

Hingamistakistused

I. Jaotus ja mõõtmismeetodid

Peet-Henn Kingisepp, Jana Kivastik – TÜ füsioloogia instituut

elastne ja mitteelastne hingamistakistus, kopsude venitatavus, hingamistakistuse mõõtmine

Artiklis on antud ülevaade hingamistakistustest ja nende klassikalistest mõõtmismeetoditest. Hingamistakistusi võib nende füüsilise olemuse järgi jaotada elastseks ja mitteelastseks. Elastse takistusena vaadeldakse takistust, mida avaldavad rindkere ja kopsude elastsed kiud ning alveoolide pindpinevus nende väljavenitamisele sissehingamisel. Mitteelastseks takistuseks on hingamisteede kui järjestikku ja paralleelselt ühendatud torude süsteemi takistus õhu voolamisele, kudedes mitteelastne vastupanu (deformatsioon ja hõõrdumine) ning inertts, mis tuleb ületada õhu liikumapanemisel. Hingamisteede takistust saab kaudselt hinnata forsseeritud hingamise voolu-mahu lünga abil. Otseselt saab hingamisteede takistust mõõta kehapletüsmograafia või määrates transpulmonaalset rõhku söögitoru ballooni abil.

Hingamistakistuste all mõistetakse kõiki õhu kopsudesse voolamist takistavaid tegureid, mida nende füüsilise olemuse järgi võib jaotada elastseks ja mitteelastseks takistuseks. Kuigi hingamistakistuse detailsemat käsitlust võib leida mitmetest hingamisalastest käsiraamatutest (1–5), ei ole Eesti Arsti veergudel sellest olulisest küsimusest kirjutatud. Sellepärast on artiklis esitatud lühiülevaade hingamistakistusega seotud suurustest, eestikeelse teemakohase kirjutise leiab lugeja ka füsioloogiapäikust (6).

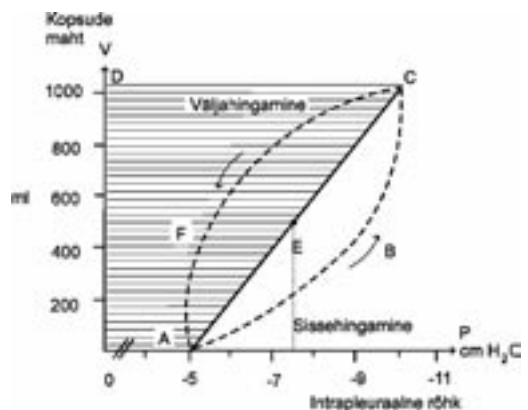
1. Elastne takistus

Elastse takistusena vaadeldakse takistust, mida avaldavad rindkere ja kopsude elastsed kiud ning alveoolide pindpinevus nende venitamisele hingamisel. See vastupanu on vaja ületada kopsude mahu muutuse (suurendamise) esilekutsumiseks. Elastne takistus suureneb, kui kopsude või rindkere on muutunud jäigemaks. Kopsu katva kopsukelme ja rindkereseina seesmist pinda voorderava rinnakelme vahele jääb üliõhukese vedelikukihiga täidetud kopsukelme- ehk pleuraõõs. Atmosfäärirõhust madalama rõhu tõttu pleuraõõnes on kopsud kogu aeg teatud ulatuses välja venitatud ja järgivad rindkere mahu muutusi. **Intrapulmonaalse** ja **intrapleuraalse rõhu diferentsi** nimetatakse **transpulmonaalseks rõhuks**. Kui abstsissile

kanda intrapleuraalse rõhu ja ordinaadile kopsude mahu muutused, saadakse kopsude rõhu-mahu diagramm (vt jn 1). Sirge AC tõus iseloomustab **kopsude venitatavust** (*compliance, C*), mis näitab mahu (*V*) muutust ühe rõhuühiku (*P*) kohta:

$$C = \frac{\Delta V}{\Delta P}$$

Hingamise keskasendi juures on kopsude venitatavus normaalselt ligikaudu 0,2 l/cm H₂O.



Joonis 1. Kopsude rõhu-mahu diagramm. Graafiku tõus ($\Delta V/\Delta P$) iseloomustab kopsude venitatavust (C). Punktirjooned ABC ja CFA näitavad kopsude mahu muutumiseks vajalikku rõhu muutust sisse- ja väljahingamisel. Viirutatud ala OACDO märgib kopsude väljavenitamiseks tehtavat tööd.

2. Mitteelastne takistus

Mitteelastseks takistuseks on hingamisteede kui järjestikku ja paralleelselt ühendatud torude süsteemi takistus õhu voolamisele, kudede mitteelastne vastupanu (deformatsioon ja hõõrdumine) ning inertis, mis tuleb ületada õhu liikumapanemisel.

Hingamisteid jaotatakse ülemisteks ja alumisteks hingamisteedeks. Ülemiste hingamisteede hulka kuuluvad nina- ja neeluruum ning kõri kuni häälekurdudeni. Alumisi hingamisteid jaotakse vastavalt nende diameetrite Weibeli järgi 23 järguks: 0 järguks on trahhea, sellele järgneb 16 järku bronhioole, milles seina paksuse tõttu ei ole võimalik gaasivahetus hingamisteede õhu ja vere vahel. See nn surnud ruum moodustab hingamisteede **õhku juhtiva tsooni**. Hingamisteid alates 17. järgust (respiratoorsetest bronhioolidest) kuni 23. järguni (alveoolideni), kus toimub gaasivahetus alveolaargaasi ja vere vahel, nimetatakse **hingamistsooniks**.

Õhu laminaarsel voolamisel torus on mahtkiirus ehk **õhuvool** (\dot{V}) võrdeline seda põhjustava rõhu diferentsiga ja pöördvõrdeline toru takistusega:

$$\dot{V} = \frac{\Delta P}{R}$$

Eeldusel, et hingamisteed on torukujulised, kirjeldab laminaarset õhuvoolu Poiseuille' seadus. Vaadeldavas torulõigis on õhuvool (\dot{V}) võrdeline voolu põhjustava rõhu diferentsiga lõigu otstes (ΔP) ja toru raadiuse (r) neljanda astmega ning pöördvõrdeline toru pikkuse (L) ja gaasi viskoossusega (η):

$$\dot{V} = \frac{\Delta P \cdot \pi \cdot r^4}{8 \cdot L \cdot \eta}$$

Tegelikult ei ole kopsukoes ja rindkeres tekkiv rõhu lang võrdeline õhuvooluga, vaid sõltub ka kopsude täitumise ulatusest, hingamissagedusest ja mahust. Selle tõttu on hingamise voolutakistus seotud kopsudes oleva õhu hulgaga. Hingamisteede takistuse asukoht on oluline takistuse mõõtmistulemuste interpreteerimisel. Suurim takistus õhuvoolule on hingetorul ja keskmise läbimõõduga (5.–6. järku) bronhioolidel kui hingamisteede suhteliselt väikese summaarse ristlõikepindalaga osadel

(vt jn 2). Hingamisteede hargnemisel, nende järgu suurenemisel väheneb üksiku kopsutoru raadius ja suureneb selle takistus, kuna aga nende arv ja sellega seoses ka summaarne ristlõikepindala kasvab, siis üldtakistus õhuvoolule väheneb ning langeb järsult alates respiratoorsetest bronhioolidest. Hingamisteed diameetriga 2 või vähem millimeetrit moodustavad täiskasvanul kogutakistusest ainult 10–20%. See asjaolu on ka põhjuseks, miks väikeste hingamisteede patoloogilise ahenemise korral on nende takistuse muutust spirograafia abil raske kindlaks teha. Perifeersetes hingamisteedes peab takistuse muutus olema juba märkimisväärne, et üldist hingamistakistust mõjutada.

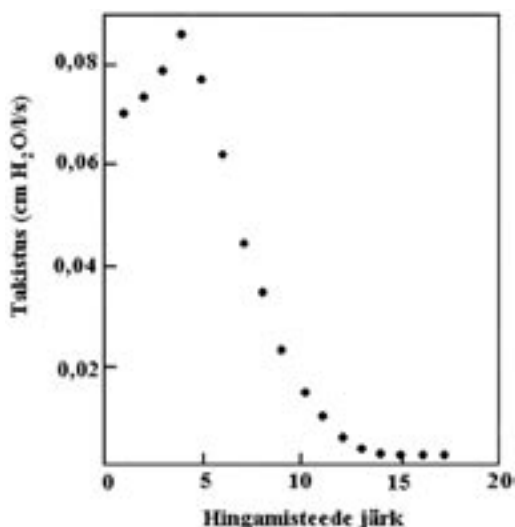
Hingamisteede takistus õhuvoolule (R_{aw}). R_{aw} on väljendatav suu- ja ninaõõnes ning alveoolides oleva rõhu diferentsi ($P_m - P_A$) ja õhuvoolu (\dot{V}) jagatisena:

$$R_{aw} = \frac{(P_m - P_A)}{\dot{V}}$$

Tavalise hingamissügavuse juures on R_{aw} ligikaudu $2 \text{ cm H}_2\text{O} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{s}$, milles on eristatavad paralleel- ja järjestiktakistused. **Kogu järjestiktakistuse** all mõistetakse ninaõõne, kõri ja alumiste hingamisteede takistuste summat. **Paralleeltakistused** summeeruvad parema ja vasaku ninapoole, peabronhi ja kopsudes olevate hingamisteede takistuste pöördväärtustena.

Kopsude elastsuse ajakonstandid. Kopsude õhuga täitumise ja tühjenemise kiirus sõltub nii hingamisteede voolutakistusest (R) kui ka kopsude venitatavusest (C). Takistuse ja venitatavuse korrutis on ajakonstant $\tau = R \cdot C$, mis normaalselt võrdub 0,4 s. Ajakonstant näitab, kui kiiresti täituks või tühjeneks mingi kopsuosa ca 63% ulatuses kogumahust, kui õhuvoolu põhjustavate rõhkude diferents jääks sel ajal muutumatuks. Mida pikem on mingi kopsuosa ajakonstant, seda aeglasemalt see õhuga täitub või tühjeneb ja vastupidi (7, 8).

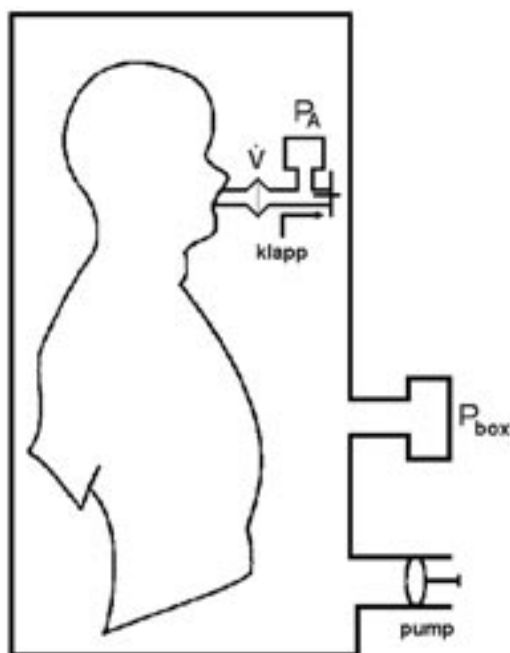
3. Hingamisteede takistuse (R_{aw}) mõõtmine
Hingamisteede ahenemise (obstruktsiooni) korral, mis on üheks levinumaks hingamiseldite pato-



Joonis 2. Hingamisteede takistuse muutus vastavalt hingamisteede järgele (hingamisteede jaotus järkudeks – vt tekst).

loogia avalduseks nii astmaatiliste seisundite kui ka kroonilise obstruktiivse kopsuhaiguse puhul, suureneb nende volutakistus. Hingamistakistust saab kaudselt hinnata forsseeritud hingamise voolu-mahu lünga abil, mille vähenenud õhuvool viitab takistuse suurenemisele. Hingamisteede takistuse otseseks mõõtmiseks on lisaks õhuvoolule vaja registreerida ka seda põhjustav rõhkude diferents, mille väärtused võivad olenevalt meetodikast mõnevõrra erineda. Alljärgnevalt on tutvustatud 1) kehapletüsmograafiat hingamisteede takistuse mõõtmiseks ja 2) intrapleuraalse rõhu määramist söögitoru ballooni abil. Viimasel juhul mõõdetud takistuse väärtus on suurem kui R_{aw} , kuna hõlmab lisaks ka kopsukoe elastset takistust. Peamiselt pediaatrilises praktikas kasutusel olevaid katkestustakistuse (*airway interruption method*) ja forsseeritud ostsillatsioonide meetodit (*forced oscillation method*) tutvustatakse meie artikli teises osas (9).

3.1. Hingamisteede takistuse mõõtmine kehapletüsmograafi abil. Kehapletüsmograafi ja selle töö põhimõtet kopsude residuaalmahu mõõtmisel on kirjeldatud ühes meie varasemas töös (10). Sellepärast on siinkohal esitatud ainult põhimõtteline skeem selle kohta, kuidas kehapletüsmograafi abil mõõdetakse hingamisteede takistust (vt jn 3).



Joonis 3. Kehapletüsmograafi lihtsustatud skeem: pneumotahhograafia mõõdetakse õhuvoolu (\dot{V}), manomeetritega rõhku pletüsmograafis (P_{box}) ja suuõones (P_m), mis klapi sulgemise hetkel loetakse võrdseks rõhuga alveoolides (P_A). Pump on süsteemis kehapletüsmograafi kalibreerimiseks.

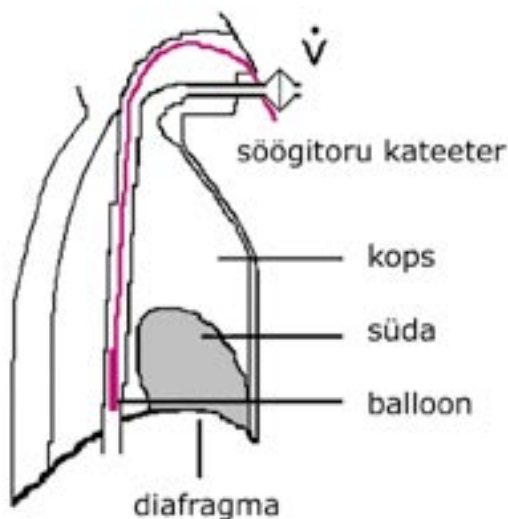
Vaatlusalune istub kehapletüsmograafis ja hingab läbi toru, milles on klapp õhuvoolu sulgemiseks ning manomeeter rõhu mõõtmiseks suuõones (P_m) klapi sulgemise hetkel. Õhuvoolu mõõdetakse pneumotahhograafia ja kambrisisesest rõhku (P_{box}) manomeetriga. Registreeritakse kaks graafikut. Esimene graafik iseloomustab seost õhuvoolu ja P_{box} vahel. Teine graafik näitab P_m ja P_{box} vahelist seost. Hingamistes, suuõone lähedal mõõdetud rõhu muutus (P_m) vastab rõhu muutusele alveoolides (P_A), sest klapi sulgemise ajal võrdsustub rõhk suuõones ja alveoolides, seega $P_m = P_A$. Leitakse mõlema graafiku tõusud $\Delta \dot{V} / \Delta P_{box}$ ja $\Delta P_A / \Delta P_{box}$ ning nende põhjal arvutatakse hingamisteede takistus (R_{aw}):

$$R_{aw} = \frac{\Delta P_A / \Delta P_{box}}{\Delta \dot{V} / \Delta P_{box}} = \frac{\Delta P_A}{\Delta \dot{V}}$$

3.2. Hingamistakistuse leidmine transpulmonaalse rõhu mõõtmise teel.

Sel puhul mõõdetakse õhuvoolu hingamisteedes pneumotahhograafi abil ja rõhku registreeritakse manomeetriga söögitoru alumisse kolmandikku viidud balloonist (vt jn 4).

Rõhu muutused söögitorus on väga lähedased pleuraõõnerõhu muutustele. Transpulmonaalse rõhu saamiseks on vaja mõõta ka rõhku suuõõnes. Kateeter, mille otsas on umbes 0,5 ml õhu või vedelikuga täidetud balloon, viiakse sisse katsealuse nina kaudu. Automaatsüsteemid lubavad pidevalt registreerida õhuvoolu, mahu ja rõhu muutusi ajas ning leida ka nendevahelisi seoseid. Rõhu ja õhuvoolu graafik iseloomustab hingamistakistust ning mahu ja rõhu graafik hingamissüsteemi venitatavust (vt jn 1), millelt saab leida ka hingamisel tehtavat tööd.



Joonis 4. Hingamisteede takistuse ja venitatavuse mõõtmine söögitoru kateetri abil. Kateeter peab asetsema söögitoru alumises kolmandikus diafragmast kõrgemal, nii peegeldab rõhu muutus söögitorus rõhu muutusi pleuraõõnes. Pneumotahhograafi abil registreeritakse õhuvoolu (V).

Artikli valmimist on toetanud ETF (grant nr 5684).

Kirjandus

1. Hlastala MP, Berger AJ. Physiology of respiration. New York, Oxford: Oxford University Press; 1996.
2. Hughes JMB, Pride NB. Lung function tests. Physiological principles and clinical applications. London, Edinburgh, New York, Philadelphia, Sydney, Toronto: Saunders WB; 2000.
3. Bouhuys A. The physiology of breathing. New York, San Francisco, London: Grune & Stratton; 1977.
4. West JB. Respiratory physiology. The essentials. Philadelphia, Baltimore, New York, London, Buenos Aires, Hong Kong, Sydney, Tokyo: Lippincott Williams & Wilkins; 2000.
5. Conrad SA, Kinasewitz GT, George RB. Pulmonary function testing. Principles and practice. New York, Edinburgh, London, Melbourne: Churchill Livingstone; 1984.
6. Schmidt RF, Thews G. Inimese füsioloogia. Tõlke toimetaja O. Imelik. Tartu: 1997.
7. Scarpelli EM. Pulmonary physiology. Philadelphia: Lea & Febiger; 1990.
8. Arets HGM., van der Ent CK. Measurements of airway mechanics in spontaneously breathing young children. *Pediatr Respir Reviews* 2004;5:77-84.
9. Kivastik J, Kingisepp P-H, Vasar M. Hingamistakistused II. Hingamistakistuse mõõtmine väikelastel. *Eesti Arst* 2005;84:563-567.
10. Kingisepp P-H, Kivastik J, Pert V. Kopsude jääkmaht, totaalkapatsiteet ja nende mõõtmine. I Mõõtmise meetodika ja mõõtmistulemuste tähendus. *Eesti Arst* 2002;81:269-74.

Summary

Respiratory resistance. I Classification and methods of measurement

This is a review of the factors determining the resistance of the respiratory system and of the possibilities to measure it. Most of the work of breathing is spent for overcoming the elastic resistance of the lungs and the thoracic cage. The ability of the lung to stretch is called compliance (defined as the volume change per unit of pressure change across the lung). Another factor, non-elastic or viscous resistance depends on the resistance of the airways to air flow, the resistance of tissues as they slide over each other, and inertance. Airway resistance is the pressure difference between the alveoli and the mouth divided by air flow rate. The pressure – flow characteristics for laminar flow are well described, and resistance to flow is critically dependent upon the radius of the tube. As airway narrowing is one of the most com-

mon symptoms in persons with respiratory disease, it is crucial to have possibilities to assess changes in airway resistance.

Body plethysmography is a method for direct measurement of airway resistance. The subject seated in the body plethysmograph (box) breathes through a pneumotachograph, at the same time pressure in the alveoli and in the box are measured. Respiratory resistance can also be measured during normal breathing from an intrapleural pressure record obtained with an esophageal balloon. However, in this case, tissue viscous resistance as well as airway resistance are included. The methods used for measurement of respiratory resistance in small children are dealt with in the second part of the paper.

Peet-Henn.Kingisepp@ut.ee