, polyaromatické uhlovodíky a aldehydy (Slezák a kol., online).

Nanočástice

V posledních letech se živě diskutuje o nanotechnologiích a rizicích s nimi spojenými. Podstatou nanotechnologií je výroba a využívání **nanočástic** (angl. nanoparticles nebo ultrafine particles), tedy uměle vyrobených částic s velikostí obvykle v řádech nanometrů, výjimečně pak až do 100 nm. Tyto částice mohou být v podobě čistého práškovitého materiálu, v podobě suspenze, v podobě aerosolu nebo ve formě přípravku obsahujícího tyto částice. Ukazuje se, že způsoby jejich možného využití, mají značný praktický potenciál.

Ačkoliv je využití nanotechnologií ještě poměrně malé, je jisté, že uplatnění nanomateriálů bude stále širší. Pro jejich vynikající vlastnosti a využití patří tato oblast mezi nejdynamičtější se rozvíjící obory. Mezi lety 1997 až 2003 vzrostly roční celosvětové investice do této oblasti z 432 milionů USD na 3 miliardy, přičemž v roce 2015 se očekávají investice vyšší jak 1 bilion USD. Prudký rozvoj nanotechnologií vede k vývoji nových materiálů, zařízení a procesů, jejichž vlastnosti a uplatnění jsou často daleko za naším současným chápáním. S tím souvisí také problém, jak zhodnotit jejich vliv na kvalitu pracovního prostředí a také na lidské zdraví (European Agency for Safety and Health at Work, 2005).

Šetřením Státního zdravotního ústavu provedeného v roce 2008 (Mráz, 2008) se zjistilo, že existuje jen v České republice 76 organizací, kde se s nanočásticemi pracuje. Jedná se o výzkumná pracoviště (celkem 35 organizací, kde u převážné většiny z nich dochází k manipulaci s množstvím nanočástic do 1 kg za rok) i podnikovou/výrobní sféru (celkem 31, kde u převážné většiny z nich dochází k manipulaci s množstvím nanočástic do 1000 kg za rok). S nanočásticemi se pracuje nejčastěji:

- v uzavřeném systému, kde možnost expozice osob je vyloučena nebo velmi málo pravděpodobná, anebo
- v převážně uzavřeném systému, kde možnost expozice osob není vyloučena a občas nebo pravidelně k ní dochází a v neposlední řadě také

- v otevřeném systému, kde k expozici osob běžně dochází (Mráz, 2008).

Mnoho nanomateriálů a nanozařízení jsou tvořeny z nanočástic, které byly primárně částicemi aerosolu nebo koloidní suspenze. Expozice těmito částicím během jejich výroby nebo používáním může probíhat formou inhalace, kontaktu s kůží nebo orálně. Zdravotní rizika spojená s výrobou a používáním nanomateriálů však nejsou prozatím dostatečně prozkoumána. Je totiž jen velmi málo informací o velikosti expozice osob přicházejících do styku s nanočásticemi i o následcích poškození zdraví exponovaných osob, které by bylo možné jednoznačně přisoudit právě jejich „nanovlastnostem“. Absence těchto dat je dána především tím, že k expozicím dochází zatím jen po historicky krátkou dobu, nicméně doba expozice a zvláště počet exponovaných začínají prudce narůstat. Část informací, které lze využít pro honcení rizik spojených s expozicí nanočásticím, lze získat pomocí postupů k zjištění toxicity látek. Některé z nich lze nalézt v normě ISO/TR 27628 z roku 2006.

Ačkoli se nanočástice staly jistým „fenomémem doby“, je potřeba připomenout, že se s nimi můžeme setkávat i u tradičních pracovních procedur, kde se manipuluje s jemným materiálem (mletí, přesívání), kde se materiály brousí nebo řezou, nebo kde vznikají různé kouře/dýmy (spalování, provoz spalovacích motorů) a páry (tavení a slévání kovů) a taktéž u nejrůznějších lékařských aplikací (laserové techniky, RTG a jiná vysokoenergetická zařízení) (Skřehot a Jansová, 2007).

3.10.2 Respirační systém

Z hlediska respirační depozice aerosolových částic je možné rozdělit dýchací systém na tři oblasti, kdy každá oblast pokrývá několik anatomických jednotek. Tyto oblasti se významně liší strukturou, způsobem proudění vzduchu, funkcí, dobou, po kterou vzduch v oblasti zůstává a citlivostí na usazené částice. První oblastí je oblast dýchacích cest hlavy (head airways region), která obsahuje nos, ústa, hltan a hrtan. Tato oblast se též nazývá extrathoratická (oblast mimo hrudní koš). Vdechovaný vzduch je v této oblasti ohříván a zvlhčován. Druhou oblastí jsou plicní dýchací cesty neboli tracheobronchiální oblast (oblast průdušek a průdušinek), která obsahuje dýchací cesty z průdušnice k průdušinkám. Tato oblast se podobá obrácenému stromu s jedním kmenem, průdušnicí, která se dělí do menších a menších větví. Nakonec, za průdušinkami, je plicní oblast neboli alveolární oblast, kde probíhá výměna plynů.

Dýchací systém normálního dospělého jedince zpracuje 10 až 25 m³ (12 až 30 kg) vzduchu za den. Plocha povrchu plic pro výměnu plynů je okolo 75 m², což je polovina plochy tenisového kurtu. Alveolární oblast je protkána kapilárami o celkové délce 2000 km. V klidu je přibližně při každém nádechu vdechnuto 0,5 litru vzduchu, při

těžké práci ale se může tento objem zvýšit až třikrát. Odpočívající dospělý jedinec má dechovou frekvenci okolo 12 vdechů za minutu, tento údaj se při těžké práci je to opět přibližně třikrát tolik. Při normálním dýchání není asi 2,4 litru vůbec vydechováno a tento vzduch trvale zůstává v plicích (hovoříme o tzv. vzduchové rezervě). Při násilném vydechnutí lze ale přibližně polovinu z tohoto množství vydechnout. Vdechnutý vzduch proudí postupně přes 23 rozvětvení vzduchových cest na své cestě z průdušnice do plicních sklípků. Prvních 16 rozvětvení se nachází v tracheobronchiální oblasti a zbytek v oblasti plynové výměny (Hinds, 1999).

Pro výpočet dávky, což je klíčová informace v případě, že chceme hodnotit nebezpečí vyvolané expozicí aerosolům, je potřeba použít parametry respiračního systému člověka (viz tabulka 36).

Tabulka 36: Parametry dýchacího systému (používané v modelu ICRP) (Hinds, 1999).

	Funkční rezervní kapacita, FRC (dm ³)	Dechové množství (m ³ .hod ⁻¹)	Dechová frekvence (dechů.min ⁻¹)	Dechový objem (dm ³)
<i>Žena</i>				
Vsedě	2,68	0.39	14	0,46
Lehké cvičení	2,68	1,25	21	0,99
Těžké cvičení	2,68	2,7	33	1,36
<i>Muž</i>				
Vsedě	3,3	0,54	12	0,75
Lehké cvičení	3,3	1,5	20	1,25
Těžké cvičení	3,3	3	26	1,92

Následující zjednodušené rovnice, které lze využít k orientačním výpočtům dávky, byly upraveny pro model ICRP pro monodisperzní kulové částice standardní hustoty za standardních podmínek. Údaje pro ženy a muže při třech úrovních pohybových aktivit byly zprůměrnovány. Literatura uvádí, že níže uvedené rovnice 3-25 až 3-29 jsou validní pro kulové částice standardní hustoty o aerodynamickém průměru D_p od 0,01 do 100 μm . Frakci depozice pro horní cesty dýchací lze vypočítat podle rovnice 3-25.

$$DF_{HA} = IF \cdot \left(\frac{1}{1 + \exp(6.84 + 1.183 \ln D_p)} + \frac{1}{1 + \exp(0.924 - 1.885 \ln D_p)} \right)$$

(rovnice 3-25)

kde IF je vdechovatelná frakce. Vdechovatelná (inhalovatelná) frakce, tak jak je v modelu ICRP použita, je

$$IF = 1 - 0.5 \left(1 - \frac{1}{1 + 0.00076 D_p^{2.8}} \right) \quad (\text{rovnice 3-26})$$

Frakce depozice pro tracheobronchiální oblast DF_{TB} je

$$DF_{TB} = \left(\frac{0.00352}{D_p} \right) \cdot \left[\exp(-0.234(\ln D_p + 3.40)^2) + 63.9 \exp(-0.819(\ln D_p - 1.61)^2) \right] \quad (\text{rovnice 3-27})$$

Frakce depozice pro alveolár D_{Al} je

$$DF_{AL} = \left(\frac{0.0155}{D_p} \right) \cdot \left[\exp(-0.416(\ln D_p + 2.84)^2) + 19.11 \exp(-0.482(\ln D_p - 1.362)^2) \right] \quad (\text{rovnice 3-28})$$

Ačkoli IF se explicitně v rovnicích 3-28 a 3-29 neobjevuje, byly tyto rovnice upraveny pro údaje, které obsahují účinek inhalace. Celková depozice DF (tedy dávka) je součtem lokálních depozic, neboli

$$DF = IF \left(0.0587 + \frac{0.911}{1 + \exp(4.77 + 1.485 \ln D_p)} + \frac{0.943}{1 + \exp(0.508 - 2.58 \ln D_p)} \right) \quad (\text{rovnice 3-29})$$

Hmotnost dané částice usazené v dýchacím systému za minutu M_{dep} je

$$M_{dep} = \frac{\pi}{6} N \rho_p D_p^3 V_m (DF) \quad (\text{rovnice 3-30})$$

kde N je počet koncentrací částic o aerodynamickém průměru D_p a hustotě ρ_p , V_m je minutový objem nebo objem vzduchu vdechnutý za 1 minutu a DF je celková depozice frakce částic o aerodynamickém průměru D_p z rovnice 3-25, 3-27 nebo 3-26.

3.10.3 Vstup aerosolu do dýchacího ústrojí

Podíl částic, které jsou vdechovány do těla exponované osoby, závisí na vlastnostech částic, na rychlosti a směru pohybu vzduchu v blízkosti těla, na dechové frekvenci a na tom, zda se dýchá nosem nebo ústy. Vdechované částice se mohou ukládat kdekoli v dýchacím ústrojí nebo mohou být vydechovány. Místo, kde se částice ukládají, nebo pravděpodobnost, že budou vydechnuty, závisí na vlastnostech těchto částic, dýchacího ústrojí, na způsobu dýchání a dalších faktorech (ČSN EN 7708).

Kapalné částice nebo rozpustné složky tuhých částic mohou být vstřebány tkáněmi, na něž se ukládají. Částice mohou způsobit poškození v blízkosti místa ukládání, jsou-li korozivní, radioaktivní nebo schopné vyvolat jinou formu poškození. Nerozpustné částice mohou být transportovány do jiné části dýchacího ústrojí nebo těla, kde mohou být absorbovány nebo mohou vyvolat biologické účinky. Mezi jednotlivými osobami existují velké rozdíly co do pravděpodobnosti vdechnutí částic, jejich ukládání, reakce na uložení a samočištění plic. Nicméně lze pro hodnocení zdravotních rizik definovat konvence pro odběr vzorků aerosolových částic podle velikosti částic (tj. specifikace přístrojů k odběru vzorků pro stanovení příslušných velikostních frakcí aerosolu v ovzduší). Tyto konvence vyjadřují vztahy mezi aerodynamickým průměrem částic a frakcemi, které se mají odebírat nebo měřit, což přibližně odpovídá frakcím, jež pronikají do oblastí dýchacího ústrojí za průměrných podmínek. Měření prováděná podle těchto konvencí pravděpodobně poskytnou lepší vztah mezi naměřenou koncentrací aerosolových částic a rizikem onemocnění.

Konvence pro odběr vzorků uznávají, že vdechovaná je pouze frakce aerosolových částic, která je v blízkosti nosu a úst. Tato frakce se nazývá vdechovatelná frakce³³. U některých látek mají ze zdravotního hlediska zvláštní význam ty složky této frakce, které pronikají za hrtan (thorakální a tracheobronchiální frakce³⁴) nebo do dýchacích cest bez řasinkového epitelu (respirabilní frakce³⁵).

Norma ČSN EN 7708 předkládá dohodnuté křivky odpovídající přibližně vdechnuté frakci a jejím složkám, které se dostávají za hrtan nebo do dolních cest dýchacích, kde již není řasinkový epitel. Tyto křivky se nazývají vdechovatelná konvence, thorakální konvence a respirabilní konvence (viz obrázek 50). Z nich lze vypočítat extrathorakální a tracheobronchiální konvence. Přístroje používané k odběru vzorků mají být v souladu s odběrovou konvencí odpovídající té oblasti dýchacího

33 Hmotnostní zlomek aerosolových částic, které jsou vdechnuty nosem a ústy.

34 Hmotnostní zlomek vdechnutých částic pronikajících za hrtan, ale nepronikajících do dýchacích cest bez řasinkového epitelu.

35 Hmotnostní zlomek vdechnutých částic, které pronikají do dýchacích cest, kde není řasinkový epitel.

ústrojí, kde ukládání měřené látky může vést k biologickým účinkům. Například vdechovatelná konvence má být zvolena, jestliže látka může mít biologické účinky, ať se ukládá kdekoliv, thorakální konvence má být vybrána pro oblast průdušek a respirabilní konvence pro oblast výměny plynů od průdušinek k plicním sklípkům. U dětí a dospělých s některými nemocemi hrudníku je tracheobronchiální oblast účinnější v zachycování částic malých aerodynamických průměrů než u zdravých dospělých.

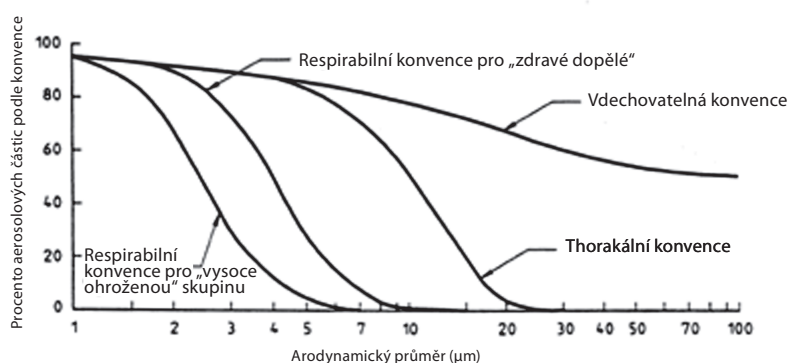
Konvence mohou charakterizovat jen přibližně chování dýchacího ústrojí, přičemž jsou významné zejména tyto předpoklady:

- **Vdechovatelná frakce** závisí na pohybu vzduchu – jeho rychlosti a směru, na frekvenci dýchání a na tom, zda se dýchá nosem nebo ústy. Hodnoty udávané ve vdechovatelné konvenci platí pro reprezentativní hodnoty frekvence dýchání a jsou zprůměrovány pro všechny směry proudění vzduchu. To odpovídá osobě, která je rovnoměrně vystavená proudění vzduchu ze všech stran nebo proudění převážně ze strany nebo zezadu. Konvence zpravidla podhodnocuje vdechovatelnou frakci větších částic pro osobu, která je obvykle čelem k proudění vzduchu.
- **Respirabilní a thorakální frakce** se liší pro jednotlivé osoby a způsoby dýchání, a konvence jsou nutně přibližnými hodnotami (aproximacemi) vzhledem k průměrnému případu.
- Každá konvence určuje přibližně frakci pronikající do dané oblasti a nikoli frakci, jež se tu ukládá. Obecně platí, že částice se musí uložit, aby mohla mít biologický účinek. V tomto ohledu vedou konvence k přeceňování možného biologického účinku. Nejdůležitějším příkladem je respirabilní konvence, která přeceňuje frakci velmi malých částic, jež se ukládají v dýchacích cestách bez řasinkového epitelu, protože určitá frakce těchto částic je vydechována, aniž se uloží. Tyto velmi malé částice nepředstavují na mnoha pracovištích významný podíl na hmotnosti odebíraného vzorku.
- **Thorakální konvence** se blíží thorakální frakci při dýchání ústy, při němž je tato frakce vyšší než thorakální frakce při dýchání nosem. Extrathorakální konvence proto může podceňovat „nejhorší případ“ extrathorakální frakce, k němuž dochází při dýchání nosem.

Procento částic aerosolu zastoupených v jednotlivých frakcích, které vstupují do dýchacích cest, uvádí tabulka 37, resp. obrázek 54.

Tabulka 37: Vdechovatelná, thorakální a respirabilní frakce jako procenta z aerosolových částic podle jejich aerodynamických průměrů (Hinds, 1999).

Aerodynamický průměr (μm)	Respirabilní frakce	Torakální frakce	Vdechovatelná frakce
1	97	97	97
2	94	94	91
3	92	92	74
4	89	89	50
5	87	85	30
6	85	81	17
8	81	67	5
10	77	50	1
15	70	19	0
20	65	6	0
25	61	2	0
30	58	1	0
35	56	0	0
40	55	0	0
50	52	0	0
60	51	0	0
80	50	0	0
100	50	0	0



Obrázek 54: Vdechovatelná, thorakální a respirabilní konvence jako procenta z aerosolových částic podle ČSN EN 7708.

3.10.4 Depozice aerosolu v dýchacím systému

Jakmile se částice jednou v plicích usadí, jsou zde zadržovány po různou dobu, a to v závislosti na fyzikálně chemických vlastnostech těchto částic, na místě jejich depozice v plicích a na druhu příslušného samočisticího mechanismu. Povrch horních cest dýchacích je pokryt hlenovou výstelkou, která je činností řasových buněk poháněna vzhůru do hltanu, kde je podvědomě spolknuta do zažívacího traktu. Tento proces dopravy částic, usazených v dýchacích cestách, je otázkou několika hodin. Tento čistící mechanismus může být urychlen nízkými dávkami dráždivých plynů nebo aerosolů nebo může být zpomalen vysokými dávkami těchto látek nebo přetížením částicemi. Kvůli své funkci výměny plynů není alveolární oblast vybavena touto ochranou hlenovou výstelkou. Proto nerozpustné částice usazené v této oblasti jsou odstraňovány jen velmi pomalu, po dobu měsíců nebo roků. Rozpustné částice projdou skrz tenkou alveolární membránu do krevního řečiště. Pevné částice se mohou rozpouštět pomalu nebo mohou být pohlceny makrofágy (phagocytic cells) a rozpuštěny nebo dopraveny do lymfatických uzlin nebo do transportního systému řasových buněk a hlenové výstelky. Aerosoly s fibrogenním účinkem, jako je například křemen, zasahují do čistícího mechanismu a způsobují postupné zjizvení nebo fibrózu v alveolární oblasti (Hinds, 1999).

Tabulka 38: Charakteristiky různých částí plic v souvislosti s expozicí aerosolům.

Dýchací cesta	Generace	Počet na generaci	Průměr (mm)	Délka (mm)	Celková plocha příčného průřezu (cm ²)	Rychlost (mm.s ⁻¹)	Doba pobytu (ms)
Trachea	0	1	18	120	2,5	3900	30
Primární bronchus	1	2	12	48	2,3	4300	11
Lalok průdušek	2	4	8,3	19	2,1	4600	4,1
Segmentová průduška	4	16	4,5	13	5,5	3900	3,2
Průdušky s chrupavčitou stěnou	8	260	1,9	6,4	6,9	1400	4,4
Terminální průdušky	11	200	1,1	3,9	20	520	7,4
Bronchioli s hlenovou výstelkou stěn	14	1,6.10 ⁴	0,74	2,3	69	140	16
Konečné větve bronchi	16	6,6.10 ⁴	0,60	1,6	180	54	31
Dýchací bronchioly	18	2,6.10 ⁵	0,50	1,2	530	19	60
Ductus alveoli	21	2.10 ⁶	0,43	0,7	3200	3,2	210
Plicní sklípek	23	8.10 ⁶	0,41	0,5	7,2.10 ⁴	0,9	550
Alveola		3.10 ⁸	0,28	0,2			

Poznámka: Doba pobytu při velikosti proudu vzduchu 3,6 m³.hod⁻¹ (1 dm³.s⁻¹)

Tabulka 38 udává charakteristiky různých částí plic. Při dýchání ustálenou frekvencí, kdy dochází k výměně $3,6 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$ ($1 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) vzduchu se rychlost proudění vzduchu v dýchacích cestách mírně zvyšuje, dokud vzduch nedosáhne laloků průdušek. Potom se během zbývajících 70 nebo 80 mm cesty rychlost rapidně zmenšuje. Toto rychlé snížení rychlosti je výsledkem značného zvýšení celkové plochy průřezu dýchacích cest kvůli velkému počtu malých vzduchových kanálků. Celková plocha příčného průřezu dýchacích cest se zvyšuje faktorem 250 od laloků průdušek až k průdušinkám a stejným faktorem se snižuje rychlost. Při normálním dýchání čerstvě vdechnutý vzduch tlačí zbytkový vzduch před sebou, takže čerstvý vzduch putuje pouze do ductus alveoli (alveolar duct). Výměna vzduchu nicméně pohotově probíhá difúzí O_2 a CO_2 přes velmi krátké koncové vzdálenosti (menší než 1 mm). V trachei (průdušnici) a primárním bronchu (průdušce) může být proud vzduchu při špičkovém vdechovém a výdechovém proudu vzduchu turbulentní i při normálním dýchacím cyklu. Zbývajícím proud vzduchu je za normálních podmínek laminární, ale protože části dýchacích cest jsou relativně krátké ve srovnání s jejich průměry (délka je cca třikrát větší než průměr), proud vzduchu v těchto malých dýchacích cestách není plně rozvinutý laminární proud. To ale komplikuje matematickou analýzu a modelování. Rychlosti vzduchu, udávané v tabulce 38 jsou založeny na „uklidněném“ proudu, kdežto při skutečném dýchání se velikost proudu vzduchu dvakrát při každém cyklu kontinuálně mění a obrací se směr proudu vzduchu (Hinds, 1999).

Mechanismy usazování částic v dýchacím systému

Nejdůležitější z mechanismů usazování částic v dýchacím systému jsou **impakce**, **usazování** a **difúze**. Zachycování (interception) a elektrostatická depozice jsou důležité pouze v některých situacích. Částice, které se dostanou do kontaktu se stěnami dýchacích cest, se zde usazují a nejsou znovu strženy do proudu. Rozsah a lokalizace depozice částic záleží na velikosti částic, jejich hustotě a tvaru; na geometrii dýchacích cest a na způsobu dýchání daného člověka.

Popsat depozici aerosolu v dýchacím systému vyžaduje kompletní řešení trvale se měnícího hydrodynamického proudového pole v dýchacích cestách a superpozici pohybu částic na toto pole. V současné době to není možné, je však možné pochopit faktory tohoto procesu zkoumáním specifických mechanismů, které způsobují usazování jednotlivých částic v různých místech dýchacího systému. Pochopíme-li tyto mechanismy, je možné následně pochopit i složité vztahy mezi depozicí částic v dýchacím systému a velikostí částic, dechovou frekvencí, množstvím vzduchu za časovou jednotku a dechovým objemem. Následující rozbor platí pro zdravé dospělé osoby. Pro ostatní osoby, jako jsou děti nebo osoby s dýchacími potížemi, mohou být charakteristiky depozice zcela odlišné. Při vdechování musí vzduch prodělat několik změn směru proudění z nosu nebo úst skrz větvící se dýchací cesty až do alveolární oblasti. Při každé změně směru se částice, které se vznášejí v proudu vzduchu, ještě

chvíli kvůli své setrvačnosti pohybují původním směrem. Výsledkem je, že některé částice, které jsou blízko povrchu dýchacích cest, se na tomto povrchu usadí procesem zvaným **inerciální impakce**. Účinnost tohoto mechanismu závisí na vzdálenosti, kde se částice při dané rychlosti proudění vzduchu zastaví. Jelikož je tato vzdálenost relativně malá, je tento mechanismus omezen pouze na depozici velkých částic, které se nacházejí v blízkosti stěn dýchacích cest. Tento mechanismus však způsobuje největší část depozice částic v dýchacím systému. Největší depozice impakcí obvykle nastává v místě nazývaném „first carina“, což je bod, kde se větví průdušnice, a v menší míře i v místech dalších větvení. Důvod je zřejmý – proudnice toku vzduchu se v těchto místech nejvíce ohýbají, takže hmotné částice díky své setrvačnosti dopadají na stěny dýchacích cest, podobně jako je tomu v impaktoru. V tabulce 39 jsou uvedeny poměry „vzdálenosti zastavení“ pro částice různých velikostí při rychlostech proudu vzduchu za ustáleného dýchání (tj. $3,6 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$, resp. $1 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Pravděpodobnost depozice impakcí záleží na tomto poměru a je největší v oblasti průdušek (Hinds, 1999).

Tabulka 39: Relativní důležitost mechanismu usazování, impakce a difúze pro depozici částic o standardní hustotě ve vybraných oblastech plic (Hinds, 1999).

Dýchací cesta	Vzdálenost zastavení ^a			Vzdálenost zastavení ^b			Rms přemístění ^c		
	Průměr dýchacích cest (%)			Průměr dýchacích cest (%)			Průměr dýchacích cest (%)		
	0,1 μm	1 μm	10 μm	0,1 μm	1 μm	10 μm	0,1 μm	1 μm	10 μm
Průdušnice	0	0,08	6,8	0	0	0,52	0,04	0,01	0
Primární bronchus	0	0,13	10,9	0	0	0,41	0,03	0,01	0
Segmentový bronchus	0	0,31	27,2	0	0	0,22	0,05	0,01	0
Konečný bronchus	0	0,17	14,9	0	0,02	2,1	0,29	0,06	0,02
Konečné větve bronchi	0	0,03	2,8	0	0,18	15,6	1,1	0,22	0,06
Ductus alveolar	0	0	0,23	0,04	1,7	150	3,9	0,79	0,23
Plicní sklípky	0	0	0,07	0,12	4,7	410	6,7	1,3	0,40

Poznámky:

^a Vzdálenost zastavení pro ustálený proud $3,6 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$.

^b Vzdálenost zastavení = usazovací rychlost násobená dobou pobytu v každé dýchací cestě při ustáleném proudu $3,6 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$.

^c Rms přemístění při době pobytu v každé dýchací cestě při ustáleném proudu $3,6 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$.

Zatímco impakce je nejvýraznější v oblasti dýchacích cest o velkém průřezu, usazování (settling) je nejdůležitější v dýchacích cestách o malé ploše průřezu a v oblasti plicních sklípků, kde jsou rychlosti proudění nízké a rozměry dýchacích cest jsou malé. Sedimentace má svůj maximální účinek při odstraňování částic z proudu vzduchu v horizontálně orientovaných dýchacích cestách. Tabulka 39 udává poměr usazovací vzdálenosti (konečná usazovací rychlost násobená dobou pobytu vzduchu v každé dýchací cestě při ustáleném proudu o velikosti $3,6 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$.) vzhledem k průměru dýchací cesty. Jak je možno vidět, tento mechanismus má největší význam v dolních cestách dýchacích. Hygroskopické částice narůstají během svého průchodu dýchacími cestami a tento nárůst podporuje depozici pomocí usazování a impakci v dolních cestách dýchacích.

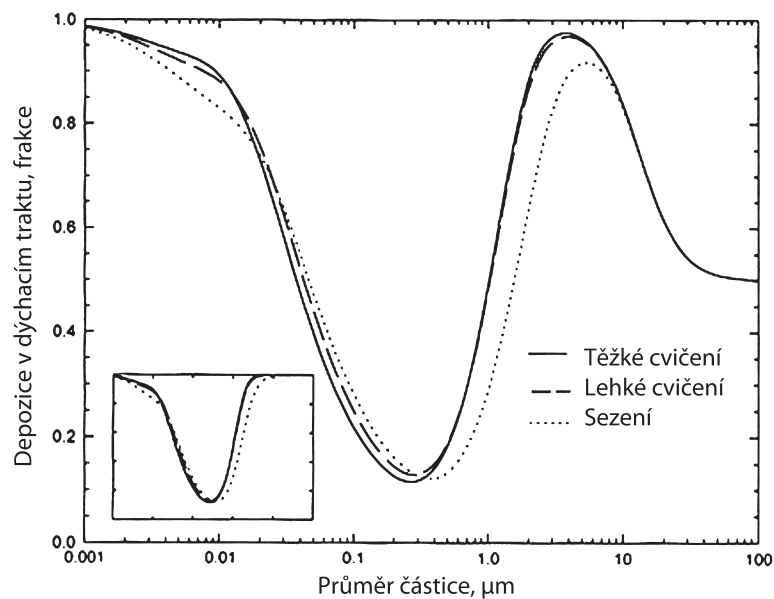
Brownův pohyb submikroskopických částic vede ke zvýšené pravděpodobnosti, že se tyto částice usadí na stěnách dýchacích cest, zvláště pak na stěnách těch nejmenších dýchacích cest, kde jsou vzdálenosti krátké a doba pobytu relativně dlouhá. Tabulka 39 ukazuje poměr střední kvadratické hodnoty přemístění během pobytu vzduchu ve vybraných dýchacích cestách vzhledem k průměru těchto dýchacích cest. Tento poměr určuje relativní pravděpodobnost depozice pomocí difúze. Difúze je převažující mechanismus depozice pro částice o průměru menším než $0,5 \text{ } \mu\text{m}$ a je určena spíše geometrií než aerodynamikou, rozměrem částice.

Zachycení (intercepce) je proces, při kterém částice, aniž by se odchýlila ze směru proudu vzduchu, se dostane do kontaktu s povrchem dýchacích cest kvůli své velikosti. Pravděpodobnost zachycení závisí na blízkosti proudu vzduchu k povrchu dýchacích cest a na poměru velikosti částice k průměru dýchací cesty, který je obvykle malý i v těch nejmenších dýchacích cestách. Výjimkou jsou dlouhá vlákna, která mají malý aerodynamický průměr a různě se klikatí, takže je zde velká pravděpodobnost depozice záchytem částice na jejich povrchu.

Dále nabité částice jsou přitahovány k povrchu dýchacích cest působením elektrostatického náboje, který částice v dýchacích cestách indukují svou přítomností. Nabité aerosoly s vysokou koncentrací se také lépe usazují díky tomu, že se navzájem odpuzují a tato síla „tlačí“ částice od sebe, takže pravděpodobnost jejich nárazu na stěny dýchacích cest se opět zvyšuje.

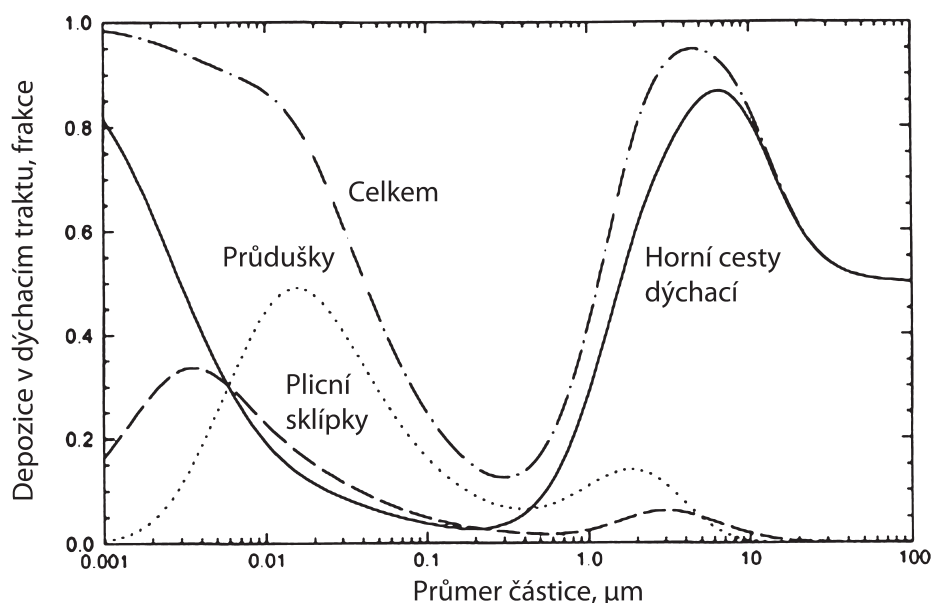
Celková depozice, tj. kombinovaná depozice částic ve všech oblastech dýchacího systému, je obvykle určena experimentálně pomocí měření koncentrace inhalovaných a exhalovaných monodisperzních zkušebních aerosolů (monodisperse test aerosols) za kontrolovaných podmínek. Dechová frekvence jednotlivce, objem vzduchu, který jedinec vdechuje a délka pauzy mezi vdechem a výdechem, to vše ovlivňuje depozici inhalovaných částic. Pro částice s aerodynamickým průměrem větším než $0,5 \text{ } \mu\text{m}$ platí, že čím je nižší dechová frekvence (počet dechů za minutu), tím je větší frakční depozice, protože je více času na gravitační usazování. Pro

částice větší než $1\text{ }\mu\text{m}$ se depozice zvyšuje s průměrným množstvím proudu vzduchu za časovou jednotku, protože mechanismus inerciální impakce je závislý na rychlosti. Pauza v cyklu dýchání mezi vdechem a výdechem zvyšuje depozici částic o všech velikostech, zvláště to platí pro větší částice a delší pauzy. Na obrázku 55 je zobrazena celková depozice pro širokou řadu rozměrů částic, založená na modelu Mezinárodní komise pro radiační ochranu (International Commission for Radiological Protection – ICRP) (Hinds, 1999).



Obrázek 55: Celková depozice při třech úrovních cvičení, předpověděná pomocí modelu depozice ICRP (Uvedený obrázek neobsahuje účinek inhalability) (Hinds, 1999).

Ačkoli při většině experimentálních studií byla měřena pouze celková depozice, pro hodnocení potenciálního nebezpečí, způsobeného vdechnutými částicemi, je důležitá depozice na konkrétních místech v plicích. Pro vyhodnocení tohoto nebezpečí je nutné znát efektivní dávku v kritické části plic, kde vzniká poranění. Depozice v jakékoli části dýchacího systému závisí na depozici v předchozí oblasti, stejně tak i na účinnosti depozice v dané oblasti. Na obrázku 56 je zobrazena celková a lokální depozice, předpověděná modelem ICRP jako funkce velikosti částic pro částice od velikosti $0,001$ do $100\text{ }\mu\text{m}$ (Hinds, 1999).



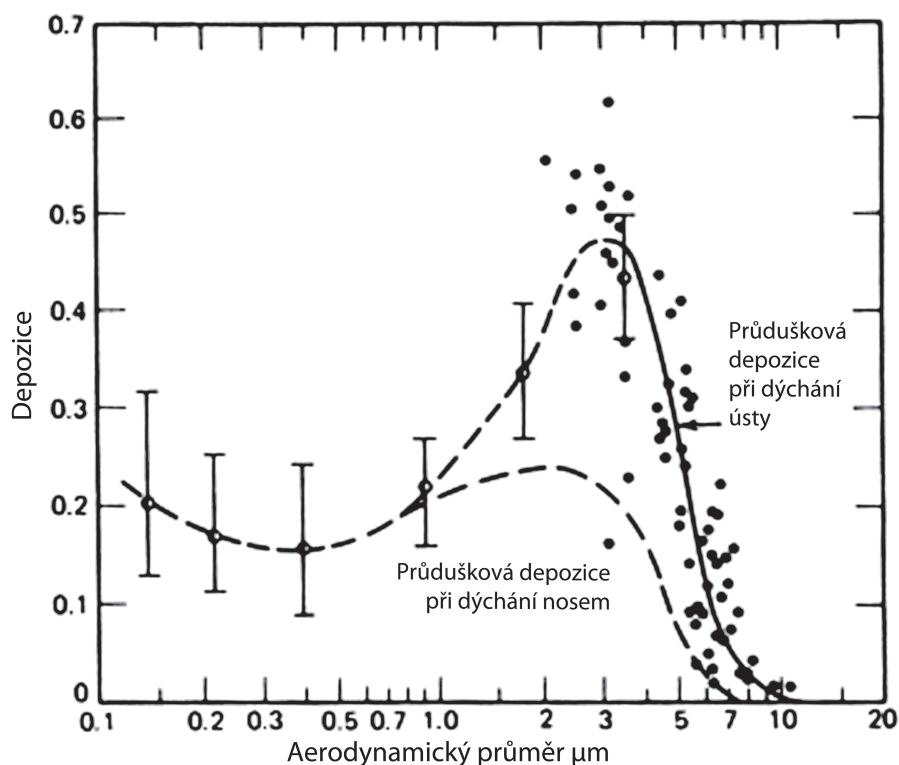
Obrázek 56: Celková a regionální depozice, předpověděná podle modelu depozice ICRP, za podmínek lehkého cvičení (při dýchání nosem). Průměrné údaje pro muže a ženy (Hinds, 1999).

Depozice částic v oblasti horních cest dýchacích je silně proměnlivá a záleží na několika faktorech, včetně toho, zda k dýchání slouží nos nebo ústa, na množství vzduchu za časovou jednotku a na velikosti částic. Vzduch vdechovaný nosem je při svém průchodu přes spirálovité útvary v nosních cestách ohříván a zvlhčován. Největší částice jsou odstraňovány ze vzduchu usazováním a impakcí na nosních chloupkách a v ohybech dýchacích cest. Tyto částice se usazují na řasovém povrchu nosní dutiny a jsou odstraněny do hltanu a spolknuty do zažívacího traktu. Při dýchání ústy při vdechovaném množství $1,8 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$ ($30 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$) je přibližně 20 % částic o aerodynamickém průměru $5 \text{ } \mu\text{m}$ a 70 % částic o aerodynamickém průměru $10 \text{ } \mu\text{m}$ usazeno ještě před tím, než vdechovaný vzduch dojde k hrtanu.

Tyto účinnosti se významně zvyšují se zvyšující se dechovou frekvencí. Může nastat výrazné míšení vdechovaného vzduchu s rezervním vzduchem v prvních několika částech tracheobronchiální oblasti a to kvůli turbulenci v těchto oblastech dýchacích cest. Toto míšení dopravuje částice z vdechovaného vzduchu do rezervního vzduchu a usnadňuje tak následující depozici submikrometrických částic v alveolární oblasti. Velmi malé částice, zvláště menší než $0,01 \text{ } \mu\text{m}$, mají zvýšenou schopnost depozice v tracheobronchiální oblasti kvůli svému rychlému Brownovu pohybu.

Alveolární depozice se obvykle vyjadřuje jako frakce vdechovaných částic, procházejících dýchacími cestami hlavy, která se nakonec usadí v alveolární oblasti. Kvůli depozici částic, závislé na rozměru částic, v tracheobronchiální oblasti, částice větší než 10 μm obvykle nedosáhnou alveolární oblasti a částice o velikosti 2 až 10 μm dosáhnou této oblasti jen v omezené míře. Depozice v alveolární oblasti záleží na velikosti částic, na dechové frekvenci a na dechovém objemu. Jak je zobrazeno na obrázku 56, alveolární depozice je omezena tehdy, kdykoli je tracheobronchiální depozice a depozice v hlavě vysoká. Takže tyto rychle se pročisťující oblasti slouží k ochraně mnohem zranitelnější alveolární oblasti. Inhalovaný vzduch proniká skrz alveolární oblast s tenkým parabolickým rychlostním profilem podél osy každé dýchací cesty. Při normálním dýchání vrcholy parabol nedosahují do alveol a výměna plynů probíhá pomocí molekulární difúze přes poslední milimetr. Při malých rychlostech vzduchu a malých rozměrech v této oblasti, difúze plynu je rychlejší mechanismus dopravy plynu než proud vzduchu. Vdechované submikrometrické částice nejsou přímo usazovány v alveolární oblasti, protože usazování je příliš malé a jejich difúze je o řád pomalejší, než difúze molekul plynu.

Depozice těchto částic je řízena jejich přenosem z vdechovaného vzduchu do rezervního vzduchu v tracheobronchiální oblasti, po kterém následuje usazování ze zachyceného rezervního vzduchu v alveolární oblasti. Následkem toho dosahuje alveolární depozice pro částice o velikostech 0,1 až 1 μm okolo 10 až 20 % a je přibližně nezávislá na velikosti částic. Jak je zobrazeno na obrázku 57, velikost částic, které mají největší depozici v alveolární oblasti při dýchání ústy, je cca 3 μm a průměrně 50 % těchto částic je usazeno v alveolární oblasti. Při dýchání nosem, je rozměr částic s maximální alveolární depozicí snížen na cca 2 μm , a přibližně 10 až 20 % těchto částí je zachyceno.



Obrázek 57: Experimentální údaje pro depozici v alveolární oblasti. Depozice je vyjádřena jako frakce inhalace ústy vzhledem k aerodynamickému průměru (geometrický průměr je používán při rozměrech pod 5 μm) (Hinds, 1999).

3.10.5 Biologické vlastnosti aerosolu

Biologická účinnost aerosolu závisí na jeho chemickém složení a na fyzikálních vlastnostech. Na těchto základních charakteristikách závisí jeho rozpustnost v biologických tekutinách, toxicita, velikost částic, jejich tvar a pevnost, elektrický náboj atd. Z hlediska působení na člověka se dělí aerosol na toxický a netoxický. Aerosol bez toxického účinku se v hygienické praxi dělí do několika kategorií:

Aerosol s převážně fibrogenním účinkem

Aerosol s fibrogenním účinkem jsou zejména prachy, které obsahují fibrogenní složku – křemen, kristobalit, tridymit, popř. $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. Naprosto převažující jsou

prachy s obsahem křemene, které doprovázejí průmysl těžby, dobývání a úpravy hornin či nerostů a slévárenství.

Aerosol s možným fibrogenním účinkem

Aerosol s možným fibrogenním účinkem jsou zejména prachy, u kterých je výskyt fibrogenní složky pravděpodobný. Jedná se například o slídu talek, saze, svářečské dýmy, ferrosilicium či bentonit. V případě byť drobného obsahu fibrogenní složky (obvykle opět křemene) se považují za prachy s fibrogenním účinkem.

Aerosol s převážně nespecifickým účinkem

Aerosol s převážně nespecifickým účinkem jsou zejména prachy, které nemají výrazný biologický účinek. Jedná se například o hnědé uhlí, vápenec, mramor, umělá brusiva, slitiny a oxidy železa, tavený čedič, škváru, popílek, magnezit či dolomit. I v tomto případě, je-li příměs fibrogenní složky větší než 3 %, se tato směs hodnotí jako prach s fibrogenním účinkem.

Aerosol s dráždivým účinkem

Rozeznáváme čtyři hlavní skupiny těchto aerosolů:

- Minerální (např. CaO, MgO, uhličitany alkalických kovů, cement).
- Textilní (např. bavlna, len, konopí, hedvábí, sisal, juta, kapok a syntetická textilní vlákna).
- Živočišné (např. peří, vlna, srst a ostatní živočišné prachy).
- Rostlinné (např. mouka, tabák, čaj, káva, koření, obilní prach a prachy ze dřeva).

Prach ze dřeva hodnotíme dále podle původu dřeva. Ta dělíme na:

- Biologicky vysoce účinná dřeva (např. teak, jalovec, santal, tis a řada exotických dřev).
- Biologicky účinná dřeva (např. akát, balza, borovice, eben, smrk, topol a další).

- Biologicky málo účinná dřeva (např. bříza, buk, dub, habr, jasan, javor, jedle, jilm a další exotická dřeva).

Minerální vláknité prachy

Minerální vláknité prachy dělíme podle původu na:

- Přírodní minerální vlákna (např. azbest – chrysolit, krocidolit, amfibolit).
- Umělá minerální vlákna (např. čedičová, skleněná, strusková, keramická apod.).

Toxické aerosoly

Toxický aerosol se hodnotí spolu s plyny a párami mající toxické účinky. Nejčastěji vzniká při činnostech, kde se manipuluje s toxickými látkami nebo párami, nebo při průmyslových haváriích. Toxicita tohoto aerosolu obvykle nezávisí jen toxicitě primárních složek tvořících jeho částice, ale výrazně ji ovlivňuje také toxicita látek deponovaných na površích a v pórech částic. Nutnou podmínkou je, aby byly tyto látky schopné se po vniknutí do organismu desorbovat a pronikat do krevního oběhu člověka.

Nejlépe se deponují kondenzáty par kapalin a pevných látek s nižším bodem varu, které se mohou dostávat do plynného skupenství (při tepelných úpravách, spalování, svařování, požáru či výbuchu). Spolu s ostatními produkty termických procesů tak ve vznikajícím kouři přecházejí do atmosféry, kde se ochlazují a kondenzují na aktivních površích částic kouře nebo atmosférického aerosolu. Rychlost depozice a tudíž i celkové množství deponované látky závisí na fyzikálně-chemických vlastnostech obou složek. Nejlépe k depozici dochází v případech, kdy jsou obě složky hydrofilní, a kdy mohou interagovat se vzdušnou vlhkostí. Vodní kapičky totiž mohou působit jako smáčedlo i rozpouštědlo současně. Tento případ představuje také nejhorší možnou variantu následků na zdraví zasažených osob, neboť takto deponované toxické příměsi se poměrně snadno z povrchů aerosolových částic uvolňují.

Způsob hodnocení frakcí

Z hlediska působení aerosolů na lidské zdraví, byly definovány velikostní skupiny aerosolu označované jako PM_x (Particulate Matter), kde x je 10; 2,5 nebo 1,0 (v μm). Vzorek aerosolu PM_x potom představuje takový soubor částic, kdy částice o aerodynamickém průměru x mikrometrů jsou předřazeným odběrovým zařízením

separovány s účinností právě 50 %, přičemž částice menší, jsou ve sledovaném vzorku obsaženy s téměř 100 % pravděpodobností a naopak částice větší nežli x mikrometrů s pravděpodobností blíží se nule (Holoubek, on line).

Z původních odběrů celkového vzorku aerosolu bez velikostního rozlišení částic – TSP (Total Suspended Particles) přešla většina zemí k měření tzv. thorakální frakce³⁶ aerosolu PM_{10} a v 90. letech minulého století byla publikována studie, která poukázala na vyšší korelaci mezi negativními účinky $PM_{2.5}$ na lidské zdraví než má PM_{10} (Schwartz et al., 1996). To vedlo také k regulaci emisí PM_x (z průmyslových zdrojů a dopravy) a k nastavení nejvýše přípustných limitů pro imise aerosolových částic v USA a EU. S rostoucími poznatky o nebezpečnosti antropogenních aerosolů, zvláště pak o schopnosti přestupu velmi malých částic z alveol přímo do krevního oběhu, jsou ve světě tendence postupně přecházet k měření frakcí aerosolu i $PM_{1.0}$.

3.10.6 Interakce aerosolových částic s organismem

Částice aerosolu větší než 10 μm (tj. prachu) jsou z valné části zachycovány již v horních cestách dýchacích. Převážná většina částic menších než 10 μm (thorakální frakce) je zachycována v dolních cestách dýchacích až do jejich konečného větvení (viz obrázek 58).

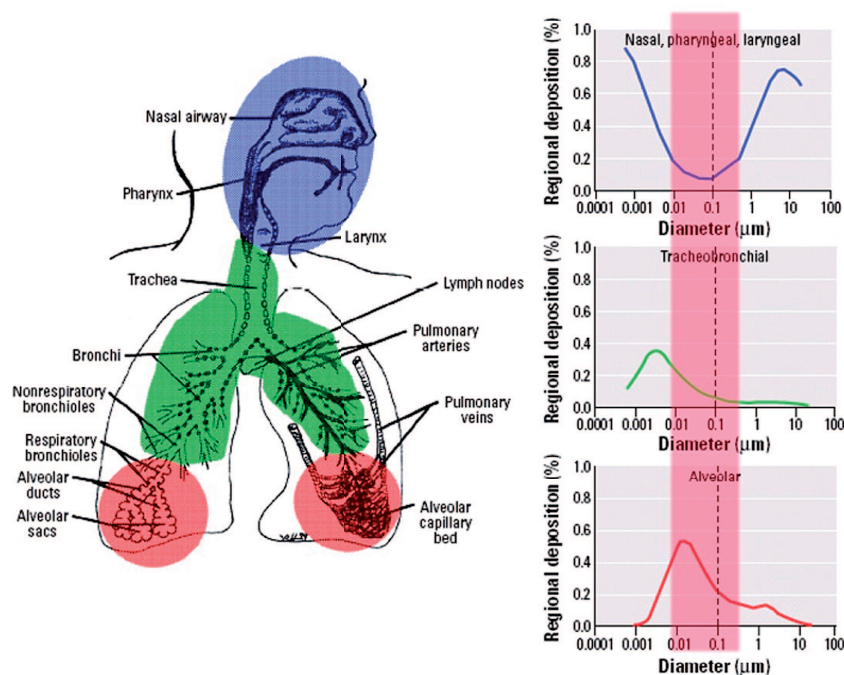
Pakliže exponovaná osoba přijímá aerosol vdechováním nosem, dochází v nose k zadržení asi 40 až 50 % částic větších jak 2,5 μm . Bylo zjištěno, že tato filtrační schopnost nezávisí na věku ani na délce doby pobytu v zamořeném prostředí. Penetrace (pronikavost) nosem je pro částice o průměru 10 μm téměř nulová, pro částice o průměru 1 μm pak až 90 %. Tato (respirabilní) frakce proniká až do terminálních pater dýchacích cest a plicních alveolů. Změna penetrace částic nosem v závislosti na jejich velikosti a na rychlosti proudění potvrzuje názor, že mechanismus, kterým jsou částice v nose retinovány, je impaktace, to znamená, že větší a těžší částice ulpívají na stěnách nosní dutiny, menší a lehčí jsou vzdušným proudem zanášeny dále. Také platí, že částice o malé měrné hmotnosti pronikají hlouběji do dýchacích cest, podobně jako nesférické částice.

Pokud jde o vliv hygroskopicity částic aerosolu, pak platí, že plicní retence hygroskopických aerosolů je větší než u srovnatelných nerehydratujících látek. U hygroskopických materiálů se velikost částic v dýchacích cestách zvětšuje. Tento proces je velmi rychlý zvláště pro částice o velikosti kolem 1 μm .

Dojde-li k zachycení částice v dýchacím ústrojí, neznamená to ještě, že musí dojít k její **trvalé depozici**. Pokud ale k depozici dojde, pak z deponovaných částic je v plicích asi 15 % částic o velikosti 2 μm , 55 % o velikosti 1 μm a 30 % o velikosti

36 Hmotnostní zlomek vdechovaných částic pronikajících za hrtan (ČSN ISO 7708).

0,25 μm . Čím jsou částice menší, tím pronikají hlouběji. Ukládání se zmenšuje se zmenšující se velikostí částic až k 0,1 μm ; pod touto velikostí se ukládání opět zvyšuje díky Brownovu pohybu.



Obrázek 58: Místa ataku dýchacího ústrojí částicemi aerosolu podle jejich velikosti (Mráz, online).

Jelikož mají plíce schopnost samočištění, nemusí vést expozice vysokým koncentracím aerosolů k nezvratným trvalým následkům. Tento proces, který se nazývá **clearance**, spočívá ve schopnosti transportu zachycených nečistot prostřednictvím řasinkového pohybu v hlenovém povlaku sliznice, ve kterých se nacházejí řasinkové a pohárkové buňky. Takto je vylučována z dýchacích cest většina nerespirabilních částic. Činnost řasinkových buněk může být narušena cigaretovým kouřem a některými dráždivými látkami, například oxidem siřičitým (SO_2).

Alveolární komponenta záleží jednak na pohyblivém krycím filmu, jednak na fagocytóze. Tyto fyziologické mechanismy dopravují asi 90 % inhalovaných částic do hlitanu. Pohyb řasinek probíhá s frekvencí 1300 min^{-1} a umožňuje pohyb hlenové vrstvy silné 5 μm rychlostí 15 až 18 milimetrů za minutu.

Alveolární film, který je asi 0,2 μm silný, vzniká jednak transudací z alveolárních kapilár, jednak specifickou sekrecí alveolárních výstelkových buněk. Fagocyty (prašné buňky) vzniklé přeměnou buněk výstelky plicních sklípků vynášejí pohlcené

částice do průdušek, mohou však zanášet inhalované částice i do interalveolárních štěrbin, mizních cév a lymfatických uzlin. Částice z trachey, bronchů a bronchiolů se odstraňují činností řasinek. Ciliární mechanismus není efektivní pro kapaliny. Zachycené částice tak mohou být vykašlány, popřípadě vysmrkány, obvykle jsou však s hlenem z hltanu polykány a dále odstraňovány trávicím traktem.

Samočištění může selhat při nadměrném zaprášení plic nebo při poškození pochodů samočištění. Může jít o stavy vrozené, častěji jde však o ztrátu funkce získanou v průběhu života. Patologickým jevem je penetrace prachových částic za alveolární membránu do intersticiálních štěrbin a jejich transport lymfou do lymfatických uzlin. Některé práce uvádějí, že respirační membránou mohou pronikat částice aerosolu přímo. Prašné plicní depo vzniká tím, že alveolární membrány reagují na inhalované částice, které nebyly odstraněny fyziologickými mechanismy. Jde o proliferaci alveolárních buněk, které fagocytují částice aerosolu, zůstávají však ve svazku a alveolárním povrchem. Tato proliferace může vést až k obliteraci alveolů. Z těchto prašných dep se deponovaný aerosol postupně odstraňuje.

3.10.7 Následky expozice aerosolům

Částice aerosolu mohou působit na organismus několika způsoby. Jejich účinky, které závisí na chemických a fyzikálních vlastnostech příslušného aerosolu, mohou být mechanické, toxické, fibroplastické, alergizační nebo karcinogenní.

Mechanicky se aerosol uplatňuje na kůži, ve spojivkovém vaku, na sliznici, blokuje lymfatické cesty v plicích apod. Při delším působení nastupuje účinek dráždivý, jehož výsledkem bývají nespecifické zánětlivé změny kůže, spojivek a sliznic v závislosti na chemickém složení částic, jejich množství, velikosti, tvaru, hloubce působení a individuální reakci. **Toxickým** označujeme účinek vedoucí k charakteristickým lokálním, popřípadě celkovým příznakům (např. perforace nosního septa při expozici sloučeninám chromu, intoxikace olovem po inhalaci oloveného prachu atd.). **Fibroplastickými** rozumíme účinky, které vedou k tvoření nového vaziva. **Alergizující** účinek se projevuje nejčastěji vznikem přecitlivělostí kůže nebo dýchacích cest (ekzém, rhinitis alergica, astma bronchiale). Jako alergen se uplatňují různé chemické látky, kovy a především rostlinné prachy. **Karcinogenní** jsou účinky způsobující zhoubné bujení na kůži nebo v dýchacích cestách. Účinek se přičítá některým kovům (chromu, niklu, arsenu), některým uhlovodíkům nebo ionizujícímu záření.

U účinku mechanického, dráždivého, toxického a fibroplastického stupeň poškození závisí ve značné míře na dávce (tj. je závislý na množství a čase), zatímco u účinků alergizujícího a infekčního jsou rozsah a závažnost poškození na dávce nezávislé. Efekt působení aerosolu na organismus závisí dále i na individuálních vlastnostech

exponovaných jedinců (mohou být podmíněny vrozenou dispozicí, přecitlivělostí, aktuálním zdravotním stavem, dřívějším onemocněním, anatomickými poměry, různými návyky apod.).

Při inhalování dráždivých aerosolů vzniká v průběhu času reaktivní hyperémie sliznice spojená s hypersekrecí. Tyto změny ustupují asi v průběhu dvou hodin po skončení expozice. Jestliže se dráždění opakuje po dlouhou dobu, mohou vzniknout trvalé chronické změny. Subjektivně bývá reaktivní hyperémie provázena pálením, svěděním a kýcháním. Sekrece je bohatá a má vodnatý charakter.

Jak již bylo uvedeno výše, některé druhy aerosolů mohou vyvolat akutní záněty sliznice dýchacích cest. Kromě hyperémie tu vzniká zánětlivá infiltrace a zduření. Sekrece je hlenohnisavá. Obvykle se objevuje sekundární infekce, která pak ovlivňuje další průběh. Nejčastější jsou chronické záněty. Vznikají po dlouhodobém působení škodlivin. Nejzřetelnější jsou tyto nálezy v nejhořejších částech dýchacího ústrojí.

Subjektivně se nemusí výše popsané změny nijak projevit, jindy jsou stesky na škrábání, štípání, pálení v nose, bolesti v čelní krajině, bolesti při polykání, sucho v nose, v krku, krvácení z nosu (i několikrát denně, popřípadě i ve spánku), na postižení laryngu i na chrapot.

Na sliznici lze při vyšetřování po směně pozorovat prašný povlak, který lze snadno odstranit. Zánětlivé změny na sliznici mohou vést i ke snížení čichové ostrosti. Zánětlivé změny mohou postihnout průdušky, expektorace může být i hnisavá, postižené obtěžuje kašel, nejvíce v noci. Rozsah a závažnost procesu závisí na vyvolávací noxe, působících koncentracích, době expozice, individuální citlivosti i přidružené mikrobiální infekci. Záněty nosní sliznice se mohou šířit i do vedlejších dutin.

Genotoxicita aerosolů

V poslední době se v souvislosti s dlouhodobou expozicí aerosolům (např. ve znečištěných oblastech) stále častěji diskutují i následky genotoxické. Předmětem zkoumání v této oblasti je prověření mutagenity a embryotoxicity organických látek tvořících aerosol. Četnými testy již bylo prokázáno, že biologicky nejaktivnější skupinou látek vázanou v ovzduší na aerosolové částice jsou karcinogenní polyaromatické uhlovodíky (PAU).

V České republice se v rámci Programu Teplice v nedávné době sledovalo, jak znečištěné ovzduší působí na průběh těhotenství. V této oblasti výzkumu byly získány originální výsledky, které prokazují vliv respirabilních prachových částic a karcinogenních PAU na nepříznivé výsledky těhotenství, což se projevuje nízkou

porodní hmotností a nitroděložní růstovou retardací (IUGR). Ukázalo se, že pro vznik takového poškození je rozhodující období prvního měsíce těhotenství, pravděpodobně zejména období kolem početí. Bylo také prokázáno zvýšení výskytu IUGR, jestliže koncentrace PM_{10} během prvního měsíce těhotenství překročila 40 mg.m^{-3} a v případě karcinogenních PAU u překročení koncentrací 15 ng.m^{-3} . Je nutné poznamenat, že tyto průměrné měsíční koncentrace PM_{10} a PAU nejsou v ČR během zimního období nikterak výjimečné (zvláště v průmyslových oblastech a ve většině měst) (Šrám, 2007).

Dosavadní poznatky ukazují, že za embryotoxicitu PM_{10} jsou zodpovědny nejen samotné PAU, ale také jejich oxy- a nitroderiváty, které mohou interferovat s procesy zasahujícími do vývoje či výživy plodu. V souladu s tímto zjištěním jsou i poznatky o schopnosti kontaminantů z ovzduší indukovat DNA adukty a embryotoxicitu právě v té frakci, která obsahuje PAU. Výsledky prokázaly, že těhotné ženy a děti již od počátku početí představují velmi citlivou populaci, pro kterou může znečištěné ovzduší znamenat významný rizikový faktor. Důsledkem změn může být funkčně méně schopný jedinec. Funkční změny se mohou projevovat při jeho vývoji v průběhu těhotenství, zvýšenou nemocností v dětském věku, a ve středním věku např. zvýšením výskytu hypertenze a kardiovaskulárních onemocnění (Šrám, 2007).

Kromě zmíněných toxických vlastností mohou aerosoly při dlouhodobé expozici vést také ke zvýšení úmrtnosti u exponované populace. Studie zveřejněná Centrem pro otázky životního prostředí Univerzity Karlovy, na jejíž tvorbě se podílelo široké spektrum předních českých odborníků, poukázala na prokázané souvislosti mezi zvýšením úmrtnosti a zvýšením koncentrací PM_{10} či $PM_{2,5}$ v ovzduší. Podle této studie byl pozorován vzestup celkové úmrtnosti v rozmezí v průměru o cca 6 %. O respiračních příčinách smrti se soudí, že jsou nejvíce ovlivněny škodlivinami v zevním prostředí, a proto je zvýšení úmrtnosti na tyto diagnózy podstatně vyšší a dosahuje 17 % a více na každých $50 \text{ } \mu\text{g } PM_{10}$ či $PM_{2,5}$. Na zvýšení koncentrací prachu v ovzduší nejvíce, či výlučně, reagují nejcitlivější skupiny populace, což jsou nemocní a osoby starší 65 let. Z hlediska patofyziologického se soudí, že smrt je způsobena velmi jemnými prachovým částicemi (ultrafine particles) o průměru podstatně menším než 0,1 mikronu. O takto jemných částicích bylo v pokusech na zvířatech prokázáno, že jsou mnohonásobně agresivnější, a tím i toxičtější. Z hlediska možného mechanismu účinku se předpokládá, že tyto velmi jemné částice pronikají přímo do krevního oběhu, zvyšují viskozitu krve, usnadňují její koagulaci, což vede ke zpomalení proudění krve, ke snadnější možnosti trombotizace a embolizace a ke smrti (Centrum Univerzity Karlovy pro otázky životního prostředí, 2002).

Je tedy zřejmé, že problematika toxicity částic, zvláště těch nejmenších, bude čím dál tím více předmětem zájmu a výzkumu. A nebude se to týkat jen

expozice z venkovního ovzduší, ale také z pracovního ovzduší, kde často dochází díky profesionální expozice k závažným následkům na lidském zdraví. V této souvislosti se již objevila iniciativa v rámci evropského sdružení výzkumných institucí PEROSH (Partnership for European Research in Occupational Safety and Health) a také nové vědecké platformy NEW OSH ERA (New and Emerging Risks in Occupational Safety and Health - Anticipating and dealing with change in the workplace through coordination of OSH risk research), které se v následujících letech hodlají aktivně zapojit do výzkumu v této oblasti (včetně oblasti nanotoxikologie).

Literatura ke kapitole

Aerosol. In *Wikipedie* [online], stránka naposledy editována 2. 2. 2009 [cit. 2009-04-01]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Aerosol>>.

Air pollution: the real truth [online]. University of Edinburgh [cit. 2009-05-19]. Dostupný z WWW: <<http://www.portfolio.mvm.ed.ac.uk/studentwebs/session4/27/index.htm>>.

Bae, S. Y.; Jung, C. H.; Kim, Y. P. 2009. Development of an Aerosol Dynamics Model for Dry Deposition Process Using the Moment Method. *Aerosol Science and Technology*, vol. 43, pp. 570-580. Philadelphia: American Association for Aerosol Science. ISSN 0278-6826.

Baron, P.A.; Willeke, K. 2001. *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications*, 2nd Edition. New York : John Wiley&sons, Inc., 2001.

Bartoňová, A. ...[et al.]. 2004. *Aktuální otázky znečištění ovzduší*. Praha : Univerzita Karlova, 2004. Atmosférický aerosol, s. 216. ISBN 80-239-2187-8.

Bartovská, L; Šišková, M. 2005. *Co je co v povrchové a koloidní chemii: výkladový slovník* [online]. Praha : VŠCHT, 2005 [cit. 2009-04-01]. Dostupný z WWW: <http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_es-001/>.

Bednář, J. 1989. *Pozoruhodné jevy v atmosféře*. Praha : Academia, 1989. ISBN 80-200-0054-2.

Britská vláda v 50. letech tajila informace o nebezpečí kouření. In *Novinky.cz* [online], 30. 5. 2008 [cit. 2009-03-14]. Dostupné na www: <<http://www.novinky.cz/zahranicni/evropa/141185-britska-vlada-v-50-letech-tajila-informace-o-nebezpeci-koureni.html>>.

Bubník, J. ...[et al.]. 1998. *SYMOS '97: systém modelování stacionárních zdrojů*. Praha : ČHMÚ, 1998. ISBN: 80-85813-55-6.

California Air Resources Board. 1990. *Emission Inventory 1987*. Sacramento: Technical Support Division, Emission Inventory Branch, California Air Resources Board, 1990.

ČSN EN 7708. *Kvalita ovzduší – Definice velikostních frakcí částic pro odběr vzorků k hodnocení zdravotních rizik*. Praha : Český normalizační institut, 1998.

Day, J. A.; Schaefer, J. 1991. *Clouds and Weather*. Boston: Houghton Mifflin Company, 1991. ISBN 978-0-395-90663-7.

- Day, J. A. 2006. *The Book of Clouds*. New York: Sterling Publishing, 2006. ISBN 978-1-4027-2813-6.
- Delmas, R. ...[et al.]. 2007. *Atmosphere, océan et climat*. Paris: BELIN – CNRS Éditions, 2007. ISBN 978-2-7011-4508-2.
- Diot, É. 2006. *La météo de A à Z*. Paris : Stock, 2006. ISBN 2-234-05794-9.
- Dohányosová, P. ...[et al.]. 2007. Výkladový slovník aerosolových termínů [online]. Praha: Česká aerosolová společnost, 2007 [cit. 2009-04-01]. Dostupný z WWW: <http://cas.icpf.cas.cz/index.php?lang=cz&page=aerosols>.
- Dušek, J.; Pišala, J. 2006. *Jaderné zbraně*. Brno: Computer Press, 2006. ISBN 80-251-0817-1.
- European Agency for Safety and Health at Work. 2005. *Priorities for occupational safety*. 34 s. [online], [cit. 2006-02-14]. Dostupný z WWW: <http://osha.europa.eu/en>. ISBN 92-9191-168-2.
- Factory Mutual Engineering Corporation. 1998. *Property Loss Prevention Data Sheet 7-76: Prevention and Mitigation of Combustible Dust Explosions and Fires, Factory Mutual System*. Norwood: Factory Mutual Engineering Board, 1998.
- HINDS, W.C. 1999. *Aerosol technology: Properties, Behaviour and Measurement of Airborne Particles*. 2nd. ed. New York : John Wiley and Sons, Inc. ISBN 0-471-19410-7.
- Holoubek, I. *Chemie životního prostředí III: atmosféra 2: aerosoly* [online]. Brno : Masarykova univerzita, RECETOX [cit. 2009-06-20]. Dostupný z WWW: <http://www.recetox.muni.cz/res/file/prednasky/holoubek/chzp-iii/chzp-iii-atmosfera-02-aerosoly.pdf>.
- Holoubek, I. ...[et al.]. 2005. *Troposférická chemie*. Brno: Masarykova Univerzita, 2005. Atmosférické aerosoly, kov, s. 159. ISBN 80-210-3656-7.
- Hánová, I.; Janoušková, S. 2004. *Úvod do problematiky znečištění venkovního ovzduší*. Praha: ČHMÚ, 2004.
- JUNGWIRTH, Pavel. 2003. Aerosoly a chemie atmosféry. *Vesmír* [online], 2003, č. 4 [cit. 2009-03-24]. Dostupný z WWW: <http://www.vesmír.cz/clanek/aerosoly-a-chemie-atmosfery>. ISSN 1214-4029.
- Kolektiv autorů. 2002. *K udržitelnému rozvoji České republiky: vytváření podmínek*. Praha: Centrum Univerzity Karlovy pro otázky životního prostředí, ISBN 80-238-8378-X. [online], [cit. 2009-08-24]. Dostupný z WWW: http://www.czp.cuni.cz/knihovna/UNDP_sbornik/Prvni.pdf >
- Kořínek, K. 2007. Ochrana před výbuchy plynů, par a prachů. In *VAKinfo* [online], 2007 [cit. 2009-03-24]. Dostupný z WWW: <http://www.vakinfo.cz/vakinfo-1/technicka-zarizeni-souvisejici/korinek06>.
- Křivohlávek, J., 2008. Radioekologie: učební texty a poznámky. [interní materiál]. Brno: Masarykova univerzita.
- Majer, V. 1981. *Základy jaderné chemie*. 2. vydání. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury.
- Manahan, S. E. 2005. *Environmental Chemistry*. 8th. ed. Boca Raton: CRC Press, 2005. ISBN 1-56670-633-5.
- Mokoš, L. 2007. Základní požárně technické charakteristiky a jejich význam v technické praxi. In *BOZPinfo* [online], 03.12.2007 [cit. 2009-03-24]. Dostupný z WWW: http://www.bozpinfo.cz/utf/knihovna-bozp/citarna/tema_tydne/ptch07.tri.html.
- Mráz, Jaroslav. 2008. Nanomateriály z pohledu ochrany zdraví při práci [online]. In *Konzultační den „Aktuální otázky hygieny ovzduší“, 11.12.2008*. Praha: SZÚ, 2008 [cit. 2009-03-22]. Dostupné na www: http://www.szu.cz/uploads/documents/chzp/ovzdusi/konz_dny_a_seminare/2008/mraz_nanocastice_08.pdf.
- MUNZAR, J...[et al.]. 1989. *Malý průvodce meteorologií*. Praha: Mladá fronta, 1989.
- Ochrana ovzduší* [online]. Praha: Česká zemědělská univerzita [cit. 2009-04-01]. Dostupný z WWW: http://knc.czu.cz/~vachm/ovzdusi/ch_atmo.html.

Petrus, J. 2006. Prevence a ochrana proti výbuchu prachu. *CHEMagazín* [online], 2006, roč. XVI, č. 4, s. 29-30 [cit. 2009-03-24]. Dostupný z WWW: <http://www.chemmagazin.cz/Texty/CHXVI_4_c17.pdf>.

Podzimek, J. 1959. *Fysika oblaků a srážek*. Praha : Nakladatelství ČSAV, 1959.

Pretor-Pinney, G. 2006. *The Cloudspotter's Guide*. London: Hodder and Stroughton, 2006. ISBN 978-0-340-89590-0.

RAUPACH, M.R.; BRIGGS, P.R.; AHMAD, N.; EDGE, V.E. 2001. Endosulfan Transport: II. Modeling airborne Dispersal and Deposition by Spray and Vapor, *J. Environ. Qual.* vol. 30, pp. 729-740.

Richter, M. 2003. *Technologie ochrany životního prostředí: část II: technologie ochrany ovzduší*. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně, 2003.

SKŘEHOT, P. 2008. *Velký atlas oblaků*. 1. vyd. Brno: Computer Press, 2008. 368 s. ISBN: 978-80-251-2015-6.

SKŘEHOT, P.; JANSOVÁ, K. Priority EU ve výzkumu v oblasti BOZP a ochraně zdraví při práci s nebezpečnými chemickými látkami. *Bezpečnost a hygiena práce*, 2007, č. 12, s. 22-26.

Slezák, R.; Ryška, A.; Kosorínová, K. *Karcinogenní účinky tabákového kouře* [online]. Hradec Králové : Univerzita Karlova, Lékařská fakulta [cit. 2009-03-06]. Dostupný z WWW: <<http://www.lfhk.cuni.cz/patanat/koureni/0403.htm>>.

Šrám, R.J. Vliv znečištění ovzduší na zdraví obyvatel - PROGRAM TEPLICE [online]. Praha : SISYFOS [cit. 2009-03-06]. Dostupný z WWW: <<http://www.sysifos.cz/index.php?id=vypis&sec=1170058174>>.

Švehlák, H.; Nováková, J.; Melčáková, I. Multimediální výukový text „Ekologické aspekty technické hydrobiologie“ [online]. Ostrava : VŠB – Technická univerzita, Hornicko-geologická fakulta, Institut Enviromentálního inženýrství, 2006 [cit. 2009-04-14]. Dostupný z WWW: <http://hgf10.vsb.cz/546/Ekologicke%20aspekty/cviceni/cviceni_loticky/acidifikace.htm>.

Velký smog 1952. In *Wikipedia* [online], stránka naposledy editována 16. 4. 2009 [cit. 2009-05-23]. Dostupný z WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Velk%C3%BD_smog_\(Lond%C3%BDn_1952\)](http://cs.wikipedia.org/wiki/Velk%C3%BD_smog_(Lond%C3%BDn_1952))>.

Watson, J. G.; Chow, J. C.; Mathai, C. V. 1989. Receptor models in air resources management: a summary of APCA International Specialty Conference. *JAPCA: the Journal of the Air & Waste Management Association*, 1989, no. 39, p. 419-426.

Zhang, L.; Dao, S.; Padro, J.; Barrie, L. 2001. A Size-Segregated Dry Deposition Scheme for an Atmospheric Aerosol Module, *Atmos. Environ.* vol. 35: pp. 549-560.

Zimon, A. D. 1982. *Adhesion of Dust and Powder*. 2nd ed. New York : Consultants Bureau, 1982.