

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ**

KATEDRA TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV



**VZTAH SYSTÉMŮ VĚTRÁNÍ A KLIMATIZACE K ŠÍŘENÍ
INFEKČNÍCH NEMOCÍ**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vypracovala:

Bc. Tereza Šamsová

Vedoucí práce:

Ing. Daniel Adamovský, Ph.D.

2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Šamsová	Jméno: Tereza	Osobní číslo: 458642
Zadávající katedra: katedra technických zařízení budov		
Studijní program: Budovy a prostředí		
Studijní obor: Budovy a prostředí		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Vztah systémů větrání a klimatizace k šíření infekčních nemocí

Název diplomové práce anglicky: Relation of ventilation and air-conditioning systems to transfer of infectious diseases

Pokyny pro vypracování:

Zpracujte rešerši vystihující rizika přenosu infekčních nemocí ve vztahu k systémům větrání a klimatizace. Popište na jejím základě potenciální přenosové cesty a rizika podmíněná těmito systémy. Navrhněte provozní a návrhová opatření, která by zjištěná rizika snížila. Shrňte zjištěné poznatky a pokuste se je zobecnit.

Seznam doporučené literatury:

Yuguo Li, Julian Wei-Tze Tang, Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment - a multidisciplinary systematic review, *Indoor Air* 17(1):2-18, 2007.

R.A. Hobday, S.J. Dancer, Roles of sunlight and natural ventilation for controlling infection: historical and current perspectives, *Journal of Hospital Infection*, v. 84, i. 4, 2013.

Jméno vedoucího diplomové práce: Daniel Adamovský

Datum zadání diplomové práce: 21.9.2020 Termín odevzdání diplomové práce: 3.1.2021
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlašuji, že jsem svoji diplomovou práci vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a podkladů.

V Praze, dne 3.1. 2021

.....
podpis

PODĚKOVÁNÍ

Díky patří vedoucímu této práce, Ing. Danielovi Adamovskému, PhD. za cenné rady, komentáře i povzbuzení k další práci. Dále bych zde ráda poděkovala všem, kdo mě podporovali v mém vzdělání i při psaní této práce. Především svému muži, který byl pro mě obrovskou podporou. Děkuji také Bohu, který mě celým studiem provedl.

OBSAH

ABSTRAKT	7
I. ÚVOD	8
II. TEORETICKÁ ČÁST	9
1. Přenos infekčních chorob.....	9
A. Způsoby přenosu	9
B. Vydechované částice.....	10
C. Infekční dávka.....	11
D. Rozdíl šíření virů a bakterií	11
E. Budovy jako zdroj infekcí	12
2. Historie přístupu k šíření infekcí.....	13
3. Onemocnění šířící se vzduchem	15
A. Chřipka.....	15
B. Pravé neštovice.....	15
C. SARS.....	16
D. Hantavirus.....	18
E. Norovirus	18
F. Nachlazení.....	18
G. Tuberkulóza.....	19
H. Meticilin rezistentní zlatý stafylokok (MRSA)	20
I. Spalničky.....	20
J. COVID-19.....	21
K. MERS.....	24
L. Antrax.....	24
M. Legionelóza.....	25
4. Vliv větrání na přenos infekcí v budovách.....	25
A. Vliv proudění vzduchu	25
B. Vliv intenzity větrání.....	27
C. Vliv teploty a vlhkosti vzduchu.....	28
D. Tlaková diference	30

5. Výhody a rizika jednotlivých druhů větrání.....	31
A. Přirozené větrání.....	31
B. Mechanické větrání.....	32
III. PRAKTICKÁ OPATŘENÍ PRO ZAMEZENÍ ŠÍŘENÍ INFEKČÍ V BUDOVÁCH	35
1. Poloha zdroje infekce.....	35
A. Zdroj vně budovy.....	35
B. Člověk jako zdroj.....	35
C. Zdroj uvnitř budovy	36
2. Nezdravotnické budovy.....	36
A. Návrhová opatření.....	36
B. Provozní opatření.....	40
C. Větrání obytných budov.....	41
D. Příklad – větrání třídy.....	43
3. Zdravotnické stavby	45
A. Návrhová opatření.....	45
B. Provozní opatření.....	47
C. Příklad – izolační box.....	48
4. Shrnutí opatření proti šíření nemoci Covid-19.....	50
IV. ZÁVĚR	51
SEZNAM LITERATURY	52
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	61
SEZNAM TABULEK.....	62

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá vztahem systémů větrání a klimatizace k šíření infekčních chorob. Cílem bylo zjistit, jak konkrétní parametry vnitřního prostředí ovlivňují přenos infekcí v prostoru. Byla provedena rešerše aktuálně dostupných zdrojů z celého světa, které se tímto tématem zabývají. Snahou bylo zmapovat možné přenosové cesty infekcí ve vztahu k větrání. V práci je rozebráno několik případů rozšíření nálezů v objektech s vazbou na vzduchotechniku a klimatizaci. Ze získaných informací byly zformulovány závěry v podobě praktických opatření, která lze pro omezení šíření infekcí zavést. Jsou to opatření návrhová i provozní pro různé druhy prostorů. Jako nejdůležitější opatření se ukázalo zvýšení intenzity větrání. V závěru práce je na dvou příkladech ilustrován přístup k návrhu větrání pro omezení šíření infekcí. Potvrdilo se, že systémy vzduchotechniky a klimatizace mohou ovlivnit šíření chorob aerosolem.

Klíčová slova: šíření infekcí, větrání, klimatizace, vzduchotechnika, aerosol, viry, bakterie, nemoc, opatření, Covid-19, intenzita větrání

ABSTRACT

This thesis focuses on the relation of ventilation and air-conditioning systems to the transmission of infectious diseases. The goal was to find out how indoor conditions influence infection spread in the room. The research of currently accessible sources from all over the world, that deal with this topic was performed. The effort was made to survey possible ways of infection transmission in relation to ventilation. Few cases of infection spreading in buildings linked with air-conditioning were examined in this thesis. Conclusions from gained information were formulated in form of practical measures that can be applied to prevent the infection spread. Those are design and operational measures for diverse kinds of spaces. Increasing the ventilation rate was found out as the most important measure. There are two examples of approaches to the design of the ventilation in order to prevent infection spreading in the end of the thesis. It was confirmed that the air-conditioning systems may influence infection transmission by aerosols.

Keywords: infection spread, ventilation, air-conditioning, aerosol, virus, bacteria, disease, measures, Covid-19, ventilation rate

I. ÚVOD

Tato práce zkoumá rizika přenosu nemocí ve vztahu k systémům vzduchotechniky a klimatizace. Jejím cílem je podat ucelený pohled na tuto problematiku na základě aktuálně dostupných vědeckých poznatků a zkušeností. Vzhledem k probíhající epidemii onemocnění Covid-19 je toto téma velmi aktuální, zároveň je ale třeba zabývat se jím obecně. K šíření nemocí v budovách dochází hojně a v posledních letech jsme toho stále svědky, jak potvrdila i provedená rešerše literatury. Větrání má zásadní vliv na šíření nemocí aerosolem, proto je zde na tento způsob přenosu a nemoci, které se takto šíří kladen důraz.

Práce obsahuje teoretickou a praktickou část. V teoretické je shrnutí dostupné literatury, jsou v ní popsány studie provedené po celém světě dokumentující přenos infekcí. V druhé části jsou tyto poznatky prakticky využity v návrhu vhodných opatření, které lze v budovách provést, aby bylo zabráněno šíření infekcí. K tomu jsou využity i pokyny různých organizací, zabývajících se technickými zařízeními budov a lidským zdravím.

II. TEORETICKÁ ČÁST

1. Přenos infekčních chorob

A. Způsoby přenosu

Jedná se o cestu, kterou se jedinec vnímavý nakazí od infekčního. Způsobů přenosu infekčních chorob je několik a v praxi je často obtížné zjistit, jakým se pacient nakazil. Velmi záleží i na druhu patogenu. Základní rozdělení je na přímé a nepřímé cesty. (1), (2)

Přímé – dochází ke kontaktu s nakaženým jedincem. (1)

- Přenos kapénkami – kapénky se uvolňují mluvením, kašláním ale i pouhým dýcháním, u nakaženého jedince obsahují viry nebo bakterie. Kapénky jsou částice $> 60 \mu\text{m}$ (3), které se šíří pouze na krátkou vzdálenost, zhruba 1,5 m. Uvedená velikost se ale v různých zdrojích liší, někde je uváděna velikost $> 100 \mu\text{m}$. (4) Vzdálenost závisí na proudění vzduchu, na vlhkosti okolního vzduchu a na rychlosti částic. Rychlost a tím i vzdálenost se velmi zvyšuje například při kašli nebo kýchání. Kapénky této velikosti rychle klesají k zemi a usazují se na vodorovných površích, nesetrvávají ve vzduchu dostatečně dlouhou dobu, aby se mohly odpařit na velikost kapénkového jádra. Po usazení se stávají součástí prachu a mohou být spolu s ním znovu rozvířeny do vzduchu. Tento druh přenosu je typický pro respirační onemocnění. (2)
- Přenos kontaktem – přímým dotekem s nakaženým jedincem, může se jednat o podání ruky, líbání, pohlavní styk a další kontakty. Tímto způsobem se mohou přenášet nákazy i ze zvířat na člověka, například při pokousání.

Nepřímé – způsoby, u kterých je mezi nakaženým jedincem a vnímavým jedincem mezičlánek. (1)

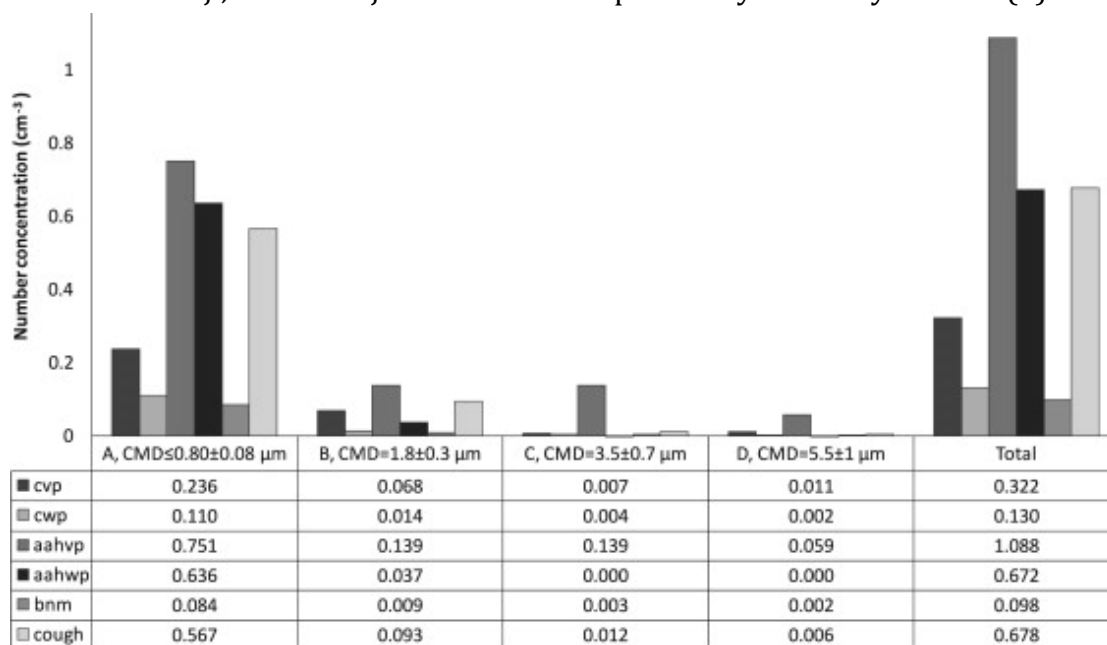
- Nepřímý kontakt – přenos prostřednictvím infikovaného předmětu, například frekventované plochy, jako jsou kliky dveří, madla v dopravních prostředcích, nákupní vozíky apod. Předměty mohou být infikovány i usazenými kapénkami.
- Vzdušný přenos – kapénky, které jsou v průměru $< 60 \mu\text{m}$ (respektive $< 100 \mu\text{m}$) se rychle vypařují, ztrácí svoji velikost a vznikají kapénková jádra (droplet nuclei) o velikosti $< 5 \mu\text{m}$. (5) Jsou obvykle tvořena chloridem sodným. (6) Například vypaření kapénky o velikosti $50 \mu\text{m}$ při relativní vlhkosti vzduchu 50 % trvá 3 sekundy. (7) Rychlost usazování takových částic je velmi malá, částici o velikosti $5 \mu\text{m}$ trvá 33 minut, než klesne o 1,5 m níže. (3) Mohou být přenášeny vzduchem na dlouhé vzdálenosti, po dlouhou

dobu. Jejich nebezpečím je také schopnost dostat se hlouběji do plic než větší kapénky a způsobovat infekce, které jsou pro člověka rizikovější. (8) Tímto způsobem se šíří různé druhy nález.

- Přenos pomocí infikovaného nástroje (při operacích, pomocí injekční stříkačky apod.), případně transfuzí krve nebo krevní plazmy.
- Přenos přes zažívací trakt – z potravin, vody.
- Pomocí přenašeče – jiného organismu.

B. Vydechované částice

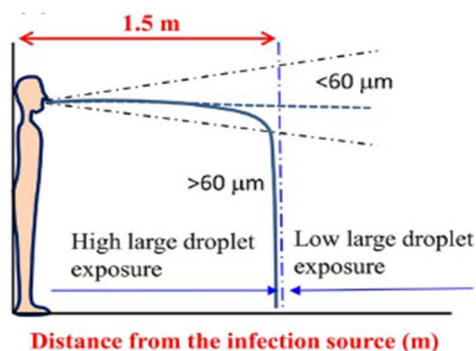
Tato práce se zabývá přenosem nákazy pomocí kapének na krátkou vzdálenost a zejména přenosem pomocí aerosolu. Člověk při dýchání, mluvení, kašláním a dalších činnostech produkuje částice o velikostech 0,01–500 μm . (8) Jedna studie zjistila, že až 90 % všech částic je < 1 μm . (9) Jejich množství i velikost závisí na konkrétní činnosti, podrobněji je to znázorněno na obrázku 1. Množství částic závisí i na tom, zda je člověk nemocný, při respiračním onemocnění je produkováno více částic. (7) Koncentrace částic ve vydechovaném vzduchu je při dýchání 0,1 cm^{-3} , při trvalém mluvení je 1,1 cm^{-3} . Dále je vidět, že nejvyšší koncentrace částic je při vyluzování znělého zvuku „aah“, nikoli při kašli. (9) Také běžné mluvení může být závažnějším zdrojem částic, protože probíhá delší dobu než kašel. Výsledky studií se v tomto ale často rozcházejí, důvodem jsou různé okolní podmínky a metody měření. (7)



Obrázek 1 – Koncentrace aerosolu ve vydechovaném vzduchu při různých aktivitách, dle velikosti částic (9)

- *cvp* – hlasité počítání
- *cwp* – počítání šeptem
- *aahvp* – nemodulované znělé „aah“
- *aahwp* – nemodulované „aah“ šeptem
- *bnm* – dýchání, nádech nosem, výdech ústy
- *cough* - kašel

Trajektorie částic v závislosti na velikosti je zobrazená na obrázku 2. Velikost částic závisí i na vlhkosti vzduchu a rychlosti jejich vypařování, zde je uvedena mezní hodnota $60 \mu\text{m}$. (10) Větší kapénky klesají k zemi a usadí se do vzdálenosti 1,5 m od zdroje, menší jsou dále unášeny vzduchem. Množství patogenů, které nesou závisí i na tom, zda jsou uvolňovány v místě infekce či nikoliv. (8)



Obrázek 2 – Trajektorie vydechaných částic (10)

C. Infekční dávka

Infekční dávka je množství organismů, které je potřeba, aby vyvolalo infekci u náchylného jedince. Značně se u různých patogenů liší. U některých druhů velmi odolných bakterií stačí jeden organismus, aby způsobil nemoc. Je tomu tak například u bakterie tuberkulózy, naopak 10-100 organismů je potřeba k propuknutí nemoci spalniček. (4) Znalost infekční dávky může být důležitá při návrhu efektivního větrání. Pokud je známa infekční dávka a zároveň jaké množství nežádoucích patogenů produkují zdroje, je možné stanovit intenzitu větrání. Infekční dávka se ale může pro každého jedince lišit. (4)

D. Rozdíl šíření virů a bakterií

Většina virů je mnohem menších než bakterie. Virus chřipky má kolem 100 nm (11) a může tedy být několikanásobně menší než vydechané částice. Jejich šíření je možné i prostřednictvím velmi malých částic. Mohou se tak snadněji a ve větším množství dostat k hostiteli. Virus není sám o sobě schopen přežít a nemůže se rozmnožovat. Většina virů přežije na suchém povrchu maximálně několik dní, někdy jen pár hodin. Výjimky mohou přežít i 3 měsíce. (8), (12), (13)

Bakterie jsou již samostatné buňky a mají obvykle větší rozměry než viry. Jejich velikosti se ale velmi liší. Pokud je jejich velikost v řádu mikrometrů, mohou se šířit vzduchem pouze na větších kapénkách a pravděpodobnost, že zasáhnou hostitele v dostatečném množství může být nižší. Na suchém povrchu přežívají obvykle dny, některé druhy ale i měsíce či roky. Velmi záleží na okolních podmínkách. (8), (13), (14)

E. Budovy jako zdroj infekcí

Zdroje nežádoucích znečišťujících látek v budovách mohou být různé, dostávají se do budovy zvenčí nebo vznikají uvnitř. Jedná se o různé chemické látky a také o mikroorganismy, kterými se tato práce zabývá podrobněji. Infekce získané v budovách jsou zásadní příčinou nemocí a úmrtí na celém světě. (2) To samozřejmě souvisí s tím, že v budovách trávíme až 90 % času. Prostředí v nich je proto pro lidské zdraví velmi důležité. (15)

Mikroorganismy se v budovách mohou množit tam, kde je dostatek vlhkosti, tedy v potrubích, zvlhčovačích nebo na místech, kam voda zatekla vadou konstrukce. Jejich zdrojem jsou i výměšky živočichů. Další patogeny přináší do budov sám člověk. Pokud je nakažený, šíří velké množství virů a bakterií pomocí kapének, které jsou nesený vzduchem nebo ulpívají na okolních předmětech. Dalšími nepříznivými faktory šíření nákaz v budovách je nedostatečné větrání, nedostatek slunečního světla, velká obsazenost budov, celkově nezdravé prostředí – hluk, stres atd. (15)

S nezdravým prostředím v budovách souvisí dva pojmy: (15)

- **Syndrom nemocných budov** (Sick building syndrome). Jedná se o příznaky, které jsou spojené s pobytem v budově, ale nejsou spojené s konkrétní příčinou. Obvykle po opuštění budovy odezní. Mezi tyto příznaky patří bolest hlavy, závrať, podráždění sliznic, suchý kašel, nevolnost, suchá kůže, alergie, vyšší riziko astmatu, poruchy soustředění atd.
- **Syndrom nemocí z budov** (Building related illness). Zde jsou příznaky spojené s konkrétní příčinou. Mohou trvat delší dobu, nezmizí s opuštěním budovy. Patří mezi ně kašel, bolest na hrudi, mělké dýchání, bušení srdce, otoky, krvácení z nosu, rakovina, problémy s těhotenstvím, potraty atd. Příkladem konkrétní příčiny je obsah velkého množství mikroorganismů ve vodních kapkách z nevhodného zvlhčovače, které po vdechnutí způsobují infekce a astma.

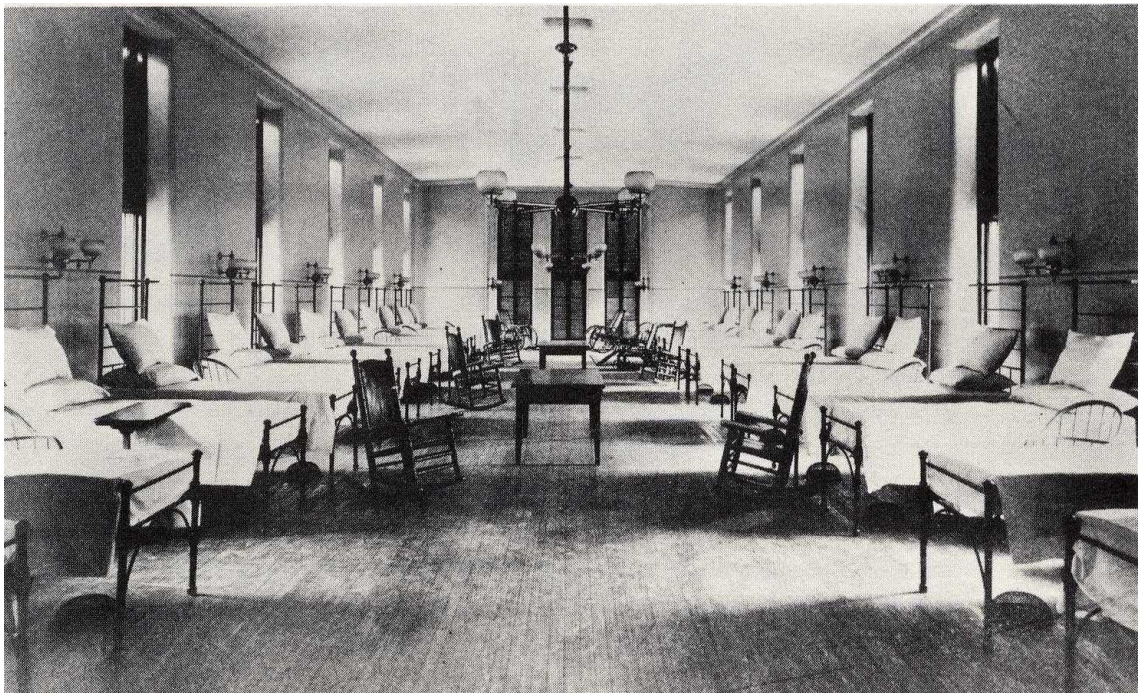
Oba syndromy ohrožují zdraví lidí, kteří budovy obývají a tím i jejich produktivitu. Budovy, ve kterých tyto problémy vznikají jsou spojené s vyšším rizikem přenosu infekcí, a to i v případě, kdy zdroj infekce není přímo spojen s budovou. Je to jednak z důvodu vyšší citlivosti jedinců, které tyto budovy obývají, jednak vlivem podmínek, které jsou příznivé pro přenos infekcí.

Samostatným problémem je vznik tzv. nozokomiálních nákaz v nemocnicích. Jejich nebezpečím je to, že jsou často způsobeny bakteriemi odolnými vůči antibiotické léčbě. Jsou velmi rozšířené, nakazí se jimi až 15 % pacientů v nemocnici. (16) Na jednotkách intenzivní péče může být zasaženo až 51 % pacientů. (17) Dochází tím

k zatěžování zdravotnického systému a také ke zvýšení nákladů na zdravotní péči. Většina těchto nemocí se šíří přímým kontaktem, jsou ale i důkazy přenosu vzduchem. Byly spočteno, že se jedná až o 10 % nozokomiálních nákaz. (18) Jednou z odolných bakterií je meticilin-rezistentní zlatý stafylokok (MRSA), který může být přenášen i vzdušnou cestou. Běžně se vyskytuje na pokožce a sliznicích u přibližně třetiny populace. Může ale proniknout do těla a způsobovat závažné infekce, zvláště u oslabených pacientů, kteří mají nezhojené rány, popáleniny, žilní vstupy apod. Podrobnější informace o této nákaze jsou v kapitole 3. (19), (20) Mezi nejčastější nozokomiální nákazy patří infekce močových cest, infekce v místě chirurgického výkonu a pneumonie. Pneumonie se projeví až u 2/3 pacientů na jednotkách intenzivní péče, čtvrtina z nich onemocnění bohužel podlehnou, rizikovým faktorem je celkové oslabení pacienta nebo použití plicního ventilátoru. (21)

2. Historie přístupu k šíření infekcí

Pro ilustraci vývoje přístupu k šíření infekcí je zajímavé podívat se na historii návrhu nemocnic. V roce 1864 John Simon, britský lékař, zdůraznil důležitost přirozeného větrání v nemocnicích. Navrhoval používání obdélníkových oddělení s okny po dvou stranách, přes celou světlou výšku místnosti. Mezi dvěma okny bylo dostatečné místo pro postel. Příklad takového oddělení je na obrázku 3. (22) Bylo tak zajištěno intenzivní větrání a zároveň i přístup slunečního světla, které má prokazatelné bakteriocidní účinky. (2)



Obrázek 3 – Příklad historického nemocničního oddělení (22)

V té době se věřilo, že se člověk může nakazit nemocí dýcháním „špatného“ vzduchu a mnoho lidí bylo posedlých větráním svých domovů. Ve dvacátých letech 20. století se myšlení začalo měnit, za příčinu šíření infekcí byl považován hlavně kontakt, případně kapénky přenášené na krátkou vzdálenost. Nadále se však v nemocnicích používalo příčné provětrávání. (2)

Zvyšováním životních úrovně spolu s účinnými opatřeními proti infekčním chorobám, se podařilo výskyt některých nemocí, například tuberkulózy a neštovic, eliminovat. Vynález očkování zamezil šíření mnoha nemocí, na které dříve umírali tisíce lidí, některé nemoci byly dokonce téměř vymýceny. Antibiotika zase umožnila účinnou léčbu bakteriálních infekcí, proti kterým jsme dříve byli bezbranní. To ovšem způsobilo, že se přestal klást důraz na důležitost větrání při prevenci šíření chorob. (2)

Nově se navrhování budov zaměřilo na hlavně uživatelský komfort. Bylo tomu tak až do roku 1973, kdy země těžící ropu vyhlásili ropné embargo. Kvůli této krizi se pozornost musela obrátit na úsporu energií. Začal se v mnohem vyšší míře používat recirkulovaný vzduch, snižovala se intenzita větrání. Tyto změny v přístupu vedly ke vzniku syndromu nemocných budov, přestože sama snaha o snížení spotřeby energie je správná a velmi důležitá. (2)

Velký vliv na šíření chorob má i hustota osídlení a kvalita bydlení. Od poloviny 19. století došlo v Británii k významnému poklesu výskytu tuberkulózy. Jedním z faktorů, které na to měly vliv, bylo právě zlepšení úrovně bydlení, především snížení hustoty zalidnění. Tento jev je viditelný i u epidemií nemocí z posledních let. Například onemocnění SARS se velmi rychle rozšířilo v hustě osídleném Hong Kongu a odtud poté do celého světa. Právě případy epidemií virových onemocnění z posledních let, znovu narůstající případy tuberkulózy i možnost použití některých nákaz jako biologické zbraně, nám připomínají, že jsou tyto hrozby reálné a je třeba se věnovat preventivním opatřením a výzkumu v této oblasti. (2), (4)

Náhlá rozšíření různých chorob v budovách, například *Legionella pneumophila*, která se šířila pomocí vodního zvlhčování nebo viru SARS, ukázala na důležitost kontroly a správného návrhu větrání a klimatizace. Šíření infekcí vzduchem se intenzivně zabýváme například na operačních sálech a v jiných čistých prostorech. V ostatních částech nemocnice a v jiných budovách je ale podceňovanou skutečností a větrání je často nedostatečné.

3. Onemocnění šířící se vzduchem

Tato kapitola rozebírá vybraná onemocnění, která jsou typická šířením vzduchem, nebo u kterých je pro tento přenos podezření. U většiny z nich jsou uvedeny konkrétní případy rozšíření nákazy, kde je aerosol pravděpodobnou příčinou přenosu.

A. Chřipka

Chřipka je stále zásadní hrozbou pro lidské zdraví. Vyznačuje se pravidelnými každoročními epidemiemi. Ročně na ní zemře přes milion lidí. (23) V posledních 300 letech došlo k deseti rozsáhlým pandemiím chřipky. Španělská chřipka v letech 1918–1919 zabila 50–100 milionů lidí. Další pandemie jsou zřejmě nevyhnutelné. (23)

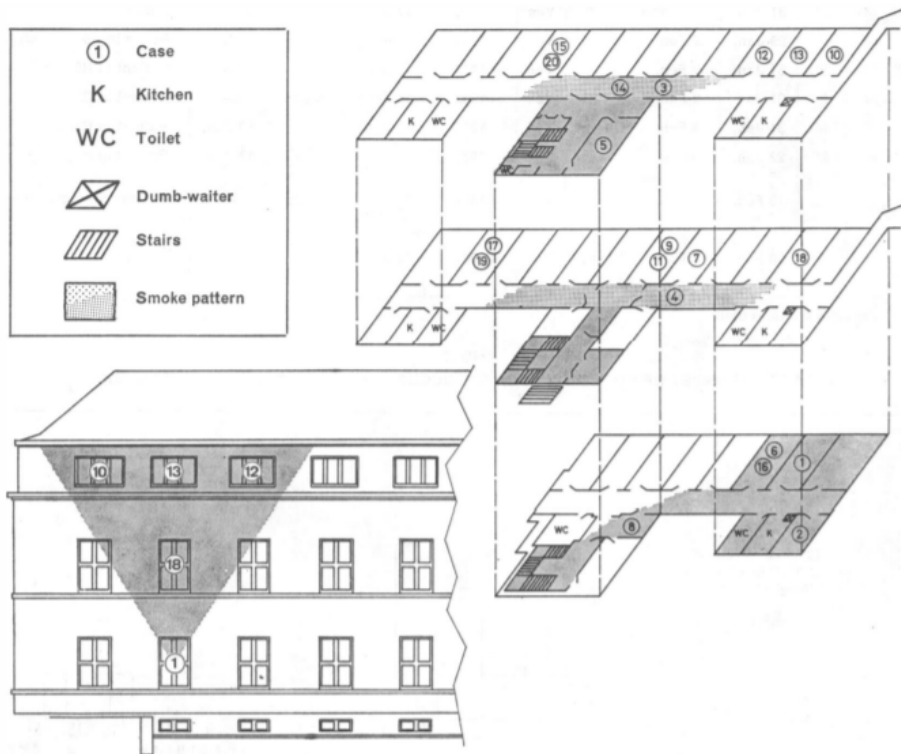
Je otázka, jakým způsobem se chřipka šíří nejvíce. Zřejmě velmi záleží na konkrétním kmenu chřipky i na okolních podmínkách. Možné je šíření chřipky doteky, kapénkami na krátké vzdálenosti i vzduchem na větší vzdálenost. Šíření vzduchem se potvrdilo případem rozšíření nákazy na palubě letadla. Letadlo s 54 lidmi na palubě bylo o 3 hodiny opožděno a nevzlétlo. Během této doby většina pasažérů zůstalo na palubě, během 3 následujících dnů se u 72 % z nich objevily příznaky chřipky. Všichni se nakazili od nemocného spolupasažéra. Během doby, kdy letadlo stálo na zemi, nebylo spuštěno větrání. Tento případ ukazuje nejen na reálnost šíření chřipky na aerosolových částicích, ale také na důležitost větrání jako prevence šíření infekcí. (23), (24), (25)

B. Pravé neštovice

Velmi nebezpečné onemocnění, které je vysoce nakažlivé. Zemře na ně zhruba 30 % nakažených. V roce 1967 WHO přišla s plánem vymýcení neštovic, pomocí proočkování populace. Přes komplikace byl nakonec úspěšný. (26)

Neštovice byly původně považovány za onemocnění šířené vzduchem, později WHO považovala za hlavní cestu přenosu přímý kontakt. Příklad v německé nemocnici v roce 1970 však poukázal, že šíření aerosolem je za určitých podmínek možné. Pacient nakažený neštovicemi byl hospitalizován a umístěn na infekční oddělení, do izolace. Ta se nacházela v přízemí budovy se třemi poschodími. V budově došlo k nakažení dalších 19 osob. Vzhledem k tomu, že pacient byl od začátku v izolaci, bylo pravděpodobné, že k šíření infekce došlo pomocí aerosolových částic. Tuto hypotézu podpořily kouřové zkoušky, které byly v budově provedeny. Příklad se stal v chladném období, kdy byly místnosti byly vytápěny tělesy a větrány nad nimi otevřenými okny. Kouřová zkouška ukázala, že vzduch se od prvního pacienta v přízemí šířil prostorem schodiště, které fungovalo jako komín. Bylo rovněž

zjištěno, že vlivem konvektivního proudu, který vznikal na otopnými tělesy se infekční vzduch mohl šířit od prvního pacienta oknem ven, podél povrchu fasády a otevřenými okny do dalších pokojů ve vyšších patrech. Tomu odpovídal i výskyt nemoci po budově. (27)

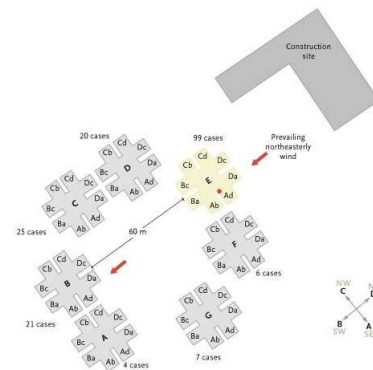


Obrázek 4 – Šíření neštovic v nemocnici v Německu, první pacient je označen číslem 1 (27)

C. SARS

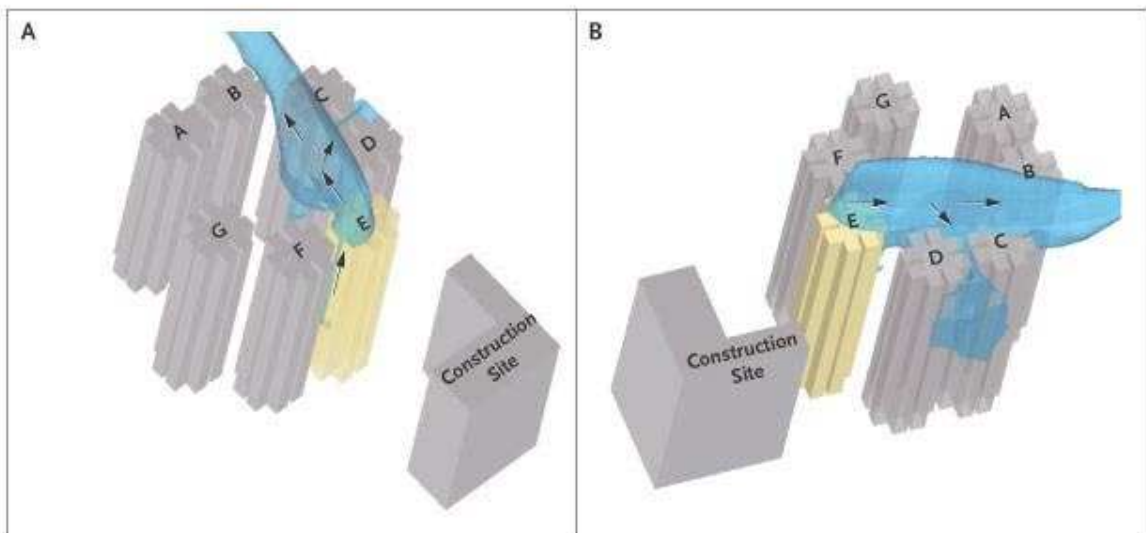
SARS neboli těžký akutní respirační syndrom je onemocnění způsobené virem SARS-CoV. Epidemie propukla v roce 2003. (2)

Jako hlavní cestou přenosu tohoto onemocnění byl označen přímý kontakt. Virus dokáže přežít na površích uvnitř budov po dlouhou dobu. (2) Nicméně byly provedeny studie, které naznačily, že přenos vzduchem je velmi reálný. Jedna z provedených studií (28) se týká rozšíření infekce v obytném komplexu Amoy Gardens v Hong Kongu. Bylo zde nakaženo přes 300 obyvatel. Komplex se skládá ze 7 budov, každá má více než 30 podlaží. Téměř polovina případů z těch, které byly dostatečně podloženy (187 případů z celkových 321), se objevila v budově E. Dále se větší množství případů objevilo v budovách B, C a D. První pacient trpěl průjmem a v budově E v části Ad použil toaletu. (28)



Obrázek 5 – Obytný komplex Amoy Gardens v Hong Kongu (28)

Objevilo se několik hypotéz šíření nákazy. Jedna z nich považovala šíření kontaktem a užívání společných prostor za hlavní způsob přenosu. Zajímavé je, že nikdo z pracovníků recepcí ani nákupního centra, které se nachází ve spodních podlažích nebyl virem zasažen, přestože byli vystaveni intenzivnímu kontaktu s obyvateli. Podle WHO byly problémem vyschlé odtoky v podlaze, ze kterých mohl odtahový ventilátor v koupelnách nasát drobné částice infekčního aerosolu. Tato hypotéza může vysvětlit výskyt onemocnění v budově E, nikoli však jeho rozšíření do dalších objektů. Zajímavý závěr přinesla studie, která využila CFD simulací proudění vzduchu uvnitř i okolo budov. Po provedení simulací bylo zjištěno, že vzduch proudil ven z toalety, kterou použil první pacient a dále prostorem mezi částmi budovy Ad a Ab. Když vzduch dosáhl vrcholu budovy byl unášen větrem směrem k budovám B, C a D. Vyšší riziko nákazy vykazovala střední podlaží a poté ta nejvyšší. Byla to tedy místa, která byla nejvíce zasažena infekčním proudem vzduchu. Výsledky simulace jsou znázorněny na obrázku 6. (28)



Obrázek 6 – Simulace proudění vzduchu při vypuknutí SARS v Amoy Gardens v Hong Kongu (28)

Teorie rozšíření infekce ze stolice nebo moči podporuje objev, že se v nich nachází mnohem vyšší koncentrace infekčních částic, než se šíří z dýchacích cest. Při spláchnutí toalety může dojít k jejich rozptýlení do ovzduší. V popisovaném případě mohly být částice dále zpětně nasávány odtahovým ventilátorem z kanalizace přes vyschlý odtok v podlaze. (28)

Na možnost šíření nákazy aerosolem ukazují i další případy. Jedním z nich je rozšíření nákazy na palubě letadla. Vzhledem k prostorovému rozložení nákazy nemohlo jít pouze o přenos kapénkami na krátkou vzdálenost, ale roli zde hrál i přenos vzduchem. (4) Dalším příkladem je rozšíření nákazy v nemocnici v Hong Kongu, kde bylo nakaženo 138 osob, přičemž značná část z nich neměla s prvním pacientem žádný přímý kontakt. Oddělení, na kterém byl první pacient hospitalizován mělo centrální systém větrání a byla rozdělena na 5 částí. Hlavní

jednotka vzduch předchladila a poté byl distribuován do jednotlivých fan-coil jednotek, kde docházelo ke směšování a dochlazení vzduchu. Přírodní vzduch byl ze 70 % recirkulovaný. Přívod čerstvého vzduchu byl cca 25 m³/h na jednoho pacienta. Odvod vzduchu byl zajištěn pomocí mřížek v podhledu přímo na oddělení a na toaletách pomocí ventilátorů. Bylo zjištěno že množství přiváděného a odváděného vzduchu v jednotlivých částech nebylo vyváжено. Část, ve které ležel nakažený měla nejnižší množství odváděného vzduchu a zároveň nejvyšší množství přiváděného vzduchu. Byla tedy v přetlaku vůči okolí, čímž bylo šíření infekčních částic velmi podpořeno. (29)

D. Hantavirus

Virus, o kterém je známo, že je přenášen aerosolem. Onemocnění přenáší drobní hlodavci a člověk se obvykle nakazí vdechnutím rozprášených částic trusu těchto hlodavců. Hantavirů je několik druhů a liší se závažností onemocnění, které vyvolávají. (2), (30)

E. Norovirus

Virus, který je v rozvinutém světě běžným původcem onemocnění nazývané „střevní chřipka“. Přenáší se povrchy, potravou a také aerosolem. Poslední jmenovaný přenos není příliš zmapovaný, ale je velmi pravděpodobný. Ve studii zabývající se touto nákazou v nemocnicích bylo zjištěno, že 18,5 % nákaz bylo způsobeno přímým kontaktem s nakaženým, dalších 3,7 % bylo z potravy a zbylých 77,8 % nebylo zjištěno. (31) Je možné že příčinou nákazy poslední skupiny případů byl právě aerosolový přenos. Nemocný trpí průjmem a zvrací, při čemž může být do vzduchu uvolňováno velké množství infekčního aerosolu. Pro představu v 1 ml zvratek může být 10⁷ virových částic, ve fekáliích až 10¹². (32) Při spláchnutí toalety jsou tyto částice uvolňovány do ovzduší. (2), (31)

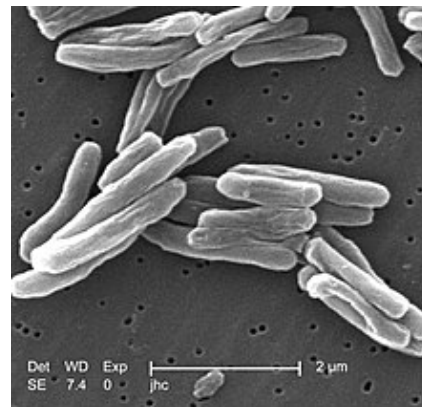
F. Nachlazení

Běžné onemocnění horních cest dýchacích, které člověk prodělá průměrně 2–5x ročně. Nejčastějším původcem onemocnění jsou rhinoviry. V otázce šíření těchto virů jsou i přes roky výzkumu stále nejasnosti. Studie provedená v Číně na studentských kolejích ukázala, mimo jiné, že větrání snižuje pravděpodobnost nachlazení. (33) Pokud bylo množství přiváděného čerstvého vzduchu pouze 3,6 m³/h/osobu, mělo až 35 % studentů nachlazení více než 6x ročně. Pokud bylo množství vzduchu zvýšeno na 18 m³/h/osobu, bylo to pouze 5 % studentů. Rovněž se ukázalo, že častěji nemocní jsou studenti, kteří bydlí na pokojích po 6 než ti ubytovaní na pokojích po 3. Tato i jiné studie ukazují na důležitost dostatečného větrání v místech větší koncentrace osob. V kancelářských budovách se může

dobrym větráním reálně snížit nemocnost pracovníků a zvýšit jejich výkonnost. Důležité téma je to i pro budovy škol. (2), (33)

G. Tuberkulóza

Odhaduje se, že zhruba třetina světové populace je nakažená bakterií tuberkulózy, především v rozvojových zemích. (34) Většina případů je bezpříznaková. Vývoj, který přístup k této nemoci v západních zemích zaznamenal v posledních 100 letech dobře ilustruje případ z USA. (35) Tuberkulóza byla závažnou hrozbou. Ve 40. letech 20. století byly založeny programy zaměřené na léčbu a prevenci nemoci. V 60.-70. letech díky tomu došlo k významnému snížení výskytu



Obrázek 7 – Bakterie tuberkulózy (34)

tuberkulózy. Do prevence a léčby se investovaly nemalé prostředky. Se snížením výskytu, ale přestalo být onemocnění tak palčivým problémem. V 80. letech tak došlo v opětovném nárůstu výskytu tuberkulózy. Jedním z faktorů byla epidemie viru HIV. Rozšíření nákazy bylo mezi lidmi bez domova, ve vězeních a u seniorů. Nákazu často způsobovaly multirezistentní kmeny bakterie a z onemocnění se opět stala hrozba pro veřejné zdraví. (34), (35)

Tuberkulóza se šíří převážně uvnitř, na částicích aerosolu, proto je nejvyšší riziko nákazy v přelidněných a špatně větraných místech. Zlepšením kvality bydlení se výskyt tuberkulózy snižuje. Častá místa nákazy jsou léčebny dlouhodobě nemocných, zařízení pro bezdomovce nebo věznice. Riziko nákazy aerosolem ukázala studie, kde se králíci, kteří vdechli 2–3 bakterie na malých částicích nakazili častěji králíci, kteří vdechli 10 000 bakterií na větších kapénkách. (36) Zřejmě je to způsobeno průnikem malých částic hluboko do plic. Dále bylo zjištěno, že stačí inhalace jedné bakterie do plic, aby došlo k rozvinutí onemocnění. Další studie, z roku 1959 (37), potvrdila, že vzduch z oddělení pacientů s tuberkulózou je velmi infekční a obsahuje drobné částice s živými bakteriemi. Morčata, ke kterým byl tento vzduch potrubím přiváděn se nakazila tuberkulózou. (2), (4), (35)

Z těchto poznatků plyne, že velké riziko nákazy tuberkulózou je především u zdravotnického personálu, který se o pacienty stará a dále v místech vysoké koncentrace lidí. Nemoc se šíří převážně na rozptýlených částicích aerosolu, proto zde hraje větrání opravdu významnou roli. Neméně důležité je i denní světlo, které bakterie hubí. Dezinfekce vzduchu je možná i pomocí umělého UV záření. (35)

H. Meticilin rezistentní zlatý stafylokok (MRSA)

Jsou to bakterie odolné vůči antibiotikům, které ohrožují především pacienty v nemocnicích. Zlatý stafylokok se běžně nachází na pokožce a sliznicích zhruba u třetiny populace. Nebezpečný je v případě, že pronikne do těla. Může způsobovat různé záněty kůže a vnitřních orgánů, které mohou vést až k sepsi. Velmi ohrožení jsou pacienti, kteří jsou oslabení a mají narušené tělní bariéry, zejména pacienti s popáleninami. V nemocnicích je proto třeba dbát na hygienické zásady, aby se nákaza nepřenesla z jednoho pacienta na druhého. Může se ale nacházet i v domácnostech. (2), (20)

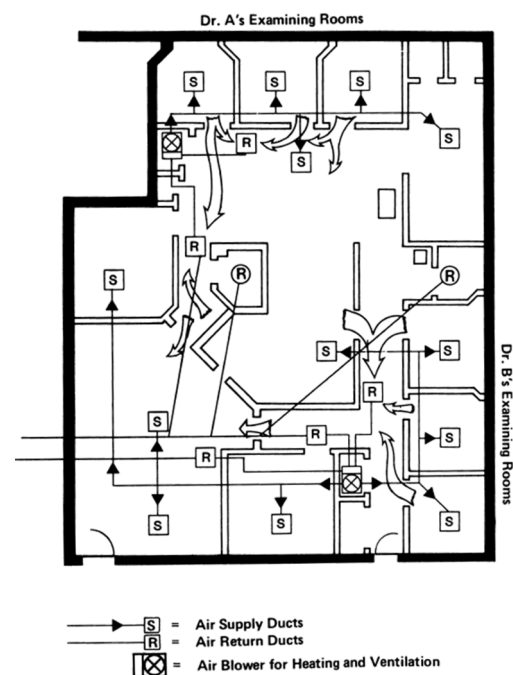
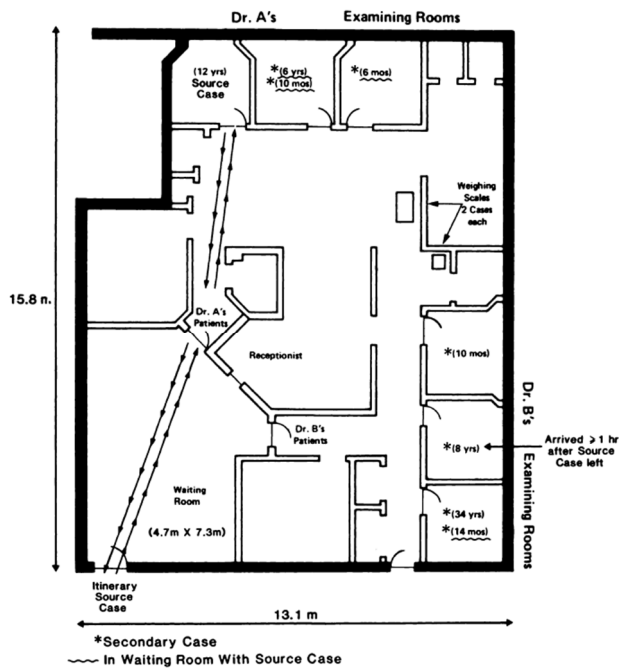
Přestože přenos kontaktem je v případě této bakterie hlavní, nelze vyloučit ani přenos vzduchem. Z kůže člověka se uvolňuje kolem 10^6 částic denně (38), ty mohou snadno přenášet bakterie. Další šíření bakterií může nastat, pokud je přenašeč stafylokoků nachlazený a produkuje infekční částičky například kašlem. Bylo zjištěno, že usazené aerosolové částice jsou rozprostřeny po celém prostoru nemocničního pokoje, bez zjevné závislosti na vzdálenosti od zdroje. (38) Bakterie na těchto částicích byly kultivovatelné, a tedy schopné způsobit nákazu. Usazené infekční částice mohou být přeneseny kontaktem s plochami na dalšího jedince. V tomto případě může přenosu zabránit nejen úklid, ale také dostatečné větrání. Přestože zatím nebylo zjištěno, jak působí nákaza zlatým stafylokokem na člověka, pokud bakterii vdechne na malé částici aerosolu, je pravděpodobné, že je takového šíření schopen. (2), (38)

I. Spalničky

Virové onemocnění, které se projevuje vyrážkou, kašlem a horečkou. Celosvětově je toto onemocnění jednou z nejčastějších příčin úmrtí dětí do 5 let, problém je to hlavně v zemích se špatnou infrastrukturou, kde není zavedeno očkování. Vzhledem ke klesající proočkovanosti i v České republice, se toto onemocnění vrací. (39)

Nemoc je považována za šířící se vzduchem, kapénkami i aerosolem. Aerosolový přenos dokládá studie, zabývající se případem nákazy pacientů v ordinaci dětského lékaře. (40) Prvním nakaženým byl 12-letý chlapec, přestože byl očkovaný. Při návštěvě lékaře intenzivně kašlal. Přes čekárnu byl odveden do místnosti pro individuální vyšetření, kde strávil zhruba hodinu. Poté již místnost ten den nikdo nepoužíval. Nakazilo se dalších 7 pacientů, z nichž pouze 4 byli s prvním nakaženým někdy ve stejné místnosti a pouze jeden s ním měl kontakt bližší než 1 m.

Budova, ve které se ordinace nacházela byla z důvodu úspor energie velmi utěsněná, včetně oken, která se neotevírala. Větrání ordinace bylo mechanické, přívod vzduchu byl veden do vyšetřovacích místností, což mohlo napomoci rozšíření infekčního aerosolu po objektu. Podle provedených zkoušek docházelo k proudění vzduchu z vyšetřovacích místností chodbou až do čekárny. Vzduch byl recirkulován. (40)



Obrázek 8– Půdorys ordinace, ve které došlo k nákaze spalničkami. Šipky ukazují pohyb prvního nakaženého. V závorkách jsou uvedeni nakažení. (40)

Obrázek 9 – Systém větrání v ordinaci, nevyplněnými šipkami je naznačeno proudění vzduchu (40)

J. COVID-19

Infekční onemocnění způsobené virem SARS-CoV-2, které vzniklo v roce 2019 a v roce 2020 se rozšířilo po světě. Vzhledem k tomu, že epidemie při psaní této práce stále probíhá a informace jsou poměrně čerstvé, mohou být někdy nepřesné.

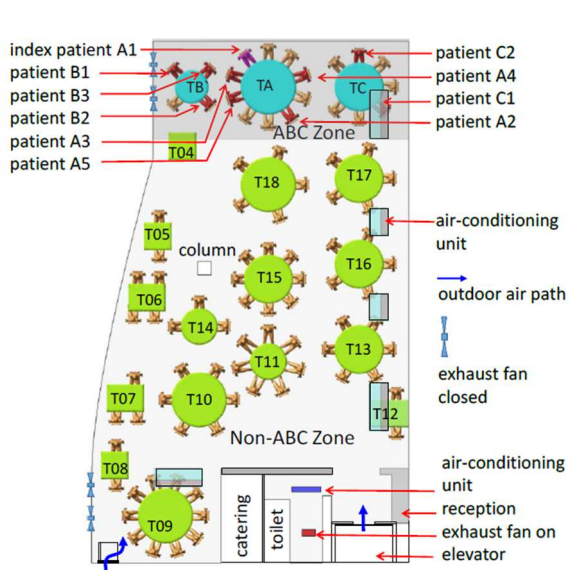
Vir SARS-CoV, který způsobuje onemocnění SARS je tomuto viru nejpodobnější a některé vlastnosti mají podobné. Ve vzduchu na aerosolu přežijí zhruba stejnou dobu – zjištěno při teplotě 23 °C a relativní vlhkosti vzduchu 40 %. Rozsah doby, po které je polovina z původního počtu virů živá je zhruba 45 min až 2,5 hod. V době přežití na površích z různého materiálu se liší více. Například na povrchu z kartonu přežije SARS-CoV-2 mnohem déle. (41)

Vir SARS-CoV-2 dlouho přežívá na hladkých površích, kde byl detekován i po 7 dnech. Jde například o plasty a nerezové povrchy. Je citlivý na teplotu, velmi stabilní je při teplotě 4 °C, naopak při teplotě 70 °C nepřežije déle než 5 minut. Není citlivý na hodnotu pH prostředí, ale snadno podléhá běžným dezinfekčním metodám. (42)

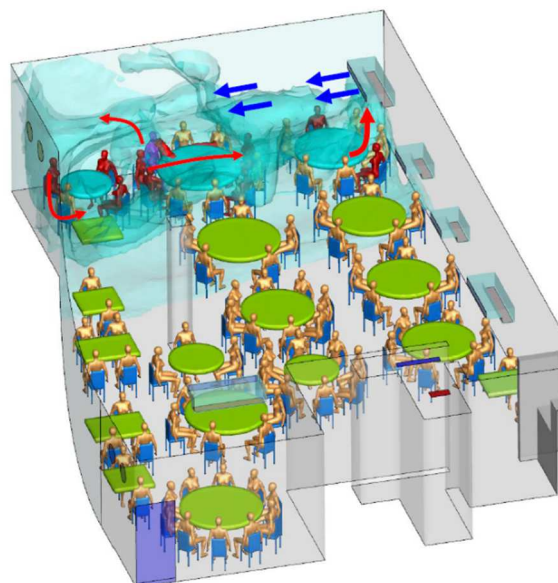
Jako hlavní cestou, jak se virus šíří jsou považovány kontakty lidí na krátkou vzdálenost. Proto jsou doporučována pravidla dodržování odstupů, dezinfekce rukou a nošení roušek. Aerosolový přenos je ale také nanejvýš pravděpodobný, přestože není zdůrazňován. Je totiž obtížné virus, který se pohybuje vzduchem na aerosolu zachytit a podat jasný důkaz, že je schopen způsobit infekci. Problémem je i nutná znalost proudění vzduchu. To obvykle není oborem, ve kterém by se orientovali mikrobiologové, kteří virus zkoumají. Je ovšem několik důvodů, proč je aerosolové šíření velmi reálné. Jedním z nich je podobnost s virem SARS-CoV, o kterém je z různých případů známo, že se aerosolem šíří. Dále jsou zaznamenány i případy nového viru, které se dají bez možnosti šíření viru aerosolem obtížně vysvětlit. Jsou to například rozšíření nemoci na výletních lodích, kde i přes maximální izolaci osob v kajutách došlo k masivnímu rozšíření infekce. (43)

Zajímavý je v tomto ohledu i případ rozšíření nákazy v pěveckém sboru, kde byla nakažena většina členů. Množství viru v ústech má rozsah $10^2 - 10^{11}$ částic v ml tekutiny. Někteří nakažení šíří obrovské množství virů a mohou tak přispět k událostem, kde je najednou nakaženo velké množství lidí. Tento případ pěveckého sboru se stal v USA v březnu roku 2020. Jeden ze členů přišel na zkoušku se symptomy nemoci Covid-19, které se u něj objevili už o 3 dny dříve. Později byl pozitivně testován na přítomnost tohoto viru. Na zkoušce bylo 61 osob, byla zavedena opatření v podobě dezinfekce rukou a omezení vzájemného kontaktu osob – bez podávání rukou a objímání. Celkem bylo nakaženo 53 lidí. Nákaza se rozšířila po celé místnosti, bez souvislosti s místy, kde se nacházel první nakažený a sekundární případy. Nejsou známy podrobnosti o větrání a vytápění místnosti, pouze to že byla vytápěna vzduchem. Ostatní způsoby přenosu, kromě aerosolového, jsou méně pravděpodobné, protože množství sekundárních případů je opravdu vysoké a kontakty mezi lidmi byly omezené. Je pravděpodobné, že zpěv velmi přispěl k takto masivnímu rozšíření nákazy, neboť se při něm může uvolňovat velké množství infekčních částic. (44)

Dalším případem, který ukazuje na možnost šíření nákazy pomocí aerosolu, je její rozšíření ve špatně větrané restauraci v Guangzhou v Číně. Událost se stala v lednu 2020, v době, kdy bylo zaznamenáno pouze zhruba 10 případů v celém městě. 3 různé rodiny (A, B, C) obědvaly v restauraci u stolů poblíž sebe. První nakažený byl z rodiny A a celkem se od něj zde nakazilo 9 dalších osob. Byli to i tři členové rodiny B a dva z rodiny C. K žádnému bližšímu kontaktu osob z jednotlivých rodin nedošlo. Ostatní návštěvníci restaurace, ani obsluha, nakaženi nebyli. Přívod čerstvého vzduchu byl v tuto dobu $2,7-3,7 \text{ m}^3/\text{h}/\text{osobu}$, nebyl ale řízený. Vzduch v místnosti byl upravován 5 fan-coil jednotkami. Rozmístění stolů v restauraci a místa, kde lidé seděli jsou vidět na obrázku 10. (45)



Obrázek 10 – Půdorys restaurace v Guangzhou, kde došlo k rozšíření nákazy (45)



Obrázek 11 – Proudění vzduchu v době přenesení nákazy v restauraci v Guangzhou (45)

Byla provedena zkouška měřením koncentrace stopovací látky a počítačový model proudění vzduchu. Vlivem působení fan-coil jednotky proudil vzduch v zóně ABC, kde seděli všichni nakažení, v uzavřené smyčce – na obrázku 11. Byla zde vyšší koncentrace infekčních kapének než v jiných částech restaurace. Pravděpodobně se zde spojilo více negativních faktorů. Jedním z nich byl nízký přívod čerstvého vzduchu, dalším pak charakter proudění, které podporovalo šíření infekčního aerosolu. Právě přenos aerosolem je zde nejpravděpodobnější, neboť nedošlo k žádnému blízkému kontaktu ($< 1,5$ m) mezi osobami z různých rodin. (45)

Objevily se studie (46) zkoumající vliv znečištěného ovzduší na šíření tohoto onemocnění. Předpokladem je, že dlouhodobé dýchání znečištěného vzduchu snižuje imunitu a člověk se stává náchylnější k nemoci. To je jistě pravda. Otázkou je, zda může měnit se koncentrace znečišťujících látek v ovzduší (prachové částice, CO, NO₂, SO₂) ovlivňovat denní nárůst případů onemocnění. Spíše je pravděpodobné, že denní nárůst případů a zároveň i množství těchto látek v ovzduší jsou pozitivně ovlivněny vládními nařízeními v jednotlivých státech. Omezením vzájemného kontaktu lidí, snížení dopravy, v některých případech i pozastavení průmyslu sníží nejen počty nakažených, ale i emise polutantů. (46)

K. MERS

Onemocnění způsobené virem MERS-CoV, který je příbuzný virům způsobujícím onemocnění SARS a Covid-19. Patří mezi koronaviry. Objevil se v roce 2012 na Arabském poloostrově, jeho šíření bylo ale pomalejší než šíření zmíněných příbuzných virů. Důvodem je i větší závažnost onemocnění, které způsobuje. Projevuje se nejdříve jako běžné nachlazení, později se objevuje vážné onemocnění plic a selhávání ledvin. Zemře na něj až třetina nakažených. (47)

Šíření viru není příliš prozkoumané. V roce 2015 vypuklo onemocnění v Jižní Korey, kde se nakazilo 186 osob. Většina z nich v nemocnicích, které nezajistily opatření proti šíření onemocnění. Byla zkoumána příčina. Ve studii (48) provedené ve 2 nemocnicích, kde se pacienti léčili, byly testovány vzorky vzduchu a stěry z povrchů na přítomnost viru. Virus byl detekován ve všech vzorcích vzduchu z pokojů pacientů s onemocněním. A dále i na mnohých površích v pokojích, i na těch nepřístupných. Je tedy pravděpodobné, že se virus nešíří pouze na krátkou vzdálenost, ale i na delší vzdálenosti aerosolem nebo kontaktem s kontaminovaným povrchem. (48)

L. Antrax

Bakteriální onemocnění, které je typické pro hospodářská zvířata, ale je přenosné i na člověka. Vzhledem ke schopnosti této bakterie dlouho přežít a její snadné kultivovatelnosti byla použita jako biologická zbraň. V minulém století byla vyráběna v USA, Sovětském svazu a dalších státech. Šlechtěním vznikly velmi odolné a nebezpečné bakterie. Přenáší se potravou, poraněním kůže nebo přes dýchací soustavu. (49)

V roce 1979 v městě Sverdlovsk v Sovětském svazu došlo k neobvyklé epidemii tohoto onemocnění. (50) Oficiálním vysvětlením byla nákaza z kontaminovaného masa, existuje ale závažné podezření, že příčinou epidemie byl únik nákazy z vojenského objektu, kde byly vyvíjeny biologické zbraně. Ve studii, která se touto událostí zabývala, bylo zjištěno, že většina nakažených pracovala nebo žila v blízkosti tohoto vojenského objektu. Došlo také k úhynu hospodářských zvířat v okolí. Charakter rozšíření ukazuje na možnost rozšíření infekčního aerosolu pomocí větru. Tuto hypotézu podporují i meteorologická data z té doby. Nevysvětlenou záležitostí je, že nebyl nakažen nikdo mladší 24 let. Tento případ byl zkoumán zpětně, nicméně ukazuje, že přenos aerosolem je možný a je jedním z hlavních nebezpečí této nemoci. (50)

M. Legionelóza

Onemocnění způsobené bakterií *Legionella pneumophila*, která napadá dýchací cesty a může způsobit zápal plic nebo lehčí formy respiračního onemocnění. Ideální podmínky, při kterých se množí je stojatá voda a teplota 35 °C. (51) Nachází se přirozeně ve vodě a v půdě. K přenosu onemocnění z člověka na člověka nejspíš nedochází. (52) Největší riziko nákazy v budovách představují vodovodní systémy, případně systémy vzduchotechniky se zvlhčováním nebo chlazením vodou. Nebezpečné je její rozprášení do vzduchu a následné vdechnutí. K tomu může docházet právě při vlhčení nebo chlazení vzduchu. Bylo zjištěno, že rizikové je opětovné spuštění těchto systému po odstávce, během které může dojít k rozmnožení bakterií. Většina zaznamenaných případů rozšíření infekce se stane na podzim při přerušovaném provozu, často v pondělí po víkendové odstávce. Rizikovější jsou obvykle menší systémy. (53)

Případ rozšíření Legionelly na novorozeneckém oddělení na Kypru z roku 2008 ukazuje nejen na aktuálnost této hrozby, ale také na velmi zranitelnou skupinu. V tomto případě byl zdrojem nákazy ultrazvukový zvlhčovač vzduchu. Jeho výhodou je, že do vzduchu rozprašuje velmi jemné kapičky vzduchu. Všechny nežádoucí látky obsažené v použité vodě, včetně mikroorganismů, jsou ale rozprášeny do vzduchu. Pro bakterii Legionellu je to ideální způsob přenosu. Zde navíc nebyla prováděna správná údržba zvlhčovače. Nakazila se zde zhruba třetina z 32 novorozenců, kteří byli zdroji vystaveni, 3 z nich bohužel nákazu Legionellou nepřežili. (54)

4. Vliv větrání na přenos infekcí v budovách

Tato kapitola se zabývá vlivem podmínek v místnosti na přenos infekce. Jedním z hlavních prvků, který tyto podmínky ovlivňuje jsou systémy větrání, vytápění a klimatizace budov. Budou zde popsány klíčové vlastnosti vnitřního prostředí, které mají na šíření infekcí vliv. Budou při tom použity poznatky z předchozí kapitoly, která se zabývala konkrétními případy přenosu chorob.

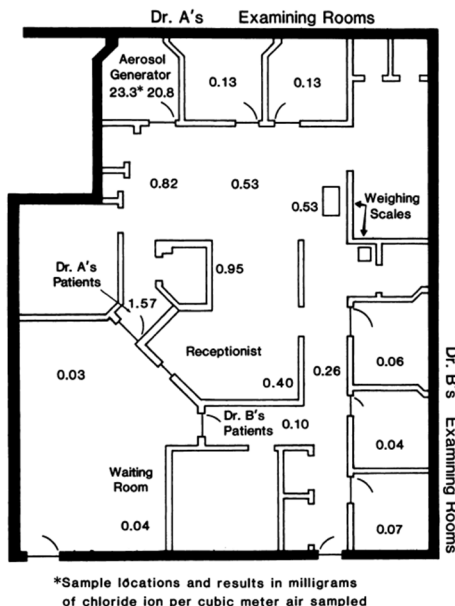
A. Vliv proudění vzduchu

Proudění vzduchu v místnosti, i celé budově je ovlivněno mnoha faktory. Pohyb vzduchu uvnitř může být způsoben pohyby ventilátoru nebo ovlivněn větrem, rozdíly tlaku, teploty apod. Proudění vzduchu v budovách je obvykle turbulentní. Různé studie ukázaly, že proud vzduchu může napomoci k šíření infekčních patogenů. Viry nebo bakterie, které se nachází na částech aerosolu jím mohou být přenášeny i na velmi dlouhou vzdálenost. Proudění vzduchu může také zvětšovat vzdálenost, do které se dostanou větší kapénky předtím, než dopadnou na zem. (4)

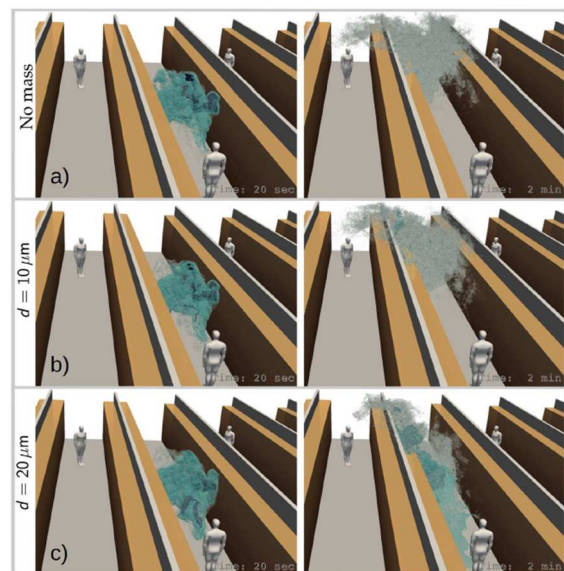
Příkladem situace, kdy bylo šíření nákazy podpořeno prouděním vzduchu je propuknutí pravých neštovic v nemocnici v Německu, pospané v kapitole 3B. (27) Proudění bylo podpořeno otopnými tělesy a otevřenými okny. Dalším příkladem je rozšíření onemocnění SARS v obytném komplexu Amoy Gardens v Hong Kongu (28) nebo přenos nemoci Covid-19 v restauraci ve městě Guangzhou v Číně. (45)

Mnohé z těchto případů jsou zaznamenány ve zdravotnických stavbách. Je tedy zřejmé, že dbát na správné proudění vzduchu zejména tam je velmi důležité. Při špatném návrhu řízeného větrání, nebo v případě, kdy je proudění vzduchu ovlivněno vnějšími faktory – například otevřením oken, může snadno dojít k proudění vzduchu nežádoucím směrem. Nákaza se tak může rozšířit do míst, kde bychom to nečekali. A to i přes dodržování hygienických pravidel, pečlivou dezinfekci a izolaci nakaženého pacienta v samostatné místnosti.

Pro získání dat o proudění vzduchu lze použít kouřové zkoušky, metodu sledování stopovací látky nebo metodu měření zředění aerosolu. Měření koncentrace aerosolu bylo použito při zjišťování proudění vzduchu v ordinaci, kde se rozšířily spalničky (kapitola 3I). Na obrázku 12 je vidět, že aerosol s obsahem iontu chloru byl generován v místnosti vlevo nahoře, kde se původně nacházel nakažený. V jednotlivých místech pak byly měřeny koncentrace této látky. (40) Další možností jsou počítačové simulace proudění vzduchu, například CFD (computational fluid dynamics). Na obrázku 13 je tato metoda použita pro modelování šíření aerosolových částic při kašli. (4)



Obrázek 12 – Studie proudění vzduchu v ordinaci dětského lékaře (40)



Obrázek 13 – Model šíření aerosolových částic od kašlajícího člověka (7)

B. Vliv intenzity větrání

Intenzita větrání má velkou souvislost s rizikem aerosolového šíření infekcí. Dá se říct, že čím větší je, tím menší je pravděpodobnost přenesení nákazy na dalšího člověka. Nakažený produkuje infekční částice, které se pohybují ve vzduchu. Jejich obsah je ředěn čistým přiváděným vzduchem. Pokud jsou zředěny natolik, že jejich množství působící na člověka nedosahuje infekční dávky, je pravděpodobnost nákazy malá.

Byly provedeny různé studie zkoumající tuto závislost. Využívají pokusy se zvířaty nebo zpětně studují reálné případy. Například byla zjištěna vyšší míra nakažených pneumokokovou infekcí ve věznici, kde byl přívod vzduchu pouze $7,1 \text{ m}^3/\text{h}/\text{osobu}$. Množství nakažených při přivádění $13,6 \text{ m}^3/\text{h}/\text{osobu}$ čerstvého vzduchu bylo méně než poloviční. Je známo také několik případů propuknutí nemocí na palubě letadla, kde nebylo dostatečné větrání. Dále bylo zjištěno, že při koncentracích CO_2 vyšších než 1000 ppm je v kancelářských budovách častěji detekováno RNA rhinoviru na filtrech. Tato hodnota koncentrace CO_2 je známkou nedostatečného větrání a zároveň může signalizovat i zvýšený obsah dalších nežádoucích látek, například mikrobů, v ovzduší. (4)

Problém je, že nejsou výzkumem podloženy konkrétní hodnoty intenzity větrání, které by měly být zajištěny v jednotlivých prostorech. Je totiž obtížné je určit. Jedním z přístupů je jejich výpočet ze znalosti infekční dávky a množství částic, které nakažený člověk produkuje. Obě hodnoty jsou ale velmi variabilní. Ani aktuální přístupy k návrhu násobnosti výměn vzduchu v čistých prostorech v nemocnicích se často neopírají o pevné důkazy. (4) Minimální doporučená hodnota intenzity větrání na jednotkách intenzivní péče je 12 h^{-1} , dle směrnic CDC (americké organizace pro veřejné zdraví) a ASHRAE (americké společnosti zabývající se vytápěním, chlazením a klimatizací). Hodnota byla zvýšena po epidemii onemocnění SARS, před ní byla poloviční. (6) Důležitým faktorem je také počet osob v místnosti. Přelidněné prostory je třeba větrat intenzivněji. V takových prostorech je riziko nákazy vysoké i z důvodu přenosu přímým kontaktem. (4)

K definování vlivu intenzity větrání lze použít rovnici, kterou zformuloval Wells v roce 1948 a později ji upravil Riley v roce 1978. Rovnice se nazývá Wells-Riley podle jejích autorů. Lze jí použít k odhadnutí rozšíření onemocnění: (6)

$$P = \frac{C}{S} = 1 - e^{-\frac{Iqpt}{Q}}$$

P – riziko infekce

C – počet případů, u kterých propukne onemocnění

S – počet náchylných jedinců

I – počet infekčních osob

q – množství částic produkované infekční osobou za hodinu

p – množství vzduchu vdechované jednou osobou v m³/h

t – doba expozice v hodinách

Q – průtok vzduchu v místnosti v m³/h

C. Vliv teploty a vlhkosti vzduchu

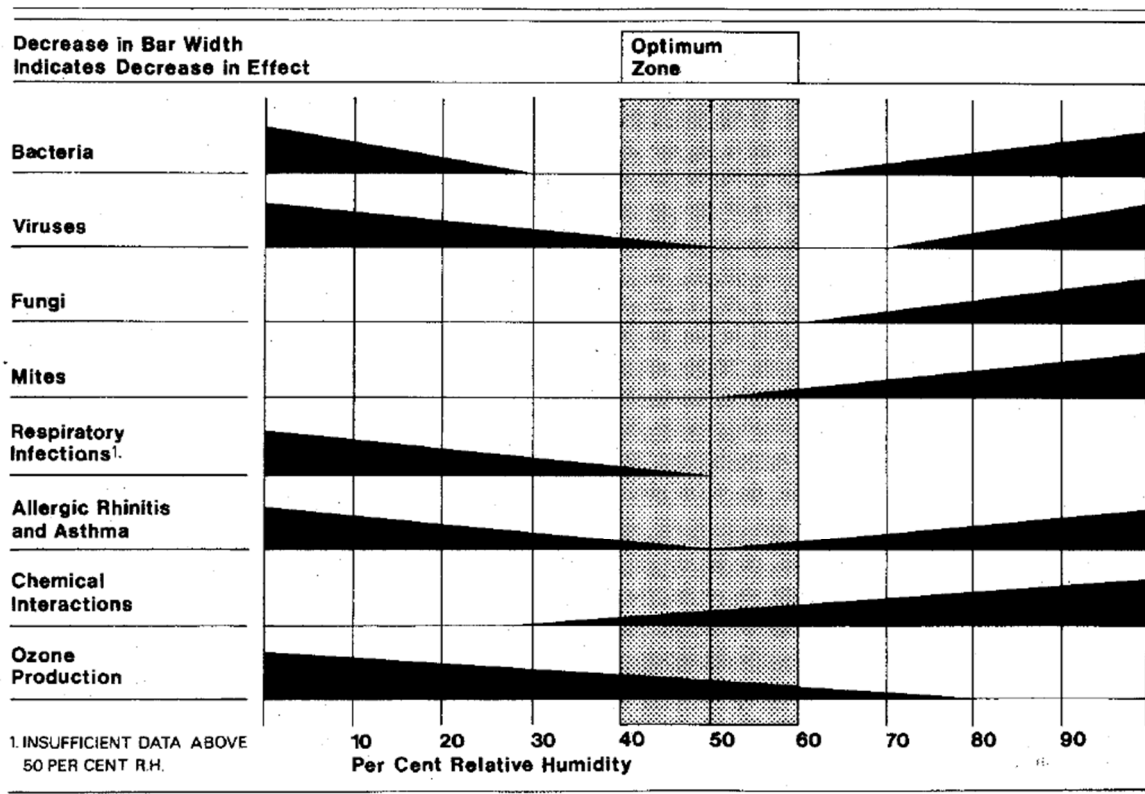
Teplota a vlhkost vzduchu jsou veličiny ovlivňované systémem větrání a vytápění. Jejich hodnoty mají vliv na schopnost mikroorganismů šířit se v prostoru. Teplota i vlhkost mají přímý vliv na jejich životaschopnost. Dále ovlivňují i rychlost odpařování vody z uvolňovaných infekčních kapének a tím i jejich velikost a množství. Nevhodné podmínky mohou zapříčinit i náchylnost sliznic člověka k získání infekce. (3), (55)

Teplota ideální pro šíření virů a bakterií se těžko určuje, vždy záleží na konkrétním organismu. Obvykle jsou stabilnější při nízkých teplotách kolem 4 °C. Vnitřní teplota v běžných místnostech se pohybuje v poměrně malém rozmezí a nelze s její pomocí výrazně snižovat riziko šíření patogenů. Například virus SARS-CoV-2 přežije při teplotě 4 °C 14 dní, při teplotě 37 °C zhruba den a při teplotě 56 °C 30 min. Pokud se teplota zvýší na 70 °C je zničen do 5 minut. (42) K zásadnímu snížení doby přežití dojde tedy až u poměrně vysokých teplot. Vysoké teploty, nad 100 °C, jsou pro mikroorganismy smrtící a využívají se i pro sterilizaci. (42), (56)

Teplota prostředí ovlivňuje i člověka a to, jak je odolný vůči infekcím. Vysoké teploty dle výzkumu ovlivňují mnoho tělesných funkcí, například dýchání, tělesnou teplotu, mentální zdraví a další. Jako riziková byla označena teplota nad 26 °C. (57) Naopak nízká teplota může být také riziková, zejména pro náchylné skupiny jako jsou starší lidé nebo malé děti. Při teplotě pod 16 °C se snižuje odolnost vůči respiračním onemocněním. (58)

Vliv relativní vlhkosti vzduchu na šíření nemocí vzduchem je zajímavé téma. Při nízké vlhkosti dochází k rychlému odpařování kapének, které člověk vydechuje. Vznikne tak větší množství malých částic, které jsou schopné šířit se vzduchem na velkou vzdálenost. Nízká vlhkost přispívá k náchylnosti sliznic člověka, z důvodu jejich vysoušení. Dochází pak k časté nemocnosti.

Bylo zjištěno, že u různých nežádoucích látek v ovzduší, včetně mikroorganismů, lze definovat rozmezí vlhkostí, které je pro ně méně příznivé. Grafické znázornění je na obrázku 14. Například pro bakterie je nejméně vhodné rozmezí 30–60 % relativní vlhkosti. Pro viry je to 50–70 %. Některým druhům se lépe daří při vysokých vlhkostech, některým při nízkých, mezi těmito skupinami jsou hodnoty relativní vlhkosti, při kterých vytvoříme méně žádoucí podmínky pro obě skupiny. Hodnoty pro různé látky se samozřejmě překrývají, ale za optimum lze považovat hodnoty 40–60 % relativní vlhkosti. (59)



Obrázek 14 – Optimální rozmezí hodnot relativní vlhkosti (59)

D. Tlaková diference

Rozdíly tlaků souvisí s prouděním vzduchu. Je třeba, aby místa, kde vzniká znečištění byla v podtlaku a kontaminovaný vzduch se z nich nemohl šířit dál. Řízený podtlak je nutné udržovat například na infekčních odděleních nebo na septických operačních sálech, odkud hrozí šíření infekce. V přetlaku pak mají být místnosti, které potřebujeme před znečištěním chránit. Typicky jsou to operační sály, jednotky intenzivní péče, pokoje pacientů s oslabenou imunitou a další čisté proozy v nemocnicích. Neplatí to jen pro nemocnice, princip se využívá i v obytných a kancelářských budovách, kde jsou z hygienických důvodů podtlakově větrány hlavně toalety. Do míst pobytu lidí je pak přiváděn čerstvý vzduch.

Je zmapováno několik případů, kde vlivem špatného návrhu nebo funkčnosti vzduchotechniky vznikl přetlak v místě, kde byl zdroj infekce. Jedním z nich je rozšíření nákazy SARS v nemocnici v Hong Kongu, kde byl první pacient hospitalizován na jednotce s nefunkčním odvodem vzduchu. (29) Dalším příkladem je přenos planých neštovic v dětské nemocnici. První pacient byl rovněž v místnosti, která byla v přetlaku vůči chodbě a nemoc se pak rozšířila po nemocnici. (60) V praxi je udržování rozdílů tlaků často komplikované. Dokumentuje to výsledek jedné studie z roku 1993. (61) Je zaměřená na reálný stav místností pro izolaci pacientů, které mají být v podtlaku. Výsledkem bylo, že ze 45 % z nich proudí vzduch při zavřených dveřích na přilehlou chodbu. (4), (61) Příčin těchto problémů může být několik, špatný návrh větrání, nedostatečná údržba a kontrola funkčnosti zařízení nebo i nevhodný provoz celého prostoru. Otázkou je i optimální návrhová hodnota přetlaku, v literatuře se pohybuje od 2,5 do 15 Pa. (6) I přes kvalitní návrh může vzniknout problém při realizaci. Průzkum nově postavených 558 pokojů pro izolaci pacientů s onemocněním SARS v Hong Kongu odhalil, že 50 % z otestovaných pokojů nebylo v podtlaku. Příčinou byla nespolehlivost monitorovacího systému, silný proud vzduchu směřovaný ke dveřím, netěsnost podhledů a vzájemné ovlivňování s dalšími systémy vzduchotechniky. (6)

5. Výhody a rizika jednotlivých druhů větrání

Tato kapitola se zaměřuje na přirozené a mechanické větrání a jejich vliv na šíření infekcí. Jsou zde popsána jejich pozitivní stránky a rizika, ke kterým může dojít. Opatření proti těmto rizikům budou popsána v kapitole III.

A. Přirozené větrání

Přirozené větrání disponuje celou řadou výhod. Je relativně levné, nenáročné na údržbu, má pozitivní vliv na psychiku i zdraví lidí. Jeho problémem je, že není zaručeno dostatečné větrání. Otevírání oken se obvykle řídí pocitem obyvatel budovy. V nepříznivých klimatických podmínkách jsou často otevírána nedostatečně. To je možné řešit pomocí automatického otevírání dle časového rozvrhu nebo dle množství CO₂. Na druhou stranu ale bylo zjištěno, že v nemocnicích je v případě přirozeného větrání v pokojích často dosaženo vyšší intenzity větrání než při mechanickém větrání. (2) Zde ale velmi záleží na okolních podmínkách, dispozici místností a také na lidském faktoru. Nevýhodou je i vzniklý teplotní diskomfort, který může být nežádoucí a znamená vyšší energetické nároky na vytápění. Obzvláště v průběhů epidemií, je ale mírný diskomfort a vyšší náklady jistě lepší než zvýšení rizika nákazy. Další nevýhoda přirozeného větrání je, že proudění vzduchu nelze kontrolovat a může docházet k nežádoucímu směru proudění. Například při izolaci nakažených pacientů může vzduch vlivem otevřených oken a lokálních podmínek proudit z jejich pokojů do dalších místností a přispět tak k šíření infekce. (2)

V případě nemocnic a dalších citlivých prostředí mohou být nevýhodou i bezpečnostní rizika, například riziko pádu z okna nebo riziko vniknutí cizích osob do objektu. Vhodným návrhem oken, lze ale oběma předejít. Dále mohou být otevřená okna přímou cestou pro různé nežádoucí látky. Dovnitř se mohou nekontrolovatelně dostat alergeny, toxické látky, prachové částice i hmyz, vždy záleží na kvalitě okolního prostředí. (2)

Existují důkazy, že čerstvý vzduchu spolu se slunečním světlem zamezují šíření infekcí na aerosolu. Před vynálezem antibiotik se kladl velký důraz na dostatek venkovního vzduchu při léčbě tuberkulózy. Pacienti leželi u otevřeného okna v místnostech s intenzivním přirozeným větráním. Bylo dokonce zjištěno, že čerstvý venkovní vzduch bakterie tuberkulózy ničí. Tyto bakterie byly lépe schopné přežít v nevětraných místnostech než ve tmavých, ale intenzivně větraných místnostech. V 60. letech minulého století byl tento jev nazván open air factor (OAF), což lze přeložit jako faktor venkovního vzduchu, který popisuje germicidní účinky venkovního vzduchu. Bylo zjištěno, že venkovní vzduch má větší germicidní účinky než vzduch uvnitř, a to ve dne i v noci. Dezinfekční účinky venkovního vzduchu

nejsou příliš prozkoumané. Je možné, že příčinou jeho smrtícího účinku na mikroorganismy je obsah hydroxylových radikálů. Bylo zjištěno, že tyto radikály snižují množství aerosolem přenášených bakterií. Tyto vlastnosti venkovního vzduchu jsou výhodou hlavně pro přirozené větrání, není ale jisté, zda si je vzduchu zachová i uvnitř. Jedna studie tvrdí, že pro jejich úplné zachování i v uzavřeném prostoru by bylo třeba 30–36 výměn vzduchu za hodinu. Podmínkou je tedy vysoká intenzita přirozeného větrání. (2), (62), (63)

Existují důkazy, že přirozené větrání může být efektivnější prostředek zamezení šíření infekcí než větrání mechanické. Jedním z nich je případ epidemie chřipky v roce 1918, kdy nemocní ubytovaní ve venkovních prostorech se častěji uzdravili než ti na nemocničních odděleních. Dalším příkladem je vyšší nemocnost vojáků ve válce v Perském zálivu ubytovaných v mechanicky větraných stavebních než u těch ubytovaných ve stanech. (2) V roce 2007 byl v Peru proveden výzkum (64), kde bylo porovnáno 12 místností s podtlakovým mechanickým větráním pro izolaci pacientů s tuberkulózou se 70 místnostmi větranými přirozeně, kde se také nacházeli nakažení tuberkulózou. Mechanicky větrané místnosti byly obvykle v novějších budovách, ty přirozeně větrané byly starší, s velkými okny a vysokými stropy. Vyšší riziko nákazy tuberkulózou bylo zjištěno v mechanicky větraných místnostech, kde také byla nižší intenzita větrání. Je to důkaz, že například v tropických oblastech, kde je tuberkulóza častým onemocněním, je přirozené větrání levným a zároveň účinným ochranným opatřením. Nemusí být však ideálním řešením všude. (2), (64)

B. Mechanické větrání

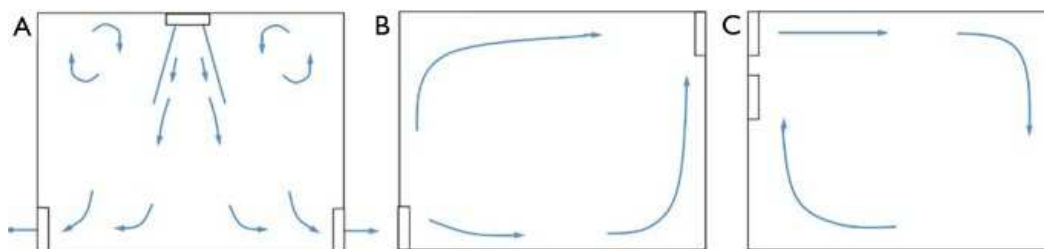
Mechanické větrání může svými výhodami snadno předčít přirozené, podmínkou je ale dobrý návrh, správná údržba a provoz. Právě nedostatky v těchto oblastech jsou příčinou zhoršené funkčnosti mechanického větrání i časté nedůvěry lidí. Pečlivým návrhem lze zajistit takové tlakové poměry, proudění vzduchu a intenzitu větrání, které šíření infekcí pomocí aerosolů omezí.

Mezi hlavní výhody patří možnost trvalého a dostatečného přísunu čerstvého vzduchu, bez nutnosti otevírání oken. Vzduch může mít dokonce i vyšší čistotu než ten venkovní, pokud je filtrován a celý systém je dobře udržován. Dále může být vzduch upraven na optimální teplotu a vlhkost. I s těmito úpravami jsou spojena rizika. Příliš nízká teplota přiváděného vzduchu může u některých jedinců způsobovat nachlazení. Zvlhčování se pojí s rizikem přenosu infekcí. Bylo identifikováno několik případů, kdy došlo k rozšíření bakterie Legionelly ze zvlhčovače. (52), (54)

Další nevýhodou je určitá energetická náročnost, nutné počáteční náklady i náklady na údržbu. Díky technologiím zpětného získávání tepla, můžeme čerstvý přiváděný vzduch předehřát a část energie tak ušetřit, což u přirozeného větrání příliš možné není. Existuje také několik případů, kdy došlo z důvodu špatného návrhu nebo údržby mechanického větrání k rozšíření infekce, velmi často v nemocnicích. Častou příčinou je nefunkční nebo nedostatečný odvod vzduchu z místa, kde se nachází infekční pacient. Místnost se nachází v přetlaku a infikovaný vzduch se může šířit do okolí.

Důležitou výhodou je možnost návrhu způsobu distribuce vzduchu. Jednotlivé typy distribuce mají odlišný vliv na šíření infekcí v prostoru: (6), (65)

- **Směšovací větrání** – vzduch ve přiváděném vyšší rychlostí, dochází k promísení proudu přiváděného vzduchu se sekundárním vzduchem v místnosti. Nečistoty ve vzduchu jsou rovnoměrně rozptýleny v celé místnosti. Jedna studie zkoumala chování vydechovaného aerosolu v nemocničním pokoji pro 2 osoby s různými způsoby větrání. Vyšlo najevo, že aerosol ve člověkem vydechovaném vzduchu se v tomto případě rychle rozptýlí po celém prostoru a vzdálenost od případné nakažené osoby nehraje roli. (66) Tento způsob větrání se používá nejčastěji, v širokém spektru aplikací.
- **Vytěšňovací větrání** – v ideálním případě by byla přívodním prvkem celá plocha stropu nebo stěny a odvodním celá plocha podlahy, případně protilehlé stěny. Obvykle je ale toto větrání zajištěné použitím velkoplošného distribučního prvku na stropě, který přivádí pomalou rychlostí o pár stupňů chladnější vzduch. Vytvoří se tak laminární proud, který klesá k zemi a vytlačuje znečištěný vzduch. Typickým distribučním prvkem je laminární strop. Znečištěný vzduch může být odváděn u podlahy, čímž se efektivně odstraní nečistoty vytlačené přiváděným vzduchem. Tento způsob větrání se používá převážně u operačních sálů, ale je vhodný i pro speciální jednotky intenzivní péče pro pacienty s oslabenou imunitou.
- **Zaplavovací větrání** – vzduch je přiváděn malou rychlostí velkoplošnou výustí u podlahy. Jeho teplota je o pár stupňů nižší než teplota v místnosti. Vzduch se ohřívá a stoupá vzhůru, kde je odváděn. Odvod v horní části místnosti může být z hlediska odvodu nečistot efektivnější, neboť člověkem vydechovaný znečištěný vzduch přirozeně stoupá vzhůru vlivem své teploty a konvektivního proudu, který kolem člověka vzniká. (6)



Obrázek 15 – Schémata způsobů větrání (6)

A Vytěšňovací větrání

B Zaplavovací větrání

C Směšovací větrání

- **Osobní větrání** – zajišťuje přívod vzduchu přímo ke člověku, další variantou je odvod znečištěného vzduchu přímo u člověka, čímž lze zamezit rozšíření infekčních částic po celé místnosti. Nejlepší variantou z hlediska zamezení přenosu infekcí je dle výzkumů přívod vzduchu mřížkou na stropě a individuální odvod přímo nad hlavou člověka. Přes dobré teoretické výsledky tohoto způsobu větrání je v praxi těžko proveditelné a není často používané.

III. PRAKTICKÁ OPATŘENÍ PRO ZAMEZENÍ ŠÍŘENÍ INFEKČÍ V BUDOVÁCH

Tato kapitola se zabývá aplikací teoretických poznatků o šíření virů a bakterií do praxe. Budou zde popsána návrhová a provozní opatření, která mohou zamezit šíření infekcí. Ačkoli se opatření liší dle druhu nákazy a také prostoru, který je řešen, lze stanovit obecné postupy, které přenos infekcí omezují. Z důvodu specifik zdravotnických staveb, jsou opatření pro ně uvedena zvlášť. Opatření můžeme rozdělit na několik skupin. Jsou to opatření administrativní, opatření technická a metody osobní ochrany. (67) Ta uvedená zde, jsou převážně technická a jsou zaměřená na zařízení vzduchotechniky. Dále lze rozlišovat, zda se jedná o opatření obecná, která by měla být součástí každého návrhu stavby nebo velmi konkrétní postupy používané v případě mimořádných situací.

1. Poloha zdroje infekce

Poloha zdroje a charakter zdroje je důležitá informace pro stanovení účinných opatření proti šíření infekcí.

A. Zdroj vně budovy

Jedná se spíše o výjimečný případ, ale může se vyskytnout. Typický je pro čisté prostory, kde musí být venkovní vzduch několikrát filtrován. Pro běžné provoz, ale považujeme venkovní vzduch za čistý. Dalším případem, kdy tomu tak není, je bioterorismus – záměrné šíření virů a bakterií. K těmto účelům byly vyvíjeny bakterie antraxu. Jako ochrana může sloužit umístění sání vzduchotechnického systému na nepřístupné místo. Dále může v některých případech dojít i k přirozenému šíření infekcí venkovním vzduchem na velké vzdálenosti, až několika kilometrů. Bylo to zaznamenáno u pravých neštovic a také u antraxu. Pravděpodobnost dosažení infekční dávky a propuknutí nemoci ale není v těchto případech velká. (2), (50)

B. Člověk jako zdroj

Nejčastěji je zdroj infekce samotný člověk, který ji přináší do budovy. K přenosu pak dochází různými způsoby, s ohledem na druh nemoci. Vzduchotechnickým systémem a obecně vnitřními podmínkami můžeme pole přenosu ovlivnit. Opatření popsaná v dalších odstavcích této kapitoly se zaměřují především na tento zdroj.

C. Zdroj uvnitř budovy

Vlivem špatného návrhu, údržby budov nebo vzniku poruch mohou být i budovy zdrojem infekcí. Typickým příkladem je bakterie *Legionella pneumophila*. K člověku se v budovách může dostat skrze vodovod, vlhčení nebo chlazení vzduchu. (52) V obou případech tomu lze předejít správným návrhem a údržbou.

2. Nezdravotnické budovy

A. Návrhová opatření

Už při samotném návrhu stavby je nutné myslet na zajištění zdravého vnitřního prostředí. Budou zde popsány možná opatření podle jednotlivých kategorií.

- **Obsazenost budov**

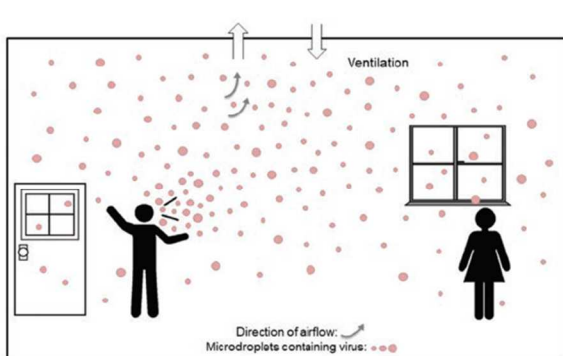
Rizika přenosu infekcí mezi budoucími uživateli budovy lze snížit návrhem vzdušných prostor, kde nebude zbytečně docházet k hromadění osob v jednom místě. S ohledem na rizika přenosu není vhodné navrhovat příliš malé prostory s velkou hustotou lidí. Platí to například u kanceláří, bytových objektů a dalších míst, kde lidé tráví hodně času.

- **Sluneční světlo**

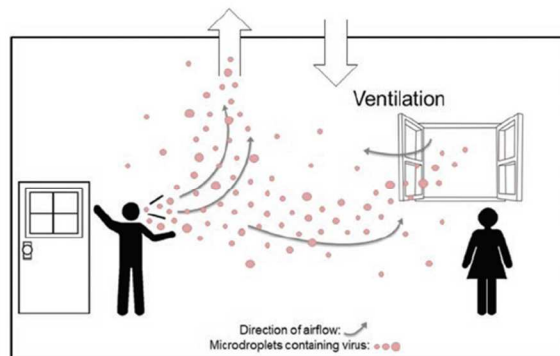
Návrhem můžeme také ovlivnit možnosti přirozeného osvětlení. Sluneční světlo má germicidní účinky (2), navíc pozitivně působí na psychiku člověka. Při návrhu velikosti a umístění oken hraje roli řada faktorů, například riziko přehřívání či riziko velkých tepelných ztrát. Jedná se o komplexní problém, z hlediska prevence šíření chorob má ale sluneční světlo pozitivní vliv. Svůj význam má i volba materiálů a celkové působení prostředí na psychiku člověka. I tyto vlivy mohou přispět k náchylnosti jedince k infekci.

- **Intenzita větrání**

Větrání je velmi důležitou složkou prevence šíření chorob. Je mnoho důkazů, že nedostatečné větrání vede k vyšší nemocnosti. (4) Na obrázcích 16 a 17 (68) je vliv větrání ilustrován. Může fungovat větrání mechanické i přirozené. V obou případech je ale nutné zajistit dostatečnou intenzitu větrání. Přesnou hodnotu je obtížné stanovit, určitě je dobré, držet se vyšších hodnot, než jsou ty minimální doporučené. Platí to obzvláště tam, kde je v jednom prostoru větší množství lidí. Dobrým ukazatelem kvality vzduchu může být koncentrace oxidu uhličitého, neměla by přesahovat 800–1000 ppm. (3) Dle této hodnoty může být řízen přívod vzduchu, případně může být výzvou k otevření okna u přirozeného větrání. Okna mohou být i automaticky otevíraná na základě tohoto měření. Přirozené větrání bez tohoto ukazatele může být nedostatečné, protože uživatel, který se delší dobu nachází v prostoru, si není zhoršené kvality vzduchu vědom.



Obrázek 16 – Znárodnění šíření aerosolů v místnosti s nedostatečným větráním (68)



Obrázek 17 – Znárodnění šíření aerosolů v místnosti s intenzivním větráním (68)

- **Proudění vzduchu v budově**

Vhodným prouděním vzduchu v budově lze předejít šíření infekcí mezi jednotlivými prostory. Přívod čerstvého vzduchu by měl být do míst pobytu osob. Odvod pak zejména z hygienického zázemí – koupelen, toalet atd. Právě toaleta může být zdrojem infekčních částic a je třeba vzduch odsud v dostatečném množství odtahovat. Vzduch by měl tedy proudit z míst čistých do více znečištěných. Je ale vhodné vytvářet v budově uzavřené celky, mezi kterými vzduchu proudit nebude, například mezi jednotlivými kanceláři v administrativní budově. V případě přirozeného větrání lze proudění vzduchu ovlivnit obtížně.

- **Distribuce vzduchu v prostoru**

Výhodou řízeného větrání je možnost nastavení optimální distribuce vzduchu v prostoru. Proud přiváděného vzduchu by neměl být příliš chladný a neměl by proudit velkou rychlostí. Rychlost v pobytové zóně pro kancelářskou práci by neměla být vyšší než 0,2 m/s. (69) Jak bude člověk rychlost proudění vnímat závisí i na teplotě vzduchu.

I v běžných provozech je dobré zamezit vzniku míst, kde není vzduchu vyměňován z důvodu špatného rozmístění přívodů a odvodů vzduchu. Ideálním případem by byl vytěšňovací způsob větrání, kdy je znečištěný vzduch plně nahrazován čerstvým. Nedochozí tedy ke směšování a vzduch se pohybuje malou rychlostí. Dosáhnou toho lze velkoplošnými vyústkami, v praxi se používá spíše jen pro část místnosti u speciálních aplikací. Při běžnějším směšovacím větrání dochází k mísení znečištěného vzduchu se vzduchem čerstvým, nečistoty se tedy ředí, ale neodvadí se všechny. Dle provedené studie má směšovací a částečné vytěšňovací větrání podobný účinek z hlediska odstraňování nečistot, které lidé do prostoru vydechují. (6) Vytěšňovací způsob větrání ale umožňuje ochranu určité části prostoru tím, že znečištěný vzduch vytlačuje a lidé mohou dýchat čerstvý přiváděný vzduch. Další možností distribuce vzduchu je zaplavování. Chladnější vzduch je přiváděný u podlahy, ohřívá se, stoupá vzhůru, kde je u stropu odváděn. Člověkem vydechované nečistoty se tedy drží v horní části místnosti. Tento způsob větrání může být z hlediska odstraňování patogenů vhodným řešením. Existují studie, které jej dokonce označili za efektivnější než jiné způsoby větrání. (70)

• Teplota a vlhkost vzduchu

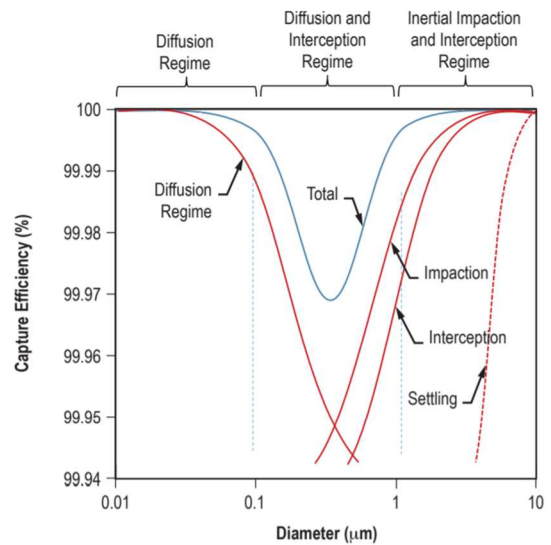
Vnitřní teplotu je vhodné navrhovat dle obecných doporučení pro zajištění komfortu. Změnou teploty šíření infekcí příliš neovlivníme. Ideální relativní vlhkost vzduchu je mezi 40–60 %. (59) Při nízkých hodnotách dochází k podpoření aerosolového šíření infekcí a vyšší náchylnosti sliznic člověka. Způsobů vlhčení vzduchu je několik, některé z nich mohou být ale rizikové. Při použití ultrazvuku nebo rotujícího disku k rozprašení vody do vzduchu může vzniknout infekční aerosol, pokud byla použita kontaminovaná voda. V tomto případě je třeba zajistit kvalitu vody a údržbu zvlhčovače, aby tomu bylo zamezeno. Určité riziko zde ale bude vždy. Další možností je využití odpařování vody, při něm nedochází k vytvoření aerosolu a tím je i eliminováno riziko přenosu infekčních mikroorganismů z vody. Použití parního generátoru je také bezpečné, protože voda je sterilizována varem. (71)

• Směšování, filtrace a dezinfekce vzduchu

Pokud je to možné, je dobré se vyvarovat směšování odpadního vzduchu s čerstvým, zejména na úrovni centrální jednotky. Pokud to zajistit nelze, je možné instalovat nějakou formu dezinfekce či filtrace. Venkovní vzduch je ve většině běžných aplikací považován za čistý a nemá smysl ho filtrovat vysoce účinným filtrem ani dezinfikovat. Znečištěný vzduch lze dezinfikovat například pomocí UV záření. Nejvíce účinné je záření UVC s vlnovou délkou < 280 nm. Toto záření ničí mikroorganismy rozkladem jejich nukleové kyseliny, nejefektivnější je vlnová délka 265 nm. (55) Toto záření je ale rizikové i pro člověka, nezranitelnějším orgánem

jsou oči. Použit ho lze v potrubí nebo přímo v prostoru, ale bez přítomnosti osob. Omezením lamp produkujících toto záření je to, že nezajistí sterilizaci, pouze dezinfekční účinek. Je třeba nepřekračovat jejich životnost, po které již nejsou tak účinné. Jejich rizikem je i produkce ozonu.

(72) Vysoce účinné filtry typu HEPA je možné použít, jsou schopné zachytit viry i bakterie. Často udávaná hodnota záchytu 99.97 % částic > 0.3 μm (73) je pouze nejnižší hodnotou účinnosti záchytu. Dochází k ní u velikosti částic mezi 0,1 μm a 1 μm , kde je přechod mezi dvěma způsoby zachycení částic. Filtry jsou tedy schopné účinně zachytit i menší částice, od 0,01 μm , jak je znázorněno na obrázku 18. (74) Je třeba důsledně dbát na jejich správnou instalaci a pravidelnou výměnu, jinak svou účinnost ztrácí.



Obrázek 18 – Závislost účinnosti filtru HEPA na velikosti částic (74)

• Zpětné získávání tepla

Zpětné získávání tepla je vhodné navrhovat tak, aby nedocházelo ke kontaktu dvou proudů vzduchu. U rotačních výměníků, kde nejsou proudy odděleny pevnou přepážkou je třeba dbát na správnou instalaci. Část, kterou prochází čerstvý vzduch by měla být v přetlaku, část kudy prochází odváděný znečištěný vzduch v podtlaku. Případným mírným únikem vzduchu nebude proud čerstvého vzduchu kontaminován. (3)

B. Provozní opatření

I u stávajících budov v provozu je možné zlepšit vnitřní prostředí a omezit šíření infekcí. Hlavně se jedná o zajištění dostatečného větrání a čistoty vnitřního prostředí. Důležitou součástí je pravidelná údržba, opravy a úklid budovy i technických zařízení. Provozní opatření nabývají na významu hlavně v době epidemie.

• Intenzita větrání

Provozním opatřením, zejména při epidemii nemoci, u které je možné šíření aerosolem, je maximalizace intenzity větrání. Pokud je větrání pouze okny, je třeba zajistit jejich dostatečné otevírání. I v případě mechanického větrání je vhodné zvýšit intenzitu větrání otevíráním oken. Větrání může být řízeno čidlem CO₂ nastaveným na nižší limitní koncentraci CO₂. Dobrým krokem k dostatečnému větrání může být i jeho dodatečná instalace. (3), (55) To samozřejmě vede ke zvýšení energetické náročnosti provozu, ale zdraví osob je vyšší prioritou.

• Nastavení provozu vzduchotechnické jednotky

Všechny části vzduchotechnického systému je třeba kontrolovat, udržovat a pravidelně vyměňovat filtry. Teplotu přiváděného vzduchu není třeba měnit, relativní vlhkost by se měla pohybovat ideálně mezi 40–60 %. (59) Pokud jsou v provozu zvlhčovače, u kterých je riziko rozprášení infekce do vzduchu, je vhodné je nahradit, případně vyřadit z provozu. Vzduchotechnické jednotky je třeba zapnout na maximální výkon, případně lze zvýšit výměnu vzduchu dodatečným větráním okny. Zařízení mají být v provozu nepřetržitě, pokud to lze. V době, kdy není budova obsazena mohou fungovat na snížený výkon. Alternativně lze zařízení spustit dvě hodiny před příchodem lidí a nechat je spuštěné i dvě hodiny po jejich odchodu. Intenzitu větrání lze řídit i podle čidla CO₂ nastaveného na sníženou hodnotu. Směšování vzduchu v jednotkách by nemělo být používáno, stejně jako systémy zpětného získávání tepla, u kterých dochází ke kontaminaci čerstvého vzduchu odpadním. (3), (55)

• Zařízení typu fan-coil nebo split

Fan-coily a splitové jednotky je vhodné nechat puštěné nepřetržitě, alespoň na částečný výkon. Zejména to platí v místnostech, kde je více lidí. Případně je lze spustit hodinu před příchodem lidí a vypnout hodinu po jejich odchodu a po tuto dobu přesahu provozu nechat otevřené okno. Je to z důvodu rizika zachycení infekčních částic na hrubých filtrech těchto zařízení, které se mohou uvolňovat po opětovném spuštění. (3), (55)

- **Čističky vzduchu**

Do místností lze také instalovat čističky vzduchu, které mohou odstraňovat aerosolové částice ze vzduchu. Mohou být nainstalované pevně nebo v přenosném provedení. Je třeba dbát na jejich správné umístění s ohledem na proudění vzduchu v místnosti a skrz čističku. Existuje několik druhů čističek, které pracují na různých principech. Mohou využívat filtraci vzduchu, dezinfekci pomocí UV záření nebo emitování iontů do vzduchu. Spolehlivé filtrace vzduchu dosáhneme pomocí čističky s HEPA filtrem, případně lze doplnit dezinfekcí UV zářením. Filtr je třeba pravidelně měnit a nakládat s ním jako s infekčním materiálem. Je třeba zvolit dostatečnou velikost čističky s ohledem na velikost prostoru. (67)

- **Další opatření**

V případě výskytu epidemie je na místě také použití dezinfekčních prostředků, častější úklid frekventovaných míst a ploch. Účinným opatřením je i snížení obsazenosti budovy, povinnost nošení osobních ochranných prostředků a důraz na mytí a dezinfekci rukou.

Dále je vhodné zavírat víka toalet při splachování, aby nedošlo k rozptýlení infekčních kapiček do vzduchu. Prostory toalet je třeba dobře podtlakově větrat. V případě přirozeného větrání je třeba zabránit opačnému proudění z nich směrem do dalších místností. Také je třeba pravidelně doplňovat vodu do zápachových uzávěrek, například u podlahových vpustí, aby nedošlo k jejich vyschnutí. Některé nebezpečné mikroorganismy se nachází ve fekáliích ve velkém množství a mohou se takto přenášet. (3), (31)

C. Větrání obytných budov

Obytné budovy jsou místem, kde trávíme mnoho času a zdravé prostředí v nich je velice důležité. Jedná se ale o složitý provoz, který závisí na konkrétním člověku a velmi obtížně se předem odhaduje. Větrání obytných prostor bývá často podceňovanou záležitostí. V obytných místnostech třeba zajistit trvalou intenzitu větrání $0,5 \text{ h}^{-1}$, případně $25 \text{ m}^3/\text{h}$ na osobu. Koupelny, toalety a kuchyně se větrají nárazově podtlakově. Způsobů větrání obytných budov je více. Pouze přirozené větrání nezajistí požadavek na trvalé větrání a není proto vhodné. Lze ale použít různé kombinace mechanického a přirozeného větrání. Velkou roli zde hraje přístup uživatele budovy. (75)

V případě propuknutí epidemie, je domácí prostředí ještě důležitější. Lidé mohou být nuceni trávit v něm téměř veškerý čas. Pro zamezení přenosu onemocnění mezi členy domácnosti lze zavést některá opatření omezující aerosolové šíření. Vzhledem k bližšímu kontaktu členů domácnosti mohou hrát velkou roli i další přenosové

cesty, například dotykem či kapénkami. Hodnoty teploty a relativní vlhkosti v interiéru není třeba měnit oproti běžným doporučením. Je třeba zvýšit intenzitu větrání. V případě mechanického větrání toho lze dosáhnout jednodušeji. Je vhodné jej nechat spuštěné trvale a nepoužívat směšování, případně lze cirkulovaný vzduchu filtrovat. Pokud je objekt větrán pouze přirozeně, lze intenzitu větrání zvýšit například vhodným otevřením oken na opačných stranách objektu, v různých výškách, případně přirozené větrání podpořit ventilátorem v hygienickém zázemí nebo přenosným ventilátorem umístěným v otevřeném okně. Možnosti přirozeného větrání ale velmi závisí na venkovních podmínkách, stále je třeba udržovat dostatečný tepelný komfort uvnitř objektu. Dalším opatřením je trvalý odtah vzduchu z hygienického zázemí a uzavírání toalet víkem. Doplňkovým opatřením je použití čističek vzduchu, které mohou snížit množství částic ve vzduchu. Ne všechny čističky vzduchu jsou ale účinné, je třeba dbát i na jejich správnou velikost, umístění a pravidelnou údržbu. Nenahrazují větrání čerstvým vzduchem. (76), (77)

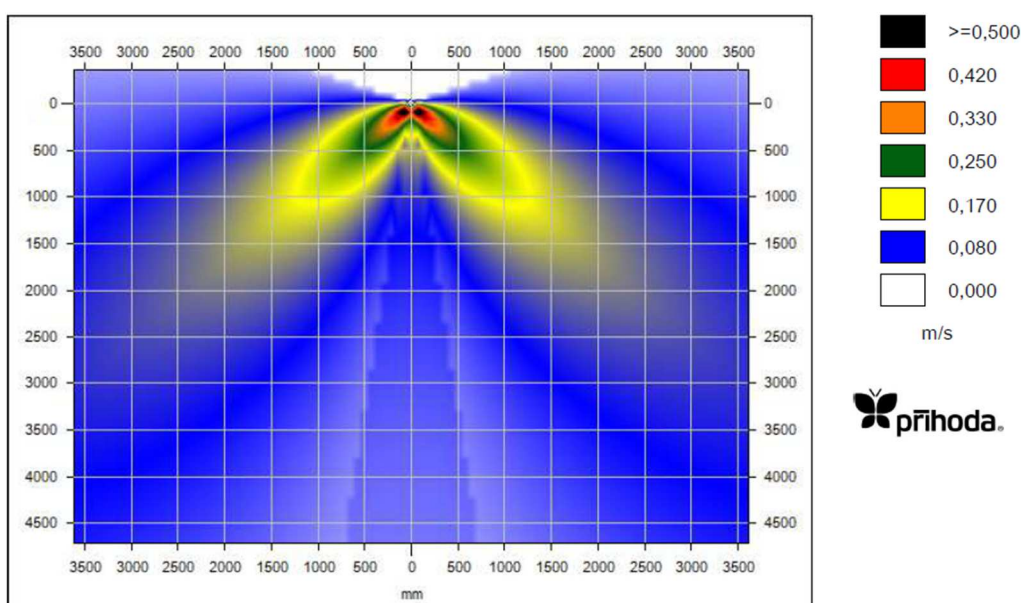
Pokud je v domácnosti nakažená osoba, nebo naopak osoba, pro kterou je onemocnění velmi rizikové, je vhodné vytvořit izolační místnost. V ideálním případě by měla mít i vlastní hygienické zázemí. V praxi může být vytvoření takového prostoru obtížné a změní se jím přístup k větrání celého objektu. Cílem je zamezit proudění vzduchu mezi oddělenou místností a zbytkem objektu. Pokud je instalován centrální vzduchotechnický systém, který by směšoval vzduch z izolovaného místa se vzduchem pro ostatní místnosti je třeba tomu zamezit. Lze to provést vyřazením směšování z provozu nebo zaslepením přírodních nebo odvodních otvorů v místnosti izolace. Vhodným opatřením je i zatěsnění dveří mezi izolačním pokojem a okolním prostředím. Pokud to lze, je ideální z pokoje pro izolaci nemocného vzduch odvádět a do pokoje s ohroženou osobou vzduchu přivádět. Otevírání oken v objektu je v tomto případě rizikové – může způsobit opačné proudění, než je žádoucí. Pokud to není třeba k zajištění požadované intenzity větrání není vhodné je otevírat. (76)

D. Příklad – větrání třídy

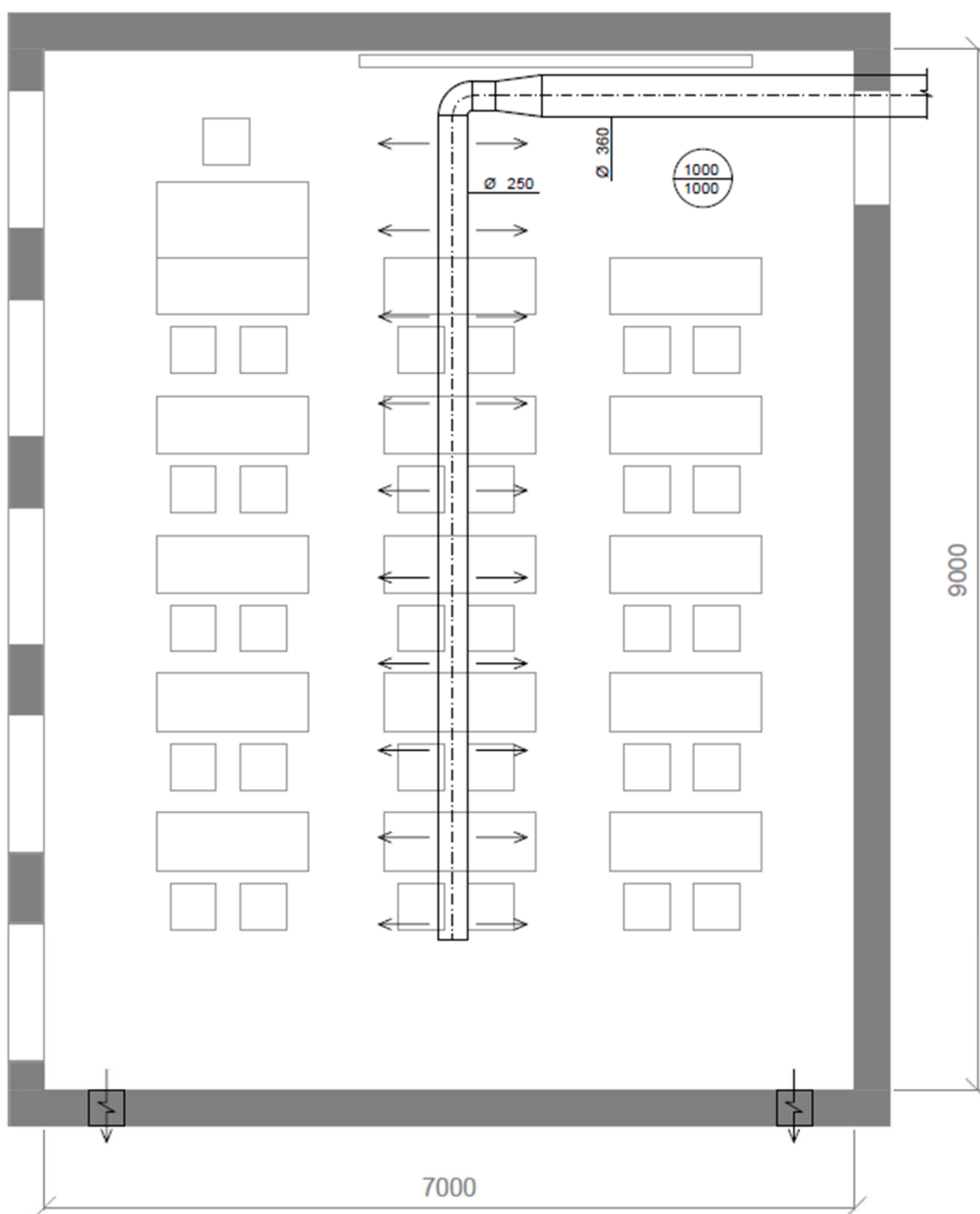
Jako příklad vhodného návrhu větrání prostoru pro zamezení šíření infekcí, je zde popsána školní třída. Je to prostor s vysokou obsazeností, zde je ve třídě 30 žáků, vychází cca 2 m²/osobu. Řešení větrání je mírně nadstandartní, ale stále na reálně proveditelné úrovni. Bylo zvoleno větrání mechanické pro spolehlivé zajištění trvalé intenzity větrání. Množství přiváděného vzduchu na osobu je cca 30 m³/h. Podrobnější údaje jsou v tabulce 1.

Cílem návrhu byla ochrana před aerosolovým přenosem infekce a zajištění potřebného vnitřního komfortu. Pro distribuci vzduchu byla zvolena kruhová textilní vyústka, která dokáže zajistit rovnoměrnou distribuci čerstvého vzduchu k žákům. Vzduch z ní proudí drobnými otvory po celé délce vyústky poměrně nízkou rychlostí. Otvory jsou na spodní části a jsou rozmístěné tak, aby byly vytvořeny dva proudy mírně do stran. Vzduch díky tomu proudí celou třídou. Tento způsob distribuce vzduchu se více blíží vytěšňovacímu s velkoplošnou vyústí, než je tomu u běžnějších typů distribuce, jako jsou například anemostaty. Pomalý proud vzduchu z vyústky je poměrně kompaktní a příliš do sebe nestrhává sekundární vzduch z místnosti. Čerstvý vzduch se tak dostává přímo do dýchací zóny osob. Dosah proudu z vyústky je vidět na obrázku 19. (78) Další výhodou je, že lze textilní vyústku snadno udržovat praním, případně lze zvolit látku s antibakteriální úpravou. (79)

Je zde zvoleno množství přiváděného vzduchu na horní hranici doporučených hodnot (80), dále je oproti běžnému návrhu lépe vyřešena distribuce vzduchu k žákům. Rychlosti v celé místnosti jsou poměrně malé a tím je zajištěn vysoký komfort bez průvanu i při vyšší intenzitě větrání. (81)



Obrázek 19 – Grafické znázornění dosahu proudu z kruhové textilní vyústky (78)



Obrázek 20 – Půdorys školní třídy větrané textilní výústkou

Přívod vzduchu/osobu	Maximální počet osob	Přívod celkem	Odtah celkem
30 m ³ /h	32	≈ 1000 m ³ /h	1000 m ³ /h
Plocha místnosti	Světlá výška místnosti	Objem místnosti	Intenzita větrání
7 x 9 m = 63 m ²	3,5 m	220,5 m ³	≈ 4,5 h ⁻¹

Tabulka 1 – Údaje k větrání školní třídy

3. Zdravotnické stavby

Specifickou oblastí jsou zdravotnické stavby, kde je vysoké riziko přenosu infekcí. Je to z důvodu jejich vyšší koncentrace, i z důvodu vyšší náchylnosti hospitalizovaných osob a provádění invazivních zákroků, které porušují přirozené tělní bariéry. Tyto nákazy vzniklé v souvislosti s pobytem v nemocnici se nazývají nozokomiální. Nejvíce rizikovými odděleními z hlediska získání této nákazy jsou jednotky intenzivní péče, zejména ty zaměřené na léčbu popálenin, péči po transplantaci a péči o novorozence. (16) Prevence šíření infekcí v těchto prostorech je specifická a vyžaduje velmi pečlivý návrh staveb a dodržování přísných hygienických pravidel při provozu a pravidelnou kontrolu a údržbu.

A. Návrhová opatření

Principy návrhu se v mnohém podobají běžným stavbám, jsou zde ale také velmi specifické prostory, které vyžadují zvláštní přístup. Lze je rozdělit na prostory s definovanou třídou čistoty a prostory ostatní. Opatření v nich se liší, zde jsou uvedeny spíše obecné přístupy. Návrh prostor s definovanou třídou čistoty se řídí speciálními normami a předpisy, například normou ČSN EN ISO 14644. (82)

• Obecné zásady

Prostory v nemocnicích a dalších zdravotnických stavbách by měly být navrhovány tak, aby pozitivně působily na psychiku člověka. Dostatek slunečního světla a čerstvého vzduchu je zásadní i z hygienických důvodů a je znám už z historie. Prostory by měly mít dostatečnou světlost výšku. Důležitá je volba tvarů a povrchů vnitřních prostor. Musí být dobře čistitelné a odolné vůči dezinfekčním prostředkům.

S ohledem na pravděpodobnost různých epidemií je s nimi třeba počítat již v návrhu. Bohužel i v posledních letech došlo k rozšíření infekcí v nemocnicích, například viru SARS v nemocnici v Hong Kongu. (29) Může dojít i k situaci, kdy z důvodu rozsáhlé epidemie některé části nemocnice změní svojí funkci, aby mohla být zajištěna péče o nakažené pacienty, i na to by měl návrh zdravotnických zařízení pamatovat.

• Intenzita větrání

Jednou z možností přenosu infekcí je aerosolový přenos. Ten lze dobrým návrhem větrání omezit. Je třeba zajistit trvalé větrání všech prostor s dostatečnou intenzitou, což může spolehlivě zajistit větrání řízené. Intenzita větrání se v různých prostorech liší, záleží na jejich funkci, případně třídě čistoty. U čistých prostor jsou intenzity větrání běžně 20–30 h⁻¹. (83) I v prostorech bez definované třídy čistoty je vhodné volit vyšší intenzitu větrání než u jiných budov.

Přirozené větrání je v našich podmínkách ve většině těchto prostor nevyhovující, zejména z důvodu nemožnosti kontroly kvality a proudění vzduchu a vzniku tepelného diskomfortu. O přirozeném větrání lze uvažovat pouze při vhodných venkovních podmínkách a v méně citlivých prostorech, jako jsou běžné nemocniční pokoje, ordinace některých lékařů a podobně.

- **Tlakové difference**

Ve zdravotnických stavbách je třeba pečlivě pracovat s tlakovou diferencí a se směry proudění vzduchu. Místa, kde vzniká znečištění musí být udržována v podtlaku vůči okolí. Jedná se o hygienická zázemí, infekční oddělení, septické operační sály, pokoje nakažených pacientů atd. Důležité je, aby se kontaminovaný vzduch nešířil dále po nemocnici, ale byl u zdroje infekce odsáván. Právě nedostatečný odtah z pokojů nakažených pacientů je častou příčinou rozšíření nemoci. (29) Naopak místa, která je třeba před infekcí chránit se udržují v přetlaku. Jsou to jednotky intenzivní péče, operační sály, některé vyšetřovny apod. V přetlaku je třeba udržovat i pracoviště personálu, který se stará o infekční pacienty, aby byl chráněný před nákazou. Mělo by být zamezeno proudění vzduchu mezi jednotlivými místnostmi, případně proozy tam, kde by mohlo dojít k přenosu infekce. Mohou být použity i systémy odsávání vzduchu přímo u pacienta, pro zamezení šíření aerosolů. (55)

- **Filtrace vzduchu**

Vícenásobná filtrace venkovního vzduchu je potřebná v čistých prostorech, kde čistota venkovního vzduchu není dostatečná. Filtrace je obvykle třístupňová, přičemž první a druhý filtr se nachází ve vzduchotechnické jednotce. Třetí je vysoce účinný filtr typu HEPA nebo ULPA a nachází se přímo u distribučního elementu. V prostorech, bez definovaných nároků na čistotu se obvykle používá venkovní vzduch pouze s hrubou filtrací.

- **Cirkulace vzduchu**

Vzduch odváděný z prostorů by ideálně neměl být recirkulován. Výjimkou mohou být prostory s vysokou třídou čistoty a vysokou intenzitou větrání. Tam lze použít směšování v případech, kdy je prostor minimálním zdrojem infekčních částic a větší riziko představuje venkovní vzduch. Mohou to být například popáleninové jednotky intenzivní péče. (84) Podmínkou je ale dostatečná filtrace cirkulovaného vzduchu, dle německé normy DIN 1946-4 by měl vzduchu projít stejnou filtrací jako vzduch čerstvý a měl by být vrácen do stejné místnosti nebo skupiny místností. (85) Pokud se jedná o jednotky intenzivní péče nebo pokoje, kde je více pacientů v oddělených místnostech může být cirkulovaný vzduch vrácený do pokojů cestou přenosu nákazy z jednoho prostoru do dalších. Vzduch lze vracet pouze do stejného pokoje. Pokud je cirkulovaný vzduch filtrován je otázkou účinnost filtrace a její spolehlivost.

Pokud se jedná o prostory bez vícestupňové filtrace, není směšování vzduchu vhodnou variantou.

- **Zpětné získávání tepla**

Pro úsporu energie je ideální použít zpětné získávání tepla ve variantě, kde nedochází ke kontaktu dvou proudů vzduchu. V některých případech jsou přípustné i rotační výměníky, podmínkou je ale kvalitní provedení a správná instalace, které zamezí kontaminaci přiváděného vzduchu.

- **Čističky vzduchu**

I ve zdravotnických zařízeních mohou být využity čističky vzduchu. Vhodnější jsou pevně nainstalované. Tím se zajistí vyšší spolehlivost a optimálnější proudění než u čističek přenosných. Umístění čističky v prostoru je totiž klíčové. Mohou být instalovány i do odvodního potrubí. Vyčištěný vzduch je pak recirkulován zpět do pokoje – v tomto případě by měl být vždy vrácen do stejného prostoru. Případně je vyfukován ven, bez rizika že způsobí další nákazu. Čističky vzduchu jsou účinným doplňkem k ostatním opatřením, ale nenahrazují je. (67)

B. Provozní opatření

Provozní opatření ve zdravotnických stavbách se v mnohém podobají těm v běžných stavbách, zde jsou ale zvýšené požadavky.

- **Obecné zásady**

K přenosu nozokomiální infekce může dojít přes prostředí nebo zdravotnický personál. Pracovníci ve zdravotnických zařízeních musí dodržovat hygienické zásady. Jejich součástí je mytí a dezinfekce rukou, nošení ochranných pomůcek, používání sterilního materiálu atd. Infekční odpad musí být správně ukládán a likvidován. Také je třeba zabránit kontaminaci vody nebo jídla. Ve zdravotnických zařízeních je třeba pečlivě uklízet, otírat všechny povrchy a používat dezinfekční prostředky. Musí být zabráněno přenosu infekcí dotykem, případně kontaktem s kontaminovaným předmětem. (16) V případě epidemie je třeba bránit šíření infekce v budově izolací nakažených pacientů v místnostech v podtlaku.

- **Větrání**

Jedním z možných cest přenosu je ale i vzduch. Tento přenos lze omezit zajištěním dostatečné intenzity větrání a správných tlakových diferencí, jak bylo popsáno v předchozí kapitole o návrhových opatřeních. Hlavním provozním opatřením je pravidelná údržba vzduchotechnických zařízení, která by měla probíhat podle daného plánu. Důležitou součástí je i čištění vzduchotechnických jednotek, výměna filtrů a údržba distribučních elementů. Tímto se dá předejít komplikovanému

a nákladnému čištění vzduchovodů. V případě probíhající epidemie je vhodné maximalizovat intenzitu větrání spuštěním vzduchotechnických jednotek na plný výkon. Úpravou zařízení lze v případě potřeby vytvořit z běžných pokojů pokoje v podtlaku pro infekční pacienty. (86) Pokud je někde použito směšování vzduchu, je třeba ho vyřadit z provozu, zejména pokud je bez filtrace. Veškerý vzduch z pokojů nakažených pacientů by měl být odváděn do venkovního prostředí, popřípadě lze použít i HEPA filtr pro ochranu okolního prostředí. Dobrým opatřením je i kontrola, zda jsou místnosti se zdrojem infekce opravdu v podtlaku. V některých studiích bylo zjištěno, že tomu tak často není. (6)

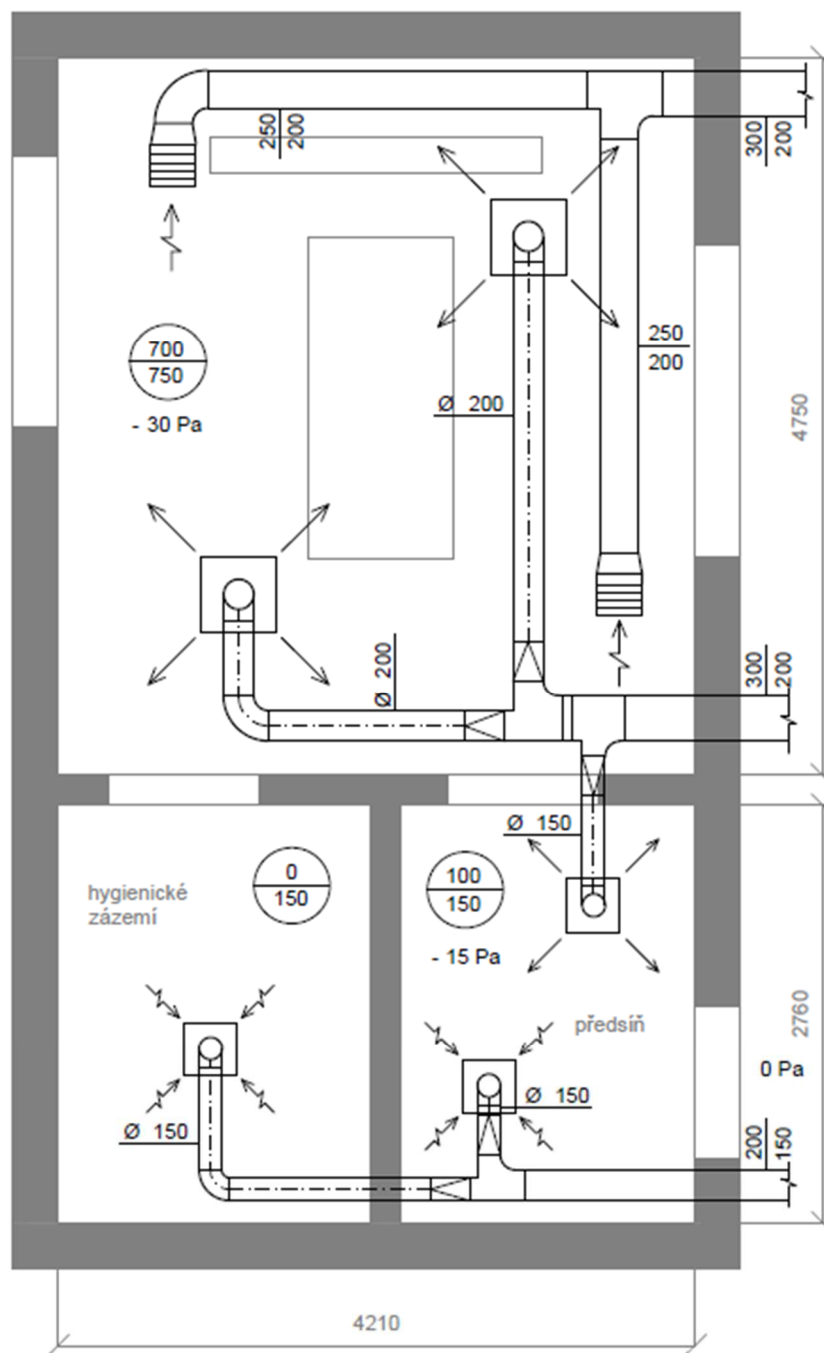
- **Čističky vzduchu**

Z hlediska technických zařízení budov lze zavést některá dodatečná opatření. Patří mezi ně i použití přenosných čističek vzduchu s HEPA filtrem. Mohou pomoci tam, kde nelze zajistit dostatečné větrání. Také lze použít dezinfekci vzduchu pomocí UV záření. (55) Jednou z variant použití dezinfekce UV zářením je instalace lamp do horní části místnosti. Lampy emitují záření pouze u stropu, a ne do zóny pobytu osob. Další možností využití UV záření je dezinfekce cirkulovaného vzduchu, pokud se z nějakého důvodu nelze cirkulaci vyhnout. (87)

C. Příklad – izolační box

Jako příklad je zde popsán izolační box jednotky intenzivní péče pro jednoho pacienta. Nejdůležitější je v tomto případě zajištění podtlaku v místnosti a dostatečná výměna vzduchu. Pro účinné udržení podtlaku je dobré, pokud má místnost předsíň, přes kterou se do ní vstupuje. Zároveň může být místem, kde se personál oblékne do ochranných pomůcek. Rozdíly tlaků mohou být pro správnou funkci monitorované. Pro ochranu pacienta, který je oslabený, je vhodné filtrovat přiváděný vzduch HEPA filtry ve stropních nástavcích. Odpadní vzduch by neměl být cirkulován, nepřípustné je jeho přivádění do jiného prostoru, i v případě, že je filtrován. I na odtahu může být instalován HEPA filtr pro zamezení přenosu patogenů do venkovního prostředí. (88)

Konkrétní hodnoty pro tento příklad jsou uvedeny na obrázku 21 a v tabulce 2, slouží ale pouze pro ilustraci správného přístupu k návrhu, nejsou to přesně vypočítané hodnoty. Poměry přívodu a odvodu vzduchu pro zajištění požadovaného přetlaku jsou zde stanoveny odhadem, pro přesný projekt je nutný výpočet úniku vzduchu netěsnostmi.



Obrázek 21 – Půdorys izolačního boxu s hygienickým zázemím a předsíní

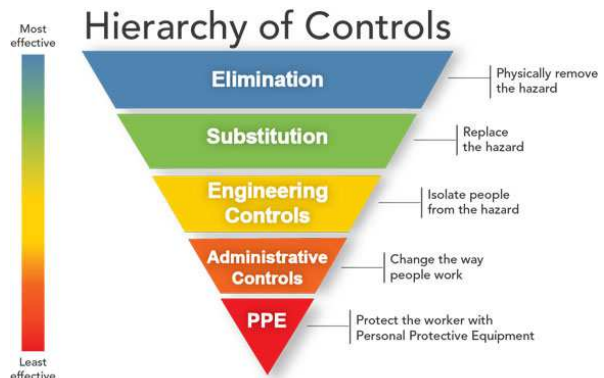
Přívod vzduchu	Odvod vzduchu	Tlakový rozdíl	Filtrace
700 m ³ /h	750 m ³ /h	- 30 Pa	H12
Plocha místnosti	Světlá výška místnosti	Objem místnosti	Intenzita větrání
4,75 x 4,21 m = 20 m ²	3,5 m	70 m ³	≅ 10 h ⁻¹

Tabulka 2 – Údaje k větrání izolačního pokoje

4. Shrnutí opatření proti šíření nemoci Covid-19

Vzhledem k aktuálně probíhající epidemii jsou zde shrnuta opatření týkající se technických zařízení budov, která omezují šíření onemocnění Covid-19. Platí ale i pro další onemocnění, u kterých je možnost aerosolového šíření, proto je tato kapitola zároveň shrnutím nejdůležitějších výše popsaných opatření.

Podle organizace CDC mají na šíření infekcí větší vliv opatření, která zamezují, aby se patogen dostal k člověku. Jsou to tedy i ta, která ovlivňují pole přenosu. Na obrázku 22 je vidět hierarchie opatření. Opatření zajištěná technickými zařízeními budov spadají do žluté kategorie a jsou označena jako efektivnější, než administrativní opatření a nošení osobních ochranných pomůcek. (89)



Obrázek 22 – Hierarchie opatření podle jejich efektivnosti (89)

- **Intenzita větrání**

Nejdůležitějším krokem je zajištění dostatečné intenzity větrání. Mezinárodní společnosti, jako jsou ASHRAE a REHVA ve svých doporučeních (3), (55) rovněž zmiňují důležitost větrání jako prostředku ochrany osob před infekcemi. V případě epidemie je tedy třeba zvýšit intenzitu větrání. Pro kontrolu úrovně kvality vzduchu je vhodné instalovat čidla CO₂, nastavená na sníženou hodnotu – cca 800 ppm, případně i méně.

- **Nastavení provozu vzduchotechniky**

V případě epidemie je třeba pracovat s přívodem 100 % čerstvého vzduchu – tedy vyřadit z provozu směšování vzduchu. Vzduchotechnická zařízení je vhodné nechat puštěná trvale, nebo alespoň prodloužit jejich pracovní dobu. V takové situaci jsou zvýšené energetické nároky druhotným problémem. Lze použít zpětné získávání tepla, u kterého nedochází ke kontaktu dvou proudů vzduchu. Čištění vzduchovodů není třeba. Kontrola teploty v interiéru může zůstat beze změny. Relativní vlhkost by se měla pohybovat mezi 40–60 %. (3), (55)

- **Toalety**

Dále je doporučováno podtlakově větrat hygienická zázemí, případně místnosti, kde se nachází nakažené osoby. Tedy místa, která jsou zdrojem infekčního aerosolu. Toalety by měli být při splachování zavřené víkem, aby bylo zabráněno rozprášení infekčních částic do vzduchu. (3), (55)

- **Filtrace a dezinfekce vzduchu**

Jako doplňkové opatření lze použít různé způsoby filtrace nebo dezinfekce vzduchu. Účinné mohou být čističky vzduchu s HEPA filtrem, případně i dezinfekce UV zářením. U čističek vzduchu je třeba dbát na jejich dostatečnou velikost pro daný prostor. (3)

- **Další opatření**

Na tyto kroky lze navázat dalšími opatřeními. Jsou to administrativní omezení – například snížení obsazenosti budovy, práce z domova, zákaz zpěvu, při kterém se uvolňuje větší množství aerosolu apod. Dále také nošení osobních ochranných pomůcek – zejména zakrytí dýchacích cest.

IV. ZÁVĚR

Zpracovaná rešerše literatury ukázala, že problém šíření infekčních chorob je velmi aktuální a je v něm stále velké množství neznámých. Jeho aktuálnost není dána jen epidemií Covid-19, která probíhá při psaní této práce. I přes pokrok zdravotnictví jsou infekční onemocnění stále hrozbou. Mnoho studií potvrdilo důležitost větrání při prevenci šíření chorob. Jednou z oblastí, která je méně prozkoumaná je aerosolové šíření infekcí a jejich působení na člověka. Jeho vztah k větrání není přesně definován a je polem pro další výzkum. I přes to je ze stávajících zkušeností možné stanovit vhodná opatření pro omezení tohoto šíření infekcí. Důraz na intenzitu větrání je v nich zásadním bodem, na který je třeba myslet při návrhu i užívání budov.

SEZNAM LITERATURY

1. *Přenos původců nákaz*. WikiSkripta. [Online] 5. únor 2016. [Citace: 15. prosinec 2020.]
Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/P%C5%99enos_p%C5%AFvodc%C5%AF_n%C3%A1kaz. ISSN 1804-6517.
2. HOBDAJ, Richard, DANCER, Stephanie. *Roles of sunlight and natural ventilation for controlling infection: historical and current perspectives*. The Journal of Hospital Infection. [Online] 24. červen 2013. [Citace: 15. prosinec 2020.]
Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2013.04.011>.
3. *REHVA COVID-19 guidance document*. REHVA. [Online] 3. srpen 2020. [Citace: 15. prosinec 2020.] Dostupné z: <https://www.rehva.eu/activities/covid-19-guidance/rehva-covid-19-guidance>.
4. LI, Yuguo aj. *Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment – a multidisciplinary systematic review*. Wiley Online Library. [Online] 25. leden 2007. [Citace: 15. prosinec 2020.]
Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2006.00445.x>.
5. *Droplet nucleus*. Wikipedia. [Online] 16. listopad 2020. [Citace: 15. prosinec 2020.] Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Droplet_nucleus.
6. QIAN, Hua, ZHENG, Xiaohong. *Ventilation control for airborne transmission of human exhaled bio-aerosols in buildings*. Journal of Thoracic Disease. [Online] 12. červen 2017. [Citace: 15. prosinec 2020.]
Dostupné z: <https://doi.org/10.21037/jtd.2018.01.24>.
7. VUORINEN, Ville aj. *Modelling aerosol transport and virus exposure with numerical simulations in relation to SARS-CoV-2 transmission by inhalation indoors*. ScienceDirect. [Online] 11. červen 2020. [Citace: 15. prosinec 2020.]
Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104866>.
8. GRALTON, Jan, TOVEY, Euan, MCLAWS, Mary-Louise, RAWLINSON, William D. *The role of particle size in aerosolised pathogen transmission: A review*. Journal of Infection. [Online] 10. prosinec 2010. [Citace: 15. prosinec 2020.]
Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jinf.2010.11.010>.
9. MORAWSKA, Lidia aj. *Size distribution and sites of origin of droplets expelled from the human respiratory tract during expiratory activities*. ScienceDirect. [Online] 18. listopad 2008. [Citace: 15. prosinec 2020.]
Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2008.11.002>.

10. LIU, Li aj. *Short-range airborne transmission of expiratory droplets between two people*. Wiley Online Library. [Online] 11. červen 2016. [Citace: 15. prosinec 2020.] Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/ina.12314>.
11. *Viry*. Wikiskripta. [Online] 15. srpen 2020. [Citace: 18. prosinec 2020.] Dostupné z: <https://www.wikiskripta.eu/w/Viry>. ISSN 1804-6517.
12. *Virus*. Wikipedia. [Online] 17. prosinec 2020. [Citace: 18. prosinec 2020.] Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Virus>.
13. KRAMER, Alex, SCHWEBKE, Ingeborg, KAMPF, Günter. *How long do nosocomial pathogens persist on inanimate surfaces? A systematic review*. BioMed Central. [Online] 16. srpen 2006. [Citace: 18. prosinec 2020.] Dostupné z: <https://doi.org/10.1186/1471-2334-6-130>.
14. *Bakterie*. Wikipedia. [Online] 13. prosinec 2020. [Citace: 18. prosinec 2020.] Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Bakterie#R%C5%AFst_a_mno%C5%B Ee%C3%AD.
15. JOSHI, Sumenda M. *The sick building syndrome*. Indian Journal of Occupational & Environmental Medicine. [Online] 12. srpen 2008. [Citace: 18. prosinec 2020.] Dostupné z: <https://doi.org/10.4103/0019-5278.43262>.
16. KHAN, Hassan Ahmed, BAIG, Fatima Kanwal, MEHBOOB, Riffat. *Nosocomial infections: Epidemiology, prevention, control and surveillance*. ScienceDirect. [Online] 7. leden 2017. [Citace: 18. prosinec 2020.] Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.apjtb.2017.01.019>.
17. VINCENT, Jean-Louis aj. *International Study of the Prevalence and Outcomes of Infection in Intensive Care Units*. Jama Network. [Online] 2. prosinec 2009. [Citace: 18. prosinec 2020.] Dostupné z: <https://doi.org/10.1001/jama.2009.1754>.
18. EICKHOFF, Theodore C. *Airborne Nosocomial Infection: A Contemporary Perspective*. Cambridge University Press. [Online] 2. leden 2015. [Citace: 18. prosinec 2020.] Dostupné z: <https://doi.org/10.1086/646830>.
19. BEGGS, Clive B. aj. *The Use of Engineering Controls to Disinfect Mycobacterium tuberculosis and Airborne Pathogens in Hospital Buildings*. Sage Journals. [Online] 1. leden 2000. [Citace: 18. prosinec 2020.] Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/1420326X0000900106>.
20. *Meticilin-rezistentní zlatý stafylokok*. Wikipedia. [Online] 30. říjen 2020. [Citace: 18. prosinec 2020.] Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Meticilin-rezistentn%C3%AD_zlat%C3%BD_stafylokok.

21. *Nozokomiální nákazy*. Wikiskripta. [Online] 23. říjen 2020. [Citace: 18. prosinec 2020.]
Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Nozokomi%C3%A1ln%C3%AD_n%C3%A1kazy. ISSN 1804-6517.
22. *Nightingale Ward*. Liberal Dictionary. [Online] [Citace: 18. prosinec 2020.]
Dostupné z: <https://www.tekportal.net/nightingale-ward/>.
23. OSTERHOLM, Michael T. *Preparing for the Next Pandemic*. The New England Journal of Medicine. [Online] 5. květen 2005. [Citace: 18. prosinec 2020.]
Dostupné z: <https://doi.org/10.1056/NEJMp058068>.
24. MOSER, Michael R. aj. *An outbreak of influenza aboard a commercial airliner*. Oxford Academic. [Online] 1. červenec 1979. [Citace: 18. prosinec 2020.]
Dostupné z: <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a112781>.
25. TELLIER, Raymond. *Aerosol transmission of influenza A virus: a review of new studies*. The Royal Society Publishing. [Online] 22. září 2009. [Citace: 18. prosinec 2020.] Dostupné z: <https://doi.org/10.1098/rsif.2009.0302.focus>.
26. *Smallpox*. Wikipedia. [Online] 10. prosinec 2020. [Citace: 18. prosinec 2020.]
Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Smallpox>.
27. WEHRLE, P. F., POSCH, J., RICHTER, K. H., HENDERSON, D. A. *An airborne outbreak of smallpox in a German hospital and its significance with respect to other recent outbreaks in Europe*. National Center for Biotechnology Information. [Online] 1970. [Citace: 18. prosinec 2020.]
Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2427800/?page=1>.
28. YU, Ignatius T. S. aj. *Evidence of Airborne Transmission of the Severe Acute Respiratory Syndrome Virus*. The New England Journal of Medicine. [Online] 22. duben 2004. [Citace: 22. prosinec 2020.]
Dostupné z: <https://doi.org/10.1056/NEJMoa032867>.
29. LI, Yuguo aj. *Role of air distribution in SARS transmission during the largest nosocomial outbreak in Hong Kong*. Wiley Online Library. [Online] 14. prosinec 2004. [Citace: 22. prosinec 2020.] Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00317.x>.
30. *Hantavirus*. Wikipedia. [Online] 22. květen 2020. [Citace: 22. prosinec 2020.]
Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Hantavirus>.
31. GREIG, J. D., LEE, M. B. *A review of nosocomial norovirus outbreaks: infection control interventions found effective*. Cambridge University Press. [Online] 4. leden 2012. [Citace: 22. prosinec 2020.]
Dostupné z: <https://doi.org/10.1017/S0950268811002731>.

32. BARKER, J., STEVENS, D., BLOOMFIELD, S. F. *Spread and prevention of some common viral infections in community facilities and domestic homes*. Society for applied Microbiology. [Online] 21. prosinec 2001. [Citace: 22. prosinec 2020.] Dostupné z: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2001.01364.x>.
33. SUN, Yuexia, WANG, Zhigang, ZHANG, Yufeng, SUNDELL, Jan. *In China, Students in Crowded Dormitories with a Low Ventilation Rate Have More Common Colds: Evidence for Airborne Transmission*. Plos One. [Online] 16. listopad 2011. [Citace: 22. prosinec 2020.] Dostupné z: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0027140>.
34. *Tuberkulóza*. Wikipedia. [Online] 23. listopad 2020. [Citace: 22. prosinec 2020.] Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Tuberkul%C3%B3za>.
35. BATES, Joseph B., NARDELL, Edward. *Institutional Control Measures for Tuberculosis in the Era of Multiple Drug Resistance*. CHEST Journal. [Online] 1. prosinec 1995. [Citace: 22. prosinec 2020.] Dostupné z: <https://doi.org/10.1378/chest.108.6.1690>.
36. WELLS, William Firth, RATCLIFFE, Herbert L., CRUMB, Cretyl. *ON THE MECHANICS OF DROPLET NUCLEI INFECTION: II. QUANTITATIVE EXPERIMENTAL AIR-BORNE TUBERCULOSIS IN RABBITS*. Oxford Academic. [Online] 1. leden 1948. [Citace: 30. prosinec 2020.] Dostupné z: <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a119179>.
37. RILEY, R. L. aj. *Aerial dissemination of pulmonary tuberculosis. A two-year study of contagion in a tuberculosis ward*. Oxford Academic. [Online] 1. červenec 1995. [Citace: 30. prosinec 2020.] Dostupné z: <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a117542>.
38. KING, M.-F., NOAKES, C. J., SLEIGH, P. A., CAMARGO-VALERO, M. A. *Bioaerosol deposition in single and two-bed hospital rooms: A numerical and experimental study*. Science Direct. [Online] 16. září 2012. [Citace: 30. prosinec 2020.] Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.09.011>.
39. *Spalničky*. Wikipedia. [Online] 28. prosinec 2020. [Citace: 30. prosinec 2020.] Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Spalni%C4%8Dky>.
40. BLOCH, A. B. aj. *Measles outbreak in a pediatric practice: Airborne transmission in an office*. National Library of Medicine. [Online] 4. duben 1985. [Citace: 30. prosinec 2020.] Dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/3982900/>.
41. DOREMALEN, Neeltje van aj. *Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1*. The New England Journal of Medicine. [Online] 16. duben 2020. [Citace: 30. prosinec 2020.] Dostupné z: <https://doi.org/10.1056/NEJMc2004973>.

42. CHIN, Alex W. H. aj. *Stability of SARS-CoV-2 in different environmental conditions*. The Lancet Microbe. [Online] 2. duben 2020. [Citace: 30. prosinec 2020.] Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S2666-5247\(20\)30003-3](https://doi.org/10.1016/S2666-5247(20)30003-3).
43. MORAWSKA, Lidia, CAO, Junji. *Airborne transmission of SARS-CoV-2: The world should face the reality*. Science Direct. [Online] 7. duben 2020. [Citace: 30. prosinec 2020.] Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105730>.
44. MILLER, Shelly L. aj. *Transmission of SARS-CoV-2 by inhalation of respiratory aerosol in the Skagit Valley Chorale superspreading event*. MedRxiv. [Online] 15. červen 2020. [Citace: 30. prosinec 2020.] Dostupné z: <https://doi.org/10.1101/2020.06.15.20132027>.
45. LI, Yuguo aj. *Evidence for probable aerosol transmission of SARS-CoV-2 in a poorly ventilated restaurant*. MedRxiv. [Online] 22. duben 2020. [Citace: 30. prosinec 2020.] Dostupné z: <https://doi.org/10.1101/2020.04.16.20067728>.
46. SUHAIMI, Nur Faseeha, JALALUDIN, Juliana, LATIF, Mohd Talib. *Demystifying a Possible Relationship between COVID-19, Air Quality and Meteorological Factors: Evidence from Kuala Lumpur, Malaysia*. Aerosol and Air Quality Research. [Online] 7. červenec 2020. [Citace: 30. prosinec 2020.] Dostupné z: <https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.05.0218>.
47. MERS. Wikipedia. [Online] 17. říjen 2020. [Citace: 30. prosinec 2020.] Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/MERS>.
48. KIM, Sung-Han aj. *Extensive Viable Middle East Respiratory Syndrome (MERS) Coronavirus Contamination in Air and Surrounding Environment in MERS Isolation Wards*. Oxford Academic. [Online] 1. srpen 2016. [Citace: 30. prosinec 2020.] Dostupné z: <https://doi.org/10.1093/cid/ciw239>.
49. Anthrax. Wikipedia. [Online] 17. září 2020. [Citace: 30. prosinec 2020.] Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Anthrax>.
50. MESELSON, Matthew aj. *The Sverdlovsk anthrax outbreak of 1979*. Science. [Online] 18. listopad 1994. [Citace: 30. prosinec 2020.] Dostupné z: <https://doi.org/10.1126/science.7973702>.
51. FIELDS, Barry S., BENSON, Robert F., BESSER Richard E. *Legionella and Legionnaires' Disease: 25 Years of Investigation*. American Society for Microbiology. [Online] červenec 2002. [Citace: 30. prosinec 2020.] Dostupné z: <https://doi.org/10.1128/cmr.15.3.506-526.2002>.
52. Legionelóza. Wikipedia. [Online] 27. listopad 2019. [Citace: 30. prosinec 2020.] Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Legionel%C3%B3za>.

53. BENTHAM, R. H., BROADBENT, C. R. *A model for autumn outbreaks of Legionnaires' disease associated with cooling towers, linked to system operation and size*. Cambridge University Press. [Online] 15. květen 2009. [Citace: 30. prosinec 2020.] Dostupné z: <https://doi.org/10.1017/S0950268800056995>.
54. YIALLOUROS, Panayiotis K. aj. *First Outbreak of Nosocomial Legionella Infection in Term Neonates Caused by a Cold Mist Ultrasonic Humidifier*. Oxford Academic. [Online] 19. březen 2013. [Citace: 30. prosinec 2020.] Dostupné z: <https://doi.org/10.1093/cid/cit176>.
55. *ASHRAE Position Document on Infectious Aerosols*. ASHRAE. [Online] 14. duben 2020. [Citace: 1. leden 2021.] Dostupné z: <https://www.ashrae.org/technical-resources/resources>.
56. *Sterilizace (hygienu)*. Wikiskripta. [Online] 29. duben 2019. [Citace: 1. leden 2021.] Dostupné z: [https://www.wikiskripta.eu/w/Sterilizace_\(hygienu\)](https://www.wikiskripta.eu/w/Sterilizace_(hygienu)).
57. THAM, S. aj. *Indoor temperature and health: a global systematic review*. Science Direct [Online] 8. listopad 2019. [Citace: 1. leden 2021.] Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2019.09.005>.
58. COLLINS, K. J. *Low indoor temperatures and morbidity in the elderly*. Oxford Academic. [Online] 1. červenec 1986. [Citace: 1. leden 2021.] Dostupné z: <https://doi.org/10.1093/ageing/15.4.212>.
59. STERLING, E. M., ARUNDEL, A., STERLING, T. D. *Criteria for Human Exposure to Humidity in Occupied Buildings*. Theodor Sterling Associates. [Online] 1985. [Citace: 1. leden 2021.] Dostupné z: <http://sterlingiaq.com/photos/1044922973.pdf>.
60. GUSTAFSON, T. L. aj. *An outbreak of airborne nosocomial varicella*. National Library of Medicine. [Online] říjen 1982. [Citace: 1. leden 2021.] Dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/6289235/>.
61. FRASER, Victoria J. aj. *Evaluation of Rooms with Negative Pressure Ventilation Used for Respiratory Isolation in Seven Midwestern Hospitals*. JSTOR. [Online] listopad 1993. [Citace: 1. leden 2021.] Dostupné z: <https://doi.org/10.2307/30149744>.
62. HOBDDAY, R. A. *The open-air factor and infection control*. The Journal of Hospital Infection. [Online] 9. duben 2019. [Citace: 1. leden 2021.] Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2019.04.003>.

63. WONG, V., STANIFORTH, K., BOSWELL, T. C. *Environmental contamination and airborne microbial counts: a role for hydroxyl radical disinfection units?* The Journal of Hospital Infection. [Online] 18. duben 2011. [Citace: 1. leden 2021.]
Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2011.03.003>.
64. ESCOMBE, A. Roderick aj. *Natural Ventilation for the Prevention of Airborne Contagion*. PLOS Medicine. [Online] 27. únor 2007. [Citace: 1. leden 2021.]
Dostupné z: <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.0040068>.
65. ZMRHAL, Vladimír, LAIN, Miloš. *Prvky větracích a klimatizačních zařízení (II) - 1. část*. TZB info. [Online] 23. duben 2007. [Citace: 1. leden 2021.]
Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vzduchotechnicka-zarizeni/4077-prvky-ventracich-a-klimatizacnich-zarizeni-ii-1-cast>.
66. QIAN, Hua aj. *Dispersion of exhaled droplet nuclei in a two-bed hospital ward with three different ventilation systems*. Wiley Online Library. [Online] 6. únor 2006. [Citace: 1. leden 2021.] Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2005.00407.x>.
67. Medical Advisory Secretariat. *Air cleaning technologies: an evidence-based analysis*. National Center for Biotechnology Information. [Online] 1. listopad 2005. [Citace: 1. leden 2021.]
Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3382390/>.
68. MORAWSKA, Lidia, MILTON, Donald K. *It Is Time to Address Airborne Transmission of Coronavirus Disease 2019 (COVID-19)*. Oxford Academic. [Online] 1. listopad 2020. [Citace: 1. leden 2021.]
Dostupné z: <https://doi.org/10.1093/cid/ciaa939>.
69. *Nařízení vlády č. 93/2012 Sb.* Nařízení vlády, kterým se mění nařízení vlády č. 361/2007 Sb., kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci, ve znění nařízení vlády č. 68/2010 Sb. 26. březen 2012.
70. VILLAFRUELA, José Manuel, OLMEDO, Inés, BERLANGA, Félix A., DE ADANA, Manuel Ruiz. *Assessment of displacement ventilation systems in airborne infection risk in hospital rooms*. Plos One. [Online] 30. leden 2019. [Citace: 1. leden 2021.]
Dostupné z: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0211390>.
71. SAHAI, Dru. *Evidence Brief: Humidifier use in health care*. Public Health Ontario. [Online] duben 2017. [Citace: 1. leden 2021.]
Dostupné z: <https://www.publichealthontario.ca/-media/documents/e/2017/eb-humidifier-hc.pdf?la=en>.
ISBN: 978-1-4606-8773-4.

72. MELICHERČÍKOVÁ, Věra. *Pandemie onemocnění COVID-19 a ochrana veřejného zdraví. Vytápění, větrání, instalace*. 4, 2020, ISSN 1210-1389.
73. NARDELL, Edward A. *Fans, Filters, or Rays? Pros and Cons of the Current Environmental Tuberculosis Control Technologies*. JSTOR. [Online] 21. červen 2016. [Citace: 1. leden 2021.] Dostupné z: <https://doi.org/10.2307/30148345>.
74. PERRY, J. L., AGUI, J. H., VIJAYAKUMAR, R. *Submicron and Nanoparticulate Matter Removal by HEPA-Rated Media Filters and Packed Beds of Granular Materials*. NTRS. NASA. [Online] 1. květen 2016. [Citace: 1. leden 2021.] Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20170005166>.
75. ADAMOVSKEJ, Daniel. *Nucené větrání, teplovzdušné vytápění. Větrání obytných budov*. [přednáška]. Praha. 125TB2. Architektura a stavitelství. Fakulta stavební ČVUT v Praze, 2017.
76. *Technical Resources - Residential*. ASHRAE. [Online] [Citace: 1. leden 2021.] Dostupné z: <https://www.ashrae.org/technical-resources/residentialnew#general>.
77. *Indoor Air in Homes and Coronavirus (COVID-19)*. United States Environmental Protection Agency. [Online] [Citace: 1. leden 2021.] Dostupné z: <https://www.epa.gov/coronavirus/indoor-air-homes-and-coronavirus-covid-19>.
78. Příhoda s.r.o. *Air Tailor 1904*. [software]. 2019 [Citace: 1. leden 2021.] Dostupné z: <https://www.prihoda.com/cs/prihoda-air-tailor/>.
79. *Materiál*. Příhoda. [Online] [Citace: 1. leden 2021.] Dostupné z: <https://www.prihoda.com/cs/material/>.
80. ZMRHAL, Vladimír aj. *Větrání škol v souvislostech*. Praha. Společnost pro techniku prostředí, 2017. ISBN 978-80-02-02718-8.
81. CHEN, Fujiang aj. *Simulation of Airflow Characteristics induced by Fabric Air Dispersion System with Orifices Using Direct Description Method*. Science Direct. [Online] říjen 2017. [Citace: 1. leden 2021.] Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.322>.
82. ČSN EN ISO 14644. - *Čisté prostory a příslušné řízené prostředí*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016. třídicí znak 12 5301.
83. *Sborník technických řešení - Nemocnice s poliklinikou I. a II. typu. Vzduchotechnická zařízení*. Praha. MZ ČR, Zdravoprojekt, 1991.

84. RUBINA, Aleš. *Vzduchotechnické systémy pro čisté prostory operačních sálů*. Brno : Společnost pro techniku prostředí, 2008. ISBN 978-80-02-02065-3.
85. DIN 1946-4. *Ventilation and air conditioning - Part 4: Ventilation in buildings and rooms of health care*. Deutsches Institut für Normung, 2018.
86. MILLER, Shelly L. aj. *Implementing a negative-pressure isolation ward for a surge in airborne infectious patients*. American Journal of Infection Control. [Online] 1. červen 2017. [Citace: 2. leden 2021.]
Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2017.01.029>.
87. MORAWSKA, Lidia aj. *How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimised?* Science Direct. [Online] 21. květen 2020. [Citace: 2. leden 2021.]
Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105832>.
88. Amoeba Lab. *Isolation Rooms*. Anyflip. [Online] 2020. [Citace: 2. leden 2021.]
Dostupné z: <http://anyflip.com/tcjrww/fzmc>.
89. NIOSH. *Hierarchy of Controls*. Centers for Disease Control and Prevention. [Online] 13. leden 2015. [Citace: 2. leden 2021.]
Dostupné z: <https://www.cdc.gov/niosh/topics/hierarchy/default.html>.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 – Koncentrace aerosolu ve vydechovaném vzduchu při různých aktivitách, dle velikosti částic.....	10
Obrázek 2 – Trajektorie vydechovaných částic.....	11
Obrázek 3 – Příklad historického nemocničního oddělení.....	13
Obrázek 4 – Šíření neštovic v nemocnici v Německu.....	16
Obrázek 5 – Obytný komplex Amoy Gardens v Hong Kongu.....	16
Obrázek 6 – Simulace proudění vzduchu při vypuknutí SARS v Amoy Gardens v Hong Kongu.....	17
Obrázek 7 – Bakterie tuberkulózy.....	19
Obrázek 8- Půdorys ordinace, ve které došlo k nákaze spalničkami.....	21
Obrázek 7 – Systém větrání v ordinaci.....	21
Obrázek 10 – Půdorys restaurace v Guangzhou, kde došlo k rozšíření nákazy.....	23
Obrázek 11 – Proudění vzduchu v době přenesení nákazy v restauraci v Guangzhou.....	23
Obrázek 12 – Studie proudění vzduchu v ordinaci dětského lékaře.....	26
Obrázek 13 – Model šíření aerosolových částic od kašlajícího člověka.....	26
Obrázek 14 – Optimální rozmezí hodnot relativní vlhkosti.....	29
Obrázek 15 – Schémata způsobů větrání.....	33
Obrázek 16 – Znázornění šíření aerosolů v místnosti s nedostatečným větráním.....	37
Obrázek 17 – Znázornění šíření aerosolů v místnosti s intenzivním větráním.....	37
Obrázek 18 – Závislost účinnosti filtru HEPA na velikosti částic.....	39
Obrázek 19 – Grafické znázornění dosahu proudu z kruhové textilní vyústky.....	43
Obrázek 20 – Půdorys školní třídy větrané textilní vyústkou.....	44
Obrázek 21 – Půdorys izolačního boxu s hygienickým zázemím a předsíní.....	49
Obrázek 22 – Hierarchie opatření podle jejich efektivnosti.....	50

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – Údaje k větrání školní třídy	44
Tabulka 2 – Údaje k větrání izolačního pokoje	49