



KAKOVOST ZRAKA

Predloga laboratorijske vaje

Laboratorij za ogrevalno, sanitarno in solarno tehniko ter klimatizacijo

doc. dr. Matjaž Prek

Ljubljana, 2013

Kazalo:

Uvod	3
1. Zdravstveni vidik kakovosti zraka	4
2. Zaznavanje kakovosti zraka	4
3. Meje koncentracije onesnažil.....	6
3.1. Ogljikov dioksid	8
4. Kriteriji za določitev potrebne količine zraka za prezračevanje	11
4.1. Število izmenjav zraka	12
4.2. Število ljudi	13
4.3. Mejna koncentracija onesnažil	13
4.4. Zaznana kakovost zraka	14
4.5. Upoštevanje števila ljudi in emisijskih lastnosti stavbe	15
5. Vpliv časovno spremenljive emisije onesnažil	16
5.1. Čas zakasnitve in čas predhodnega prezračevanja	18
5.2. Nekonzervativni sistem	20

Uvod

Zagotavljanje kakovosti zraka ni pomembno samo z vidika ugodja v prostoru, temveč je tudi dejavnik, ki lahko vpliva na zdravje ljudi. V preteklosti so bili osredotočeni predvsem na emisijo bioefluentov zaradi ljudi; sedaj se upošteva tudi emisija drugih virov onesnaževanja zraka, kot so npr. gradbeni materiali, barve, laki, oprema prostorov, stroji in naprave... Potrebno prezračevanje mora zato zagotavljati ustrezno kakovost zraka, kar pa je povezano z rabo energije (segrevanje / ohlajanje, ovlaževanje / razvlaževanje zraka, pogon ventilatorjev). Prav varčevanje z energijo in sodobna gradnja zrakotesnih stavb lahko povzročita nezadostno prezračevanje in slabo kakovost zraka, ki vodi do slabega počutja in povečane obolevnosti ljudi. Vpliv kakovosti zraka na ljudi in njegovo manifestacijo lahko razdelimo na dve kategoriji:

○ *Sindrom bolnih stavb – SBS (Sick Building Sindrom)*

Ta sindrom predstavlja pojav neugodja in nespecifičnih zdravstvenih problemov kot, so npr. slabo počutje, glavobol, suho grlo, dražeča sluznica, problemi z zbranostjo v času zadrževanja v stavbi. Po odhodu iz stavbe po določenem času simptomi izginejo; točnega vzroka za te pojave ne moremo ugotoviti, so pa povezani z bivanjem v določeni stavbi. Daljša izpostavljenost onesnažilom v taki stavbi lahko povzroči nekatera obolenja: infekcijo dihalnih poti, virusna in bakterijska obolenja.

○ *Bolezni, povezane z bivanjem v stavbi – BRI (Building-Related Illness)*

Simptome bolezni je mogoče s kliničnimi preiskavami prepoznati in neposredno povezati z onesnažili v zraku stavbe ali s točno določenim virom onesnažil. Te bolezni imajo lahko dolgo latentno (asimptomatsko) obdobje.

Kakovost zraka v prostoru mora izpolnjevati dve osnovni zahtevi. Prvič, zrak ne sme vplivati na zdravje ljudi. Drugič, ljudje naj zaznavajo zrak kot svež in prijeten. Pri tem obstajajo velike individualne razlike med ljudmi in njihovimi zahtevami. Nekateri preživijo večino časa v istem prostoru, lahko so zelo občutljivi in imajo visoke zahteve glede kakovosti zraka, ki ga dihajo. Zato lahko kakovost zraka podamo na osnovi deleža izpolnjevanja zahtev ljudi. Kakovost zraka je visoka, če je malo ljudi nezadovoljnih in je tveganje za zdravje zanemarljivo.

Kakovost zraka v prostoru ni konstantna. Nanjo vplivajo spremembe v delovanju sistemov v stavbi, aktivnosti prebivalcev in stanje zraka v okolici stavbe. Kakovost zraka lahko nadzorujemo s kombinacijo nadzora virov onesnaževanja zraka in s prezračevanjem. Zahteve za prezračevanje so določene z vplivom onesnažil na zdravje ljudi in z zaznavanjem kakovosti zraka; za načrtovanje prezračevanja upoštevamo najvišjo od obeh vrednosti in zahtevano največjo dopustno koncentracijo onesnažila v zraku.

V tem poglavju je predpostavljeno stacionarno stanje in idealna učinkovitost prezračevanja oziroma da je stopnja izpolnjevanja zahtev za prezračevanje je ena ($\varepsilon = 1$). V praksi je lahko učinkovitost prezračevanja $\varepsilon \neq 1$ in je zato potrebna količina zraka za prezračevanje določena z enačbo:

$$\dot{V}_i = \frac{\dot{V}}{\varepsilon} \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

1. Zdravstveni vidik kakovosti zraka

Izpostavljenost onesnažilom v zraku lahko predstavlja določeno tveganje za zdravje. Neželeni učinki zajemajo različna obolenja ali dolgotrajne škodljive učinke. Lahko se pojavijo tudi drugi škodljivi učinki, kot so npr. okvare voaha ali stalna prisotnost motečih vonjav, ki vpliva na počutje. Da bi omejili tveganje za zdravje sta za prisotnost kemikalij v zraku vzpostavljena seznam najvišjih dovoljenih koncentracij in ustrezna časovna izpostavljenost. Te vrednosti so določene predvsem za industrijske prostore in se nanašajo na lokacijo vira kemikalije, ki se uporablja v proizvodnem procesu. V industrijskih objektih so delavci običajno izpostavljeni vplivu ene ali več kemikalij hkrati. V pisarnah in podobnih prostorih je izpostavljenost delovnih mest glede posameznih onesnažil navadno precej nižja kot v industriji, vendar je značilen širok spekter različnih spojin onesnažil pri nizkih koncentracijah. Zaradi prisotnosti različnih onesnažil je v takem okolju predpisana koncentracija posameznega onesnažila ustrezno nižja. To velja tudi za stanovanja, kjer ljudje preživijo več časa kot na delovnem mestu, in za prostor, kjer bivajo dovezetne osebe (npr. otroci in starejši ljudje).

V primeru večjega števila onesnažil je težko oceniti njihov skupni vpliv na ljudi. Skupni učinek dveh onesnažil je lahko sinergijski ($C > A + B$), aditivni ($C = A + B$), antagonistični ($C < A + B$) ali neodvisni. Zato je najprimernejša metoda za zagotavljanje kakovosti zraka predvsem nadzor nad virom onesnaževanja. To lahko dosežemo z njegovo odstranitvijo / zamenjavo, izolacijo in lokalnim prezračevanjem.

Iz različnih razlogov so nekatere snovi posebno pomembne za zdravje ljudi. Med temi snovmi so predvsem radon, plini iz odlagališč odpadkov (deponijski plin), produkti zgorevanja, tobačni dim, formaldehid, hlapne organske spojine, vlažnost zraka in mikroorganizmi.

2. Zaznavanje kakovosti zraka

Ljudje zaznavajo kakovost zraka z dvema vrstama čutil. Čutila za zaznavanje vonjav se nahajajo v nosni votlini in se odzivajo na več sto tisoč vonjav v zraku. Čutila za splošni »kemični« občutek kakovosti zraka so v sluznici nosu in oči ter so občutljiva za podobno veliko število dražečih snovi v zraku. Skupni odzivi obeh vrst čutil določajo občutek kakovosti zraka: svež in prijeten, iztrošen, zatohel ali dražeč.

Zaznavanje vonjav je subjektivno in je zato težko določiti ustrezne meje sprejemljivosti. Zaznavno kakovost zraka lahko izrazimo kot odstotek nezadovoljnih, to je odstotek ljudi, ki ocenjujejo kakovost zraka v prostoru kot nesprejemljivo. Večino organskih primesi v zraku zaznavamo z vonjanjem, medtem ko zaznavamo prisotnost majhnega števila organskih snovi.

Zato subjektivno ocenjevanje kakovosti zraka z zaznavanjem vonjav ne vključuje vseh onesnažil. Nekaterih zdravju škodljivih snovi, npr. ogljikovega monoksida in radona, ne zaznamo, tudi če so prisotni v visokih koncentracijah. Občutljivost voaha glede na zaznavanje intenzivnosti vonjave lahko določimo glede na subjektivno zaznavanje.

Odvisnost med zaznano intenzivnostjo vonjave s in koncentracijo vonjave c lahko zapišemo s pomočjo potenčnega zakona:

$$s = k \cdot c^n \quad \text{oziroma} \quad \log_{10} s = \log_{10} k + n \cdot \log_{10} c \quad (1)$$

s – intenzivnost vonjave [poljubna enota]

k – konstanta [-]

c – koncentracija [ppm]

n – eksponent, odvisen od vrste vonjave (običajno od 0,2 do 0,7)

Lestvica intenzivnosti vonjav, ki je uporabljena za zaznavanje vonjav, je primerjalna lestvica glede na:

- referenčno vrednost določene vonjave (npr. butanol)
- razmerje dveh različnih koncentracij.

Za ocenjevanje intenzivnosti vira onesnaženja in subjektivnega zaznavanja vonjav je Fanger vpeljal dve novi enoti:

- *olf* (izpeljanka iz latinske besede *olfactus* – vonj) za določitev intenzivnosti vira vonjave, tudi koncentracije in
- *decipol* (izpeljanka iz latinske besede *pollutio* – onesnaženje) za kvantifikacijo subjektivnega zaznavanja vonjave.

Ta sistem enot omogoča vrednotenje onesnažil v zraku, ki jih lahko zaznamo z vonjanjem (ni uporabna za onesnažila brez vonja).

Če je človek edini vir onesnaženja zraka, je mogoče definirati enoto *olf* s pomočjo standardne osebe. Standardna oseba je določena kot povprečna odrasla oseba, ki opravlja pisarniško ali podobno delo v toplotno nevtralnem okolju, ima higienski ekvivalent 0,7 kopeli na dan in ima površino kože 1,8 m². Senzorično onesnaženje zraka, ki ga takšna standardna oseba povzroča, se imenuje 1 *olf*.

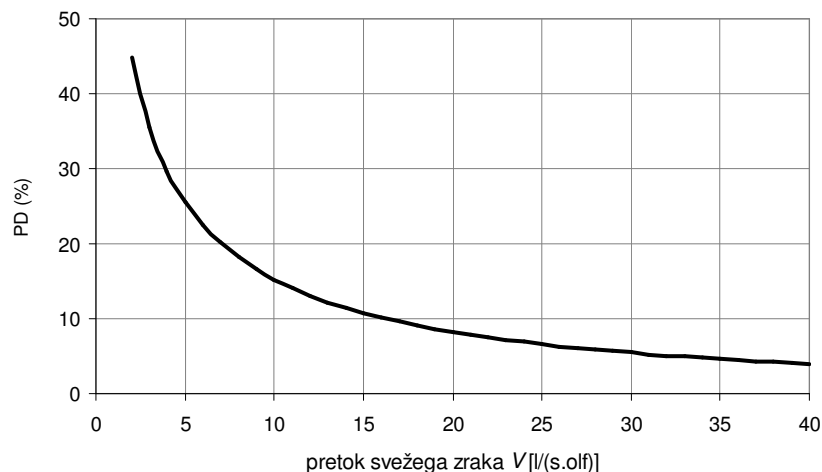
Vpliv večine virov onesnaževanja lahko izrazimo kot ekvivalent te vrednosti, to je potrebno število standardnih oseb (*olf*) za onesnaženje zraka do stanja, ki povzroči enak odstotek nezadovoljnih ljudi zaradi kakovosti zraka kot dejanski vir.

Zaznavna kakovost zraka v prostoru z virom onesnaževanja 1 *olf* pri prezračevanju s pretokom 1 l/s svežega zraka je določena kot 1 *pol* (1 *pol* = 1 *olf*/(l/s)). Zaradi enostavnosti je običajno upoštevana enota *decipol* oz. 0,1 *pol*. Tako je *decipol* določen kot onesnaženje zraka zaradi standardne osebe (1 *olf*) pri prezračevanju 10 l/s svežega zraka.

$$1 \text{ decipol} = \frac{1 \text{ olf}}{10 \text{ l/s}} \quad (2)$$

3. Meje koncentracije onesnažil

Za zrak, onesnažen s človeškimi bioefluenti, lahko določimo odstotek nezadovoljnih glede na emisije standardne osebe v odvisnosti od stopnje prezračevanja (Slika 1).



Slika 1: Odstotek nezadovoljnih v odvisnosti od prezračevanja pri emisiji 1 olf

Krivulja na sliki 1 je določena z enačbo:

$$PD = 395 \cdot \exp(-1.83 \cdot \dot{V}^{0.25}) \quad (3)$$

in velja za $\dot{V} \geq 0,32 \text{ l/(s.olf)}$,

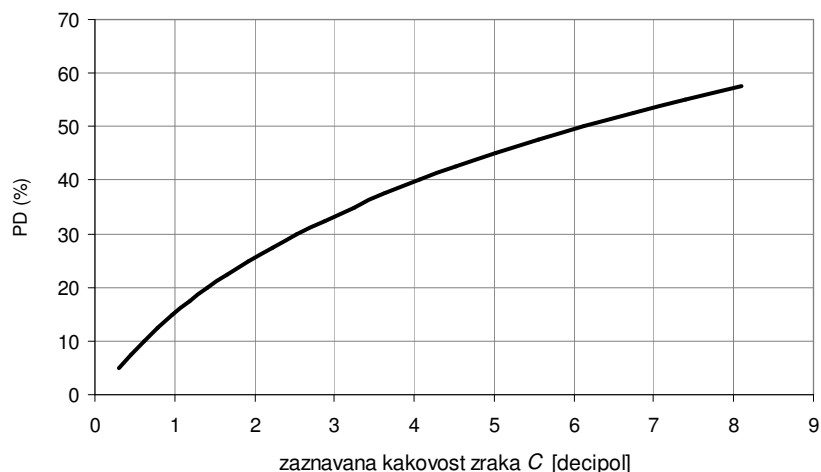
za $\dot{V} < 0,32 \text{ l/(s.olf)}$ je $PD = 100 \%$

Vpliv večine virov onesnaževanja lahko izrazimo kot ekvivalent te vrednosti, to je potrebno število standardnih oseb (olf) za onesnaženje zraka do stanja, ki povzroči enak odstotek nezadovoljnih ljudi kot dejanski vir. Na sliki 1 vidimo, da pri pretoku svežega zraka 10 l/(s.olf) pričakujemo 10 % nezadovoljnih. Zato lahko določimo pričakovan odstotek nezadovoljnih na osnovi zaznane kakovosti zraka:

$$PD = 395 \cdot \exp(-3,25 \cdot C^{-0.25}) \quad (4)$$

Enačba velja za zaznano kakovost zraka $C \leq 31,1$ decipol; za večje vrednosti C je $PD = 100$.

Slika 2 prikazuje povezavo med kakovostjo zraka, izraženo s procenti nezadovoljnih ljudi, in kakovostjo zraka, izraženo v decipolih.



Slika 2: Odstotek nezadovoljnih v odvisnosti od zaznane kakovosti zraka, izražene v decipolih

S pomočjo enačbe (4) lahko določimo zaznano kakovost zraka C v odvisnosti od pričakovanega odstotka nezadovoljnih:

$$C = 112 \cdot \sqrt[4]{\ln(PD) - 5,98} \quad (5)$$

Za določitev potrebnega prezračevanja s stališča zagotovitve ugodja je pomembna določitev želene ravni kakovosti zraka v prezračevanem prostoru. V tabeli 1 je primer treh ravni zaznane kakovosti zraka.

Tabela 1: Tri ravni zaznane kakovosti zraka (primer)

raven kakovosti (kategorija)	zaznana kakovost zraka		potrebni pretok zraka* l/(s.olf)
	% nezadovoljnih	decipol	
A	10	0,6	16
B	20	1,4	7
C	30	2,5	4

* pretok zraka je določen samo na osnovi zaznane kakovosti zraka, pri čemer je upoštevano prezračevanje s čistim svežim zrakom in učinkovitostjo prezračevanja 1.

Vsaka raven (kategorija) ustreza določenemu odstotku nezadovoljnih. V prostorih s skromnejšimi zahtevami lahko zadošča, da se zagotovi kakovost zraka, ki ustreza kategoriji C s približno 30 % nezadovoljnih. V mnogih prostorih bo izbrana kategorija B s 20 % nezadovoljnih; v prostorih z visokimi zahtevami glede kakovosti zraka (kategorija A) je samo okoli 10 % nezadovoljnih. Odločitev o željeni ravni kakovosti zraka v prostoru je odvisna predvsem od uporabe prostora in ekonomskih vidikov.

Zaznana kakovost zraka, podana v tabeli 1, se nanaša na začetno oceno kakovosti zraka ljudi, ki vstopijo v prostor. Prvi vtis je bistvenega pomena oziroma je pomembno, da je kakovost zraka ob vstopu v prostor zaznana kot sprejemljiva. Adaptacija na vonjave običajno poteka prvih 15 minut po vstopu v prostor. Adaptacija na človeške bioefluente je precejšnja, prav

tako se lahko pojavi delna adaptacija na tobačni dim (pri zmernih ravneh). Majhna prilagoditev (ali je ni) je za snovi, ki dražijo sluznico.

Pomembno je tudi to, da nekaterih škodljivih onesnaževalcev zraka ne zaznamo in da senzorični učinek nekaterih škodljivih snovi ni v kvantitativni odvisnosti od njihove toksičnosti. Zato zaznana kakovost zraka ni univerzalno merilo škodljivih učinkov na zdravje. Vendar je tudi res, da zaradi slabe kakovosti zraka lahko izboljšamo stanje z odstranitvijo onesnažila ali povečamo stopnjo prezračevanja in s tem zmanjšamo škodljiv vpliv na zdravje ljudi.

3.1 Ogljikov dioksid

Količina vdihanega zraka je odvisna predvsem od metabolizma oziroma aktivnosti. Mirujoč človek vdiha približno 0,3 m³/h zraka; pri težkem delu se ta količina ustrezno poveča. Pri dihanju znaša delež iz zraka sprejetega kisika 5%, tako da se v pljučih koncentracija kisika v zraku zniža od 21% na 16%. V izdihanem zraku je koncentracija CO₂ približno 4%, pri čemer je približno 100-krat večja kot v vdihanem zraku. Razmerje med oddajo CO₂ in porabo O₂ predstavlja koeficient respiracije:

$$KR = \frac{\text{oddaja CO}_2}{\text{poraba O}_2} = \frac{\dot{V}_{CO_2}}{\dot{V}_{O_2}}$$

KR - koeficient respiracije, določen kot razmerje med volumskim pretokom izdihanega CO₂ in vdihanega kisika ($\dot{V}_{CO_2} / \dot{V}_{O_2}$). *KR* ima vrednosti med 0,7 (poraba maščob za metabolizem pri mirovanju) in nad 1 (poraba ogljikovih hidratov pri težkem fizičnem delu).

\dot{V}_{CO_2} - volumski pretok ogljikovega dioksida (l/min. pri normnih pogojih)

\dot{V}_{O_2} - volumski pretok kisika (l/min. pri normnih pogojih)

Povezavo med porabo kisika in metabolizmom lahko izrazimo tudi z energetskim ekvivalentom (*EE*). Pri povprečnem koeficientu respiracije *KR* = 0,85 je energetski ekvivalent:

$$EE = 5,68 \left[\frac{W \cdot h}{l_{O_2}} \right]$$

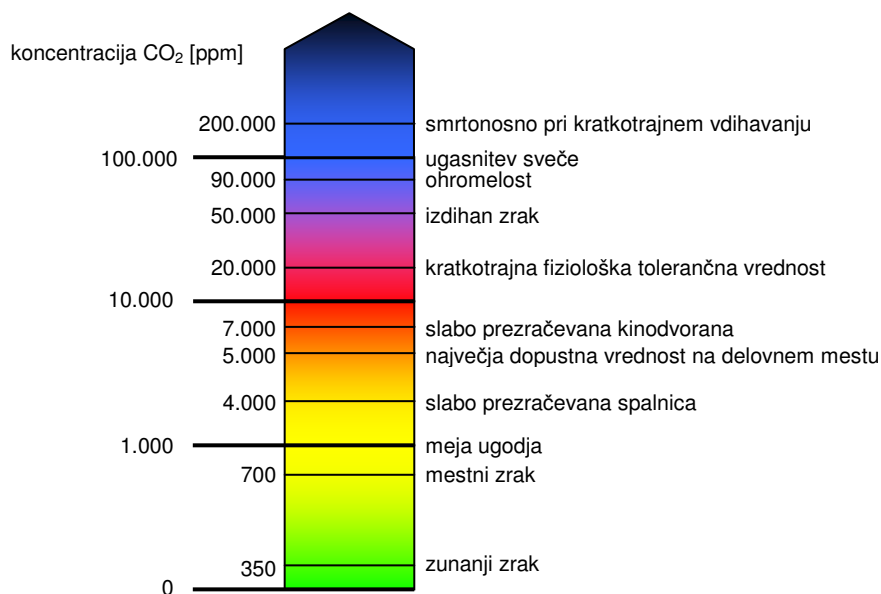
Volumski pretok izdihanega CO₂ - generiranje onesnažila *G* [l/s] - določimo na osnovi aktivnosti oz. metabolizma *M* [W/m²] in površine kože človeka *A_{Du}* [m²]:

$$G = 4 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot A_{Du} \quad (6)$$

Povprečna sedeča odrasla oseba pri lahkem delu (*M* = 70 W/m² in *A_{Du}* = 1,8 m²) izdiha približno 0,005 l/s (18 l/h) CO₂.

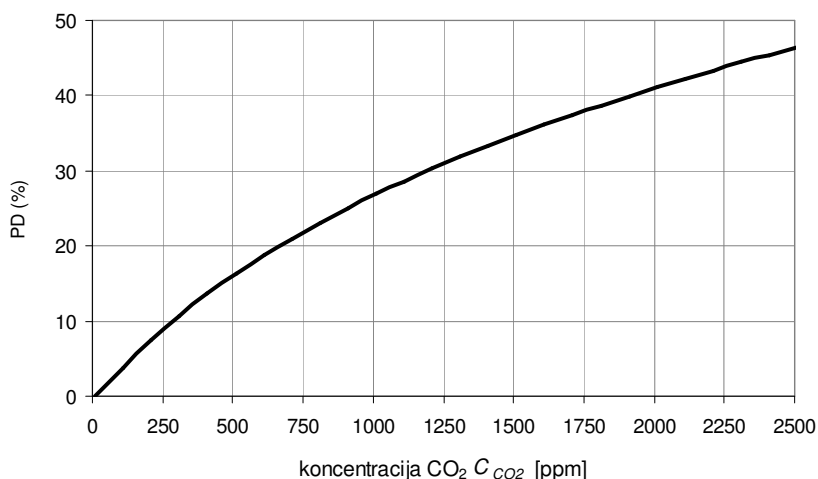
Vpliv ogljikovega dioksida na počutje ljudi je že dolgo časa znano. Že leta 1858 je v Nemčiji Max von Pettenkoffer ugotovil povezavo med koncentracijo CO₂ in počutjem ljudi. Pri koncentraciji pod 0,1 % (1000 ppm) so ljudje počutili ugodno, pri koncentraciji nad 0,2 % neugodno. Zato je predlagal, da koncentracija CO₂ v prostorih, kjer se zadržujejo ljudje, naj

ne presega 1000 ppm (t. i. Pettenkoferjeva vrednost). Pri visokih koncentracijah CO₂ vpliva tudi na zdravje ljudi (slika 3).



Slika 3: Tipične koncentracije CO₂ in vpliv na ljudi

V prostorih, kjer se zadržujejo ljudje, le-ti tudi oddajajo vonjave, ki obremenjujejo zrak. Za vsakdanjo uporabo zadošča ugotovitev, da se s številom ljudi v prostoru povečuje tudi koncentracija vonjav, ki raste približno v enakem razmerju s koncentracijo ogljikovega dioksida. Običajna koncentracija ogljikovega dioksida v zraku je 0,04 %, pri višjih koncentracijah pa že govorimo o slabem zraku (slika 4). Najvišja dovoljena koncentracija ogljikovega dioksida v zraku je 0,14 % in predstavlja dovolj natančno mero za spremljanje koncentracije vonjav v prostoru.



Slika 4: Ogljikov dioksid kot indikator vpliva biofluentov ljudi na zaznano kakovost zraka. Koncentracija CO₂ je v prostoru relativna koncentracija (nad koncentracijo CO₂ v zunanjem zraku, ki je približno 350 ppm). Prikazana odvisnost velja samo za prostore, kjer so ljudje edini vir onesnaževanja.

Povezavo med koncentracijo CO₂ in zaznano kakovostjo zraka C [decipol] lahko določimo za stacionarno stanje s pomočjo števila izmenjav zraka:

$$n = \frac{G_{CO_2}}{c_{CO_2i} - c_{CO_2e}}$$

G – generiranje CO₂ [ppm/h]

c_{CO_2i} – koncentracija CO₂ v prostoru [ppm]

c_{CO_2e} – koncentracija CO₂ v svežem (zunanjem) zraku [ppm]

Ker je število izmenjav zraka: $n = \frac{\dot{V}}{V} \Rightarrow \dot{V} = n \cdot V$

\dot{V} – volumski pretok zraka [m³/h]

V – volumen zraka v prostoru [m³]

in volumski pretok CO₂: $\dot{V}_{CO_2} = V \cdot G_{CO_2}$

lahko zapišemo:
$$n = \frac{\dot{V}_{CO_2}}{V(c_{CO_2i} - c_{CO_2e})}$$

$$n \cdot V = \frac{\dot{V}_{CO_2}}{c_{CO_2i} - c_{CO_2e}} \quad \text{oziroma} \quad \dot{V} = \frac{\dot{V}_{CO_2}}{c_{CO_2i} - c_{CO_2e}}$$

Glede na definicijo onesnaženja zraka: $1 \text{ decipol} = \frac{1 \text{ olf}}{10 \text{ l/s}}$ sledi: $\dot{V} = \frac{G [\text{olf}]}{C [\text{decipol}]}$

Iz zgornjih dveh enačb sledi:
$$\frac{G [\text{olf}]}{C [\text{decipol}]} = \frac{\dot{V}_{CO_2} [\text{m}^3/\text{h}]}{c_{CO_2i} - c_{CO_2e} [\text{ppm}]}$$

Ker po Fangerjevi definiciji standardne osebe kot vir onesnaževanja zraka (1 olf) za to osebo velja, da je volumski pretok izdihanega ogljikovega dioksida $\dot{V}_{CO_2} = 18 \text{ l/h}$, lahko Fangerjevo lestvico kakovosti zraka, izraženo v decipolih, primerjamo s CO₂:

$$C [\text{decipol}] = \frac{c_{CO_2i} - c_{CO_2e} [\text{ppm}]}{\frac{\dot{V}_{CO_2} [\text{l/h}]}{10 [\text{l/s}]}}$$

$$C [\text{decipol}] = \frac{c_{CO_2i} - c_{CO_2e} [\text{ppm}]}{\frac{18 [\text{l/h}]}{36000 [\text{l/h}]}}$$

$$C [\text{decipol}] = \frac{C_{CO2i} - C_{CO2e}}{500} [\text{ppm}] \quad (7)$$

4. Kriteriji za določitev potrebne količine zraka za prezračevanje

Ravnotežna enačba za onesnaženost zraka (izražena v enotah olf in decipol) v prezračevanem prostoru je:

$$C_i = C_0 + 10 \cdot \frac{G}{\dot{V}} \quad (8)$$

C_i – zaznana kakovost zraka v prostoru [decipol]

C_0 – zaznana kakovost zunanjega svežega zraka [decipol]

G – generiranje onesnažila v prostoru in prezračevalnem sistemu [olf]

\dot{V} – pretok dovedenega zunanjega svežega zraka v prostor [l/s]

Za dimenzioniranje je pretok svežega zraka običajno določen na osnovi ravni sprejemljive kakovosti zraka v prostoru tako, da je (na osnovi enačbe (8)):

$$\dot{V} = \frac{10 \cdot G}{(C_i - C_0)} \quad (9)$$

V primeru podanega pričakovanega odstotka nezadovoljnih upoštevamo enačbo (5) za določitev vrednosti zaznane kakovosti zraka v prostoru:

$$C_i = \frac{112}{[5,98 - \ln(PD)]^4} \quad (10)$$

Enačbi (9) in (10) sta uporabni tudi za določitev pretoka svežega zraka za doseganje zelenega ali predpisanega pričakovanega odstotka ljudi, ki ocenjujejo kakovost zraka kot sprejemljivo. Kakovost oz. onesnaženost zunanjega zraka običajno ni upoštevana z izjemo velikih mest z znano onesnaženostjo.

V primeru prezračevanja zaradi zagotavljanja ustrezne koncentracije onesnažila je potreben pretok svežega zraka določen z enačbo:

$$\dot{V} = \frac{G}{(C_i - C_0)} \quad (11)$$

\dot{V} – pretok dovedenega zunanjega svežega zraka v prostor [m^3/h]

G – generiranje onesnažila v prostoru in/ali prezračevalnem sistemu [g/h]

C_i – koncentracija onesnažila v prostoru [g/m^3]

C_0 – koncentracija onesnažila v zunanjem zraku [g/m^3]

Opomba: v enačbi (11) so koncentracije izražene v masnih deležih.

Za določitev potrebne količine zraka za prezračevanje lahko uporabljamo glede na vir onesnažila oziroma namembnost prostora naslednje metode, ki temeljijo na:

- številu izmenjav zraka,
- številu ljudi,
- mejni koncentraciji onesnažila,
- zaznavni kakovosti zraka,
- osnovi števila ljudi in emisijskih lastnosti stavbe

4.1 Število izmenjav zraka

Metoda, temelječa na številu izmenjav zraka, se uporablja predvsem za stanovanjske stavbe. Število izmenjav zraka n [h^{-1}] (ali stopnja prezračevanja) je določena z razmerjem med volumskim pretokom svežega dovedenega zraka \dot{V} in volumnom zraka v prostoru V :

$$n = \frac{\dot{V}}{V} \quad (12)$$

Potrebno število izmenjav določa, kolikokrat se v eni uri zrak v prostoru zamenja s svežim zrakom. Število izmenjav zraka je določeno izkustveno in je odvisno od vrste, obremenjenosti in zasedenosti prostorov, kot je podano v tabeli 2. V času nezasedenosti prostora (odsotnosti ljudi) je zaradi emisije onesnažil gradbenih materialov, opreme prostorov in naprav za zagotavljanje ustrezne kakovosti zraka potrebno vzdrževati t. i. minimalno število izmenjav. S tem se tudi preprečuje tudi nekatere druge škodljive pojavi kot je npr. kondenzacija vodne pare in posledično zidna plesen.

Tabela 2: Število izmenjav zraka v stanovanjskih prostorih – *Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb*

prostor	število izmenjav n [h^{-1}]	
	zasedeno	nezasedeno**
bivalni prostor, spalnica	0,5	0,2
WC, kopalnica	4 do 6*	0,2
kuhinja	0,5 do 20*	0,2

* občasno, odvisno od obremenjenosti

** v času nezasedenosti prostorov minimalno prezračevanje zaradi emisije onesnažil stavbe

Tabela 3: Priporočeni pretoki zraka za stanovanjske stavbe – *SIST EN 15251:2007*

kategorija	število izmenjav zraka*		dnevne sobe, spalnice		odvod zraka (l/s)		
	l/(s.m ²)	n ⁻¹	l/osebo	l/(s m ²)	kuhinja	kopalnica	toaleta
I	0,49	0,7	10	1,4	28	20	14
II	0,42	0,6	7	1,0	20	15	10
III	0,35	0,5	4	0,6	14	10	7

Predpostavljeno neprekinjeno prezračevanje v času zasedenosti objekta

*obe vrednosti sta določeni za višino stropa 2,5 m.

4.2 Število ljudi

Za prostore, v katerih je zrak obremenjen zaradi prisotnosti ljudi, določamo potrebno količino svežega zraka na osnovi potrebne količine svežega zraka na človeka \dot{V}_o in števila ljudi v prostoru N :

$$\dot{V} = N \cdot \dot{V}_o \quad (13)$$

Ta metoda je uporabna predvsem za prostore z veliko gostoto ljudi, npr. kongresne, koncertne, športne dvorane, restavracije. Glede na enačbo (6) je običajno upoštevan pretok svežega zraka na osebo: $\dot{V}_o = 30 \text{ m}^3/\text{h}$.

4.3 Mejna koncentracija onesnažil

Če poznamo vrsto in emisijo onesnažila, lahko določimo potrebno količino svežega zraka na osnovi največje dovoljene koncentracije tega onesnažila (MDK vrednost – mejna dopustna koncentracija). Potrebna količina svežega zraka je določena z enačbo 14:

$$\dot{V} = \frac{G}{(C_{i,\max} - C_0)} \quad (14)$$

\dot{V} – pretok dovedenega zunanjega svežega zraka v prostor [m^3/h]

G – generiranje onesnažila v prostoru in/ali prezračevalnem sistemu [g/h]

$C_{i,\max}$ – dopustna koncentracija onesnažila v prostoru [g/m^3]

C_0 – koncentracija onesnažila v zunanjem zraku [g/m^3]

Ta metoda je uporabna predvsem za onesnažila, ki vplivajo na zdravje ljudi. Primeri mejnih koncentracij so navedeni v tabeli 4 (vir: Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb).

Tabela 4: Dopustne koncentracije notranjih onesnaževalcev zraka (MDK)

onesnažilo		vrednost	enota
ogljikov dioksid	CO ₂	3000	mg/m ³
radon	Rn	400	Bq/m ³
amoniak in amini	NH ₃	50	μg/m ³
formaldehid	H ₂ CO	100	μg/m ³
hlapne organske snovi	VOC	600	μg/m ³
ogljikov monoksid	CO	10	μg/m ³
ozon	O ₃	100	μg/m ³
lebdeči trdni delci	PM10	100	μg/m ³

4.4 Zaznavna kakovost zraka

Za določitev potrebnega prezračevanja s stališča zagotovitve ugodja je pomembna določitev želene ravni kakovosti zraka v prezračevanem prostoru. V tabeli 5 je primer treh ravni zaznane kakovosti zraka.

Tabela 5: Tri ravni zaznane kakovosti zraka (primer)

raven kakovosti (kategorija)	zaznana kakovost zraka	
	% nezadovoljnih	decipol
A	10	0,6
B	20	1,4
C	30	2,5

Zaradi opisane odvisnosti med zaznano kakovostjo zraka in koncentracijo CO₂ v zraku lahko določimo kategorijo kakovosti zraka v prostoru glede na koncentracijo CO₂, kot je za nestanovanjske stavbe podano v tabeli 6 (za kontrolirano prezračevanje s pomočjo regulacije s CO₂ senzorjem) in tabeli 7.

Tabela 6: Priporočene relativne koncentracije CO₂ (nad zunanjo koncentracijo) za posamezne kategorije stavb pri kontroliranem prezračevanju (CO₂ senzor) – *SIST EN 15251:2007*

kategorija	relativna koncentracija CO ₂ ppm
I	350
II	500
III	800
IV	> 800

Tabela 7: Priporočene relativne koncentracije CO₂ za posamezne kategorije kakovosti zraka – *SIST EN 15251:2007*

kategorija	pričakovan odstotek nezadovoljnih PPD	pretok zraka na osebo l/s/osebo	relativna koncentracija CO ₂ ppm	absolutna koncentracija CO ₂ (zunaj 340 ppm) ppm
I	15	10	460	800
II	20	7	660	1000
III	30	4	1190	1530
IV	> 30	< 4	> 1190	> 1530

4.5 Upoštevanje števila ljudi in emisijskih lastnosti stavbe

Metoda določa metodo izračuna potrebne količine svežega zraka ob upoštevanju:

- števila ljudi – vpliv bioefluentov in
- emisije onesnažil zaradi vpliva emisije stavbe in naprav.

Potrebna količina svežega zraka je tako določena z enačbo:

$$\dot{V} = n \cdot \dot{V}_o + A \cdot \dot{V}_s \quad (15)$$

\dot{V} – skupni pretok svežega zraka [l/s]

N – število ljudi v prostoru

\dot{V}_o – pretok svežega zraka na osebo [l/(s.osebo)]

A – neto tlorisna površina prostora [m²]

\dot{V}_s – pretok svežega zraka zaradi emisije [l/(s.m²)]

Tabela 8: Pretok zraka za nestanovanjske stavbe zaradi emisije onesnažil stavbe
SIST EN 15251:2007

kategorija	pretok zraka na osebo \dot{V}_o [l/s/osebo]	pretok zraka zaradi emisije onesnažil stavbe \dot{V}_s [l/(s m ²)]		
		stavba z zelo majhno emisijo onesnažil	stavba z majhno emisijo onesnažil	stavba z veliko emisijo onesnažil
I	10	0,5	1,0	2,0
II	7	0,35	0,7	1,4
III	4	0,2	0,4	0,8
IV	< 4	< 0,2	< 0,4	< 0,8

Stavba ima zelo majhno ali majhno emisijo onesnažil, če so v zaključne plasti notranjih površin vgrajeni materiali z majhno emisijo onesnažil.

Okvirno lahko upoštevamo stavbo z majhno emisijo onesnažil, če vgrajeni naravni materiali z majhno emisijo onesnažil, kot so kamen in steklo ter so izpolnjene naslednje zahteve glede emisije:

- hlapnih organskih snovi (VOC): < 0,2 mg/(m².h),
- formaldehida: < 0,05 mg/(m².h),
- amoniaka: < 0,03 mg/(m².h),
- rakotvornih snovi: < 0,005 mg/(m².h),
- snovi ne oddajajo vonjav (snovi, ki oddajajo vonjave, morajo zagotavljati manj od 15 % nezadovoljnih)

Stavba z zelo majhno emisijo onesnažil je v primeru, če so vgrajeni naravni materiali z zelo majhno emisijo onesnažil, kot so kamen, steklo in kovine (s znano zelo majhno emisijo) ter so izpolnjene naslednje zahteve glede emisije:

- hlapnih organskih snovi (VOC): $< 0,1 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,
- formaldehida: $< 0,02 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,
- aminiaka: $< 0,01 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,
- rakotvornih snovi: $< 0,002 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,
- snovi ne oddajajo vonjav (snovi, ki oddajajo vonjave, morajo zagotavljati manj od 10 % nezadovoljnih)

5. Vpliv časovno spremenljive emisije onesnažil

Onesnažila so lahko konzervativna (inertne snovi, ne sodelujejo v kemičnih reakcijah) in nekonzervativna, ki so lahko podvržena kemičnim reakcijam ali spremembam. Prav tako je lahko vir onesnaževanja časovno spremenljiv zaradi spremembe zastopanosti vira v prostoru, npr. spreminjanje števila ljudi. Vsem tem spremembam mora zaradi zagotavljanja kakovosti zraka slediti tudi ustrezno prezračevanje.

Za enostaven konzervativni sistem lahko zapišemo časovno odvisnost koncentracije onesnažila v prostoru s pomočjo masne bilance:

$$V \cdot dc = (G + \dot{V} \cdot c_e - \dot{V} \cdot c) dt \quad (16)$$

oziroma

$$V \cdot \frac{dc}{dt} = G + \dot{V} \cdot (c_e - c) \quad (17)$$

V – efektivni volumen zraka v prostoru [m^3]

dc – sprememba koncentracije onesnažila

G – generiranje onesnažila v prostoru in/ali prezračevalnem sistemu

\dot{V} – volumski pretok svežega zraka [m^3/s]

c_e – koncentracija onesnažila v zunanjem zraku

c – koncentracija onesnažila v prostoru

dt – časovni korak

S pomočjo enačbe (17) in predpostavljenega idealnega stanja lahko določimo koncentracijo onesnažila v času t :

$$c = \left(\frac{\dot{V} \cdot c_e + G}{\dot{V} + G} \right) \cdot \left\{ 1 - \exp \left[-(\dot{V} + G) \cdot \frac{t}{V} \right] \right\} + c_0 \cdot \exp \left[-(\dot{V} + G) \cdot \frac{t}{V} \right] \quad (18)$$

kjer je c_0 koncentracija onesnažila v prostoru v času $t = 0$ (začetna koncentracija).

Enačbo (18) lahko poenostavimo z upoštevanjem določenih predpostavk:

1. Začetna koncentracija v prostoru je nič ($c_0 = 0$):

$$c = \left(\frac{\dot{V} \cdot c_e + G}{\dot{V} + G} \right) \cdot \left\{ 1 - \exp \left[-(\dot{V} + G) \cdot \frac{t}{V} \right] \right\} \quad (19)$$

2. Začetna koncentracija v prostoru je nič ($c_0 = 0$) in koncentracija v svežem zraku je nič ($c_e = 0$):

$$c = \left(\frac{1}{1 + \frac{\dot{V}}{G}} \right) \cdot \left\{ 1 - \exp \left[- \left(1 + \frac{\dot{V}}{G} \right) \cdot \frac{G \cdot t}{V} \right] \right\} \quad (20)$$

oziroma ob predpostavki, da je $G \ll \dot{V}$:

$$c = \frac{G}{n \cdot V} \cdot \{ 1 - \exp(-n \cdot t) \} \quad (21)$$

3. Koncentracija v svežem zraku je nič ($c_e = 0$) in v prostoru ni emisije onesnažila ($G = 0$):

$$c = c_0 \cdot \exp(-n \cdot t) \quad (22)$$

4. Stacionarno stanje ($t \rightarrow \infty$) oz. dosežena končna koncentracija:

$$c_\infty = \frac{\dot{V} \cdot c_e + G}{\dot{V} + G} \quad (23)$$

V primeru čistega svežega zraka ($c_e = 0$) in predpostavki, da je $G \ll \dot{V}$, lahko zapišemo:

$$c_\infty = \frac{G}{\dot{V}} \quad \text{oziroma} \quad c_\infty = \frac{G}{n \cdot V} \quad (24)$$

5.1 Čas zakasnitve in čas predhodnega prezračevanja

Predvsem v prostorih s spremenljivo obremenitvijo zraka je potrebna ustrezna regulacija prezračevanja. Pri tem ni nujno da delovanje takšnega sistema sovпада z zasedenostjo prostora, temveč lahko deluje z zakasnitvijo ali s predhodnim prezračevanjem glede na vir onesnaževanja in spremenljivostjo zasedenosti prostora.

Čas zakasnitve

V primeru ljudi kot edinega vira onesnaževanja zraka in naravnega prezračevanja prostora v času nezasedenosti, je lahko začetek delovanja prezračevalnega sistema s časovnim zamikom, dokler koncentracija ne doseže meje minimalnih zahtev pri stacionarnem stanju.

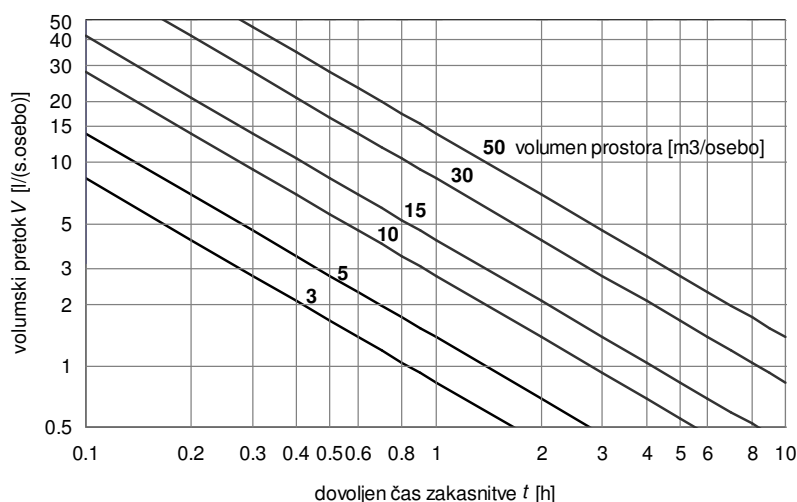
Koncentracija onesnažila c je v tem primeru:

$$c = \frac{G}{V} \cdot t \quad (25)$$

V primeru čistega svežega zraka ($c_e = 0$) in predpostavki, da je $G \ll \dot{V}$ je maksimalni čas zakasnitve dosežen takrat, ko je koncentracija $c = c_\infty$ in je

$$t = \frac{V}{\dot{V}} \quad (26)$$

Enačba (26) oz. čas zakasnitve je grafično prikazan na sliki 5 v odvisnosti od količine svežega zraka na osebo za različne volumne prostora, izražene kot volumen na osebo.



Slika 5: Največji dovoljen čas zakasnitve prezračevanja v odvisnosti od količine svežega zraka na osebo za različne volumne prostora, izražene kot volumen na osebo.

Čas predhodnega prezračevanja

V primeru, ko so notranji viri onesnaževanja neodvisni od ljudi ali njihove aktivnosti, lahko v času nezasedenosti prostora prezračevanje za določen čas ustavimo, pri čemer kakovost zraka ne sme predstavljati nevarnosti za zdravje (pri kratkotrajni izpostavljenosti). Pretok svežega zraka mora zagotoviti ustrezno kakovost zraka v trenutku vstopa ljudi v prostor.

V primeru čistega svežega zraka ($c_e = 0$) in predpostavki, da je $G \ll \dot{V}$ lahko čas predhodnega prezračevanja določimo s preurejeno enačbo (18) tako, da je:

$$c = \left(\frac{G}{\dot{V}}\right) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\dot{V} \cdot t}{V}\right)\right] + c_0 \cdot \exp\left(-\frac{\dot{V} \cdot t}{V}\right) \quad (27)$$

Sledi:

$$\exp\left(-\frac{\dot{V} \cdot t}{V}\right) = \frac{(c \cdot \dot{V} - G)}{(c_0 \cdot \dot{V} - G)}$$

ali

$$t = \left(\frac{V}{\dot{V}}\right) \cdot \ln\left[\frac{(c_0 \cdot \dot{V} - G)}{(c \cdot \dot{V} - G)}\right] = \left(\frac{V}{\dot{V}}\right) \cdot \ln\left[\frac{(c_0 \cdot \dot{V}/G - 1)}{(c \cdot \dot{V}/G - 1)}\right]$$

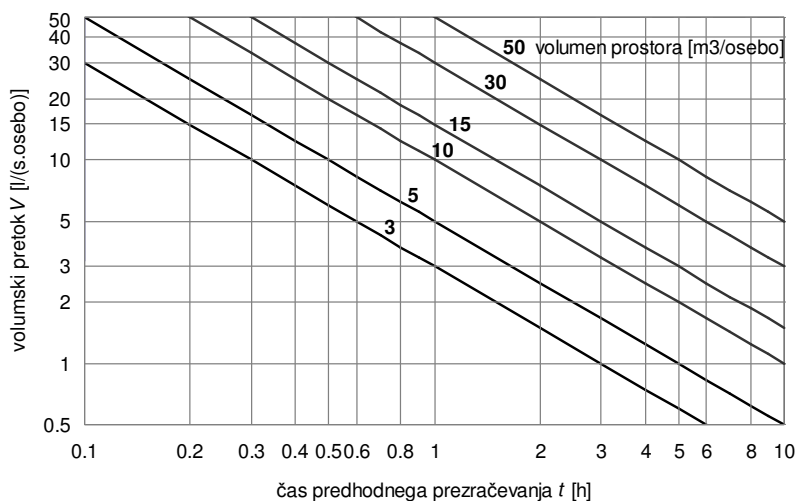
Ker velja za koncentracijo v stacionarnem stanju $c_\infty = G/\dot{V}$ sledi:

$$t = \left(\frac{V}{\dot{V}}\right) \cdot \ln\left[\frac{(c_0/c_\infty - 1)}{(c/c_\infty - 1)}\right]$$

ali

$$t = \left(\frac{V}{\dot{V}}\right) \cdot \ln\left[\frac{(c_0/c_\infty - 1)}{X}\right] \quad (28)$$

kjer je $X = c/c_\infty - 1$ in predstavlja delež povečanja koncentracije nad vrednostjo v stacionarnem stanju. S pomočjo enačbe (28) lahko izračunamo (pozitivni) čas predhodnega prezračevanja. Pri tem moramo upoštevati, da v primeru velikih vrednosti X sicer zmanjšamo dobavni čas, vendar so v tem primeru ljudje izpostavljeni koncentracijam za X večjim mejne vrednosti. V praksi je med dobavnim časom in začetno koncentracijo določen kompromis; priporočena vrednost je $X = 0,25$. Za to vrednost ($X = 0,25$) in začetno koncentracijo $c_0 = 10 \cdot c_\infty$ je na sliki 6 prikazan potreben pretok svežega zraka v l/(s.osebo).



Slika 6: Minimalni čas predhodnega prezračevanja pred zasedenostjo prostora

5.2 Nekonzervativni sistem

Če je onesnažilo podvrženo kemičnim reakcijam ali razpadu se njegova koncentracija s časom zmanjšuje. To zmanjševanje najenostavneje zapišemo kot problem prvega reda, t. j. da je hitrost procesa odvisna od koncentracije:

$$\frac{dc}{dt} = -k \cdot c \quad (29)$$

kjer je k reakcijska konstanta. V tabeli 9 so podane reakcijske konstante za nekatera onesnažila.

Tabela 8: Reakcijske konstante nekaterih onesnažil

onesnažilo	reakcijska konstanta k [h ⁻¹]
NO ₂	0,15
SO ₂	0,23
Rn	0,0076
formaldehid	0,4