



Samuel Räsänen, Roni Ståhl

Silmänpainemittausmenetelmien esittelyä ja vertailua

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Tieto- ja viestintäteknikka

Insinöörityö

10.5.2022

Tiivistelmä

Tekijät: Samuel Räsänen, Roni Ståhl
Otsikko: Silmänpainemittausmenetelmien esittelyä ja vertailua
Sivumäärä: 54 sivua + 1 liite
Aika: 10.5.2022

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Tieto- ja viestintäteknikka
Ammatillinen pääaine: Hyvinvointi- ja terveysteknologia
Ohjaajat: Lehtori Juha Havukumpu

Insinööriyön tavoitteena oli kirjoittaa kirjallisuuskatsaus, jossa esitellään silmänpainemittauksen, eli tonometriä, keskeiset menetelmät ja laitteet, sekä vertaillaan niitä keskenään saatavilla olevan tieteellisen aineiston perusteella. Lopputuloksen haluttiin olevan tietopaketti, joka antaa hyvän kokonaiskuvan aiheesta myös aikaisemmin perehtymättömälle lukijalle.

Työn aikana tietoa aiheesta kerättiin lääketieteellisten tietokantojen kautta löydetyistä julkaisuista, sekä muutamien muiden lääketieteellisten julkaisijoiden verkkoaineistoista. Kerättyä tietoa tarkasteltiin, vertailtiin ja käsiteltiin kirjallisuuskatsauksen periaatteiden mukaisesti.

Lopputuloksena syntyi kirjallisuuskatsaus, joka jakautuu pääpiirteittäin kolmeen osioon: aiheen esittelyyn, menetelmien esittelyyn ja laitteiden vertailuun. Aiheen esittelyssä käydään läpi tonometriä perusteet sekä historiaa, menetelmien esittelyssä eri menetelmien ominaispiirteet ja laitteiden vertailussa syvennytään silmänpainemittarin valintaan vaikuttaviin tekijöihin sekä vertaillaan, miten eri mittarit suoriutuvat eri tilanteissa.

Jatkossa työn lopputuloksena syntyneitä materiaaleja voidaan käyttää hyödyksi ai-hetta käsittelevillä ammattikorkeakoulun kursseilla.

Avainsanat: Silmänpaine, tonometria, tonometriä menetelmät

Abstract

Authors: Samuel Räsänen, Roni Ståhl
Title: Review and comparison of tonometry methods
Number of Pages: 54 pages + 1 appendice
Date: 10 May 2022

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Information and Communication Technology
Professional Major: Health Technology
Supervisors: Juha Havukumpu, Senior Lecturer

The objective of this thesis was to review and compare intraocular pressure measurement methods and tonometers utilizing them. The study was carried out as a descriptive literature review. Material was gathered using multiple scientific literature databases and a few other scientific internet publications. The aim was to create a comprehensive source of information understandable even for a reader with no previous knowledge of the subject.

Material was collected, compared and then formulated into the thesis using the principles of a literature review.

The resulting thesis is divided into 3 different parts: introduction into tonometry, different type of tonometry methods and comparison of tonometers.

The thesis can be used as as learning material about tonometry during future courses in universities of applied sciences.

Keywords: Intraocular Pressure, IOP, Ocular Tonometry, Tonometry Methods

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Silmän rakenne ja silmänpaine	2
2.1	Silmänpaineen fysiologia	3
2.2	Glaukooma	5
3	Silmänpainemittauksen historia	7
4	Tiedonhakuprosessi	12
5	Tonometrin keskeiset menetelmät	14
5.1	Indentaatiotonometria	15
5.2	Applanaatiotonometria	17
5.3	Kimmoketonometria	24
5.4	Ilmapuhallustonometria	28
5.5	Pneumatonometria	33
5.6	Dynaaminen ääriiviivatonometria (DCT)	34
5.7	Jatkuva silmänpaineen seuranta	36
5.8	Laitteiden luokittelu menetelmittäin	38
6	Tonometriamenetelmien ja laitteiden vertailua	39
6.1	Kustannukset	39
6.2	Helppokäyttöisyys, kannettavuus, nopeus, huollontarve	40
6.3	Potilaan yhteistyökykyisyys	41
6.4	Mittaus eri asennoissa	42
6.5	Infektoriskit	43
6.6	Tarkkuus	44
6.6.1	Mittausaika	46
6.6.2	Silmän ominaisuuksien vaikutus	48
7	Yhteenveto	52
	Lähteet	55
	Liitteet	
	Liite 1. Tonometrivalintataulukko	

Lyhenteet

- CCT: *Central Corneal Thickness*. Sarveiskalvon paksuus.
- CRF: *Corneal Resistance Factor*. Parametri, joka kuvaa sarveiskalvon kykyä vastustaa ulkoisen voiman vaikutuksesta aiheutuvaa muodonmuutosta.
- DCT: *Dynamic Contour Tonometry*. Dynaaminen ääriivatonometria. Tonometrian menetelmä, joka hyödyntää ääriviivojen sovittamista silmänpaineen mittaamiseen.
- GAT: *Goldmann Applanation Tonometer*. Goldmann-applanaationometri. Silmänpainemittauslaitteiden kultainen standardi. Kliinisen standardin referenssi tonometrejä arvioidessa.
- NCT: *Non-Contact Tonometry*. Kontaktiton tonometria. Silmänpaineenmittausmenetelmä, jolla mittaus suoritetaan ilman kontaktia sarveiskalvoon.
- IOP: *Interocular Pressure*. Silmänsisäisen nesteen paine, eli silmänpaine.
- OPA: *Ocular Pulse Amplitude*. Silmän pulssin amplitudi.
- ORA: *Ocular Response Analyzer*. Ilmapuhallustonometri, joka tarjoaa myös lisätietoa silmän biomekaanisista ominaisuuksista.
- CST: *Corneal Visualization Scheimpflug Technology*. Corvis ST on Scheimpflug-kameraa hyödyntävä ilmapuhallustonometri.
- OBF: *Ocular Blood Flow -pneumatometri*. Pneumatometri, jonka mitaukset tarjoavat myös tietoa silmän pulssista.

1 Johdanto

Tässä insinööriyössä kartoitetaan ja yhdistellään silmänpainemittaukseen liittyvää kirjallisuutta. Tavoitteena on koota laajemmasta määrästä irrallista tietoa yhtenäinen tietopaketti, josta lukija saa hyvän yleiskäsityksen silmänpaineen mittaamiseen käytetyistä menetelmistä, niiden toimintaperiaatteista ja ominaisuuksista. Koostettu tietopaketti pyritään esittämään tiiviissä ja selkokielisessä muodossa, jotta työn sisältöä voitaisiin käyttää opetusmateriaalina.

Silmänpainetutkimuksessa, eli tonometriassa (Ocular Tonometry) mitataan silmänsisäisen nesteen paineen (IOP) suuruutta. Mittauksen tuloksen (mmHg, elohopeamillimetri) perusteella voidaan arvioida potilaan riskiä glaukooman, eli silmänpainetaudin kehittymiselle [1].

Glaukoomassa potilaan näköhermon vaurioituminen johtaa näkökentän sumenemiseen ja hämärtymiseen sekä pahimmassa tapauksessa jopa sokeutumiseen. Sairauden alkuvaiheessa näön huonontuminen ei välttämättä ole niin huomattavaa, sillä oireita voi ilmetä vain toisessa silmässä. Näköhäiriöt voivat johtua muistakin sairauksista. Tämän vuoksi silmänpaineen mittaaminen on tärkeä työkalu glaukooman poissulkemisessa. [1.]

Henkilö voi sairastaa glaukoomaa, vaikka silmänpaine olisi normaalien rajojen sisällä (noin 10–21 mmHg). Tällöin silmän rakenteiden paineensietokyky on usein heikentynyt, ja tauti voi normaalista paineesta huolimatta aiheuttaa näkövaurioita. Kohonnut silmänpaine on kuitenkin selkeästi isoin riskitekijä glaukooman kehittymiselle ja yli 30 mmHg:n silmänpaine 40-kertaistaa riskin sairastua glaukoomaan. Muut yleiset riskitekijät, kuten diabetes, likinäköisyys ja perimä puolestaan 2–6 kertaistavat riskin sairastua glaukoomaan. [1.]

Tonometriassa käytetään useita eri menetelmiä silmänpaineen mittaamiseen, ja oikean menetelmän valinta tulisi tehdä ottaen huomioon vallitsevat olosuhteet, kuten potilaan terveydentila ja aiemmin tehdyt kliiniset toimenpiteet, jotka saattavat osaltaan vaikuttaa mittaustuloksen luotettavuuteen. Mittaustuloksen tarkkuuteen vaikuttaa usea tekijä, kuten esimerkiksi potilaan yhteistyökykyisyys –

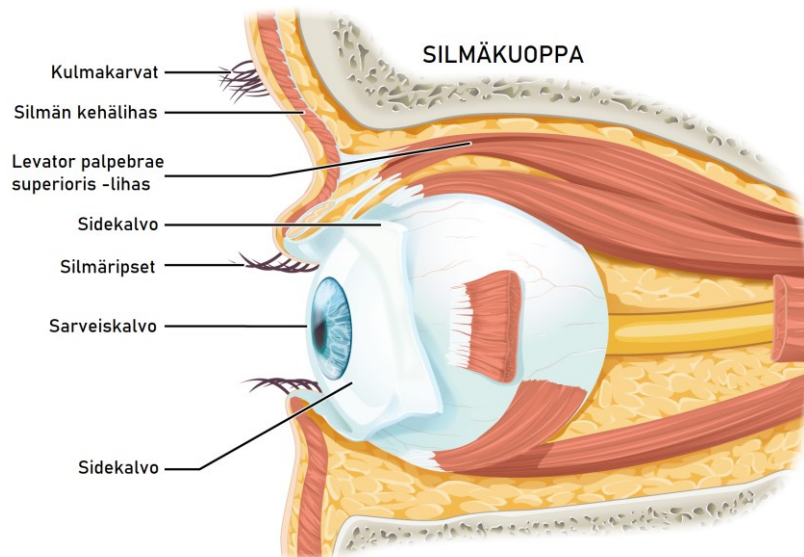
esimerkiksi lapselle tehtävään mittaukseen sopii nopea menetelmä, joka ei vaadi potilaalta pitkäkestoista paikallaanpysymistä.

Tonometrian menetelmien vertailulla pyritään tunnistamaan edellä mainitun kaltaisia mittaustulokseen vaikuttavia tekijöitä, jotka voivat heikentää mittaustuloksen laatua ja luotettavuutta. Työssä kerättyä tietoa on tarkoitus käyttää opetusmateriaalina silmänpainemittausmenetelmiin tutustuessa. Työn vertailuosuutta voidaan myös tilannekohtaisesti hyödyntää sopivan silmänpainemittausmenetelmän kartoittamisessa tai valinnassa.

2 Silmän rakenne ja silmänpaine

Näköaisti on luonnollisesti ihmisen keskeisimpiä aisteja, sillä suurin osa ympärilämme olevasta informaatiosta välittyy aivoihin näköhavaintojen avulla.

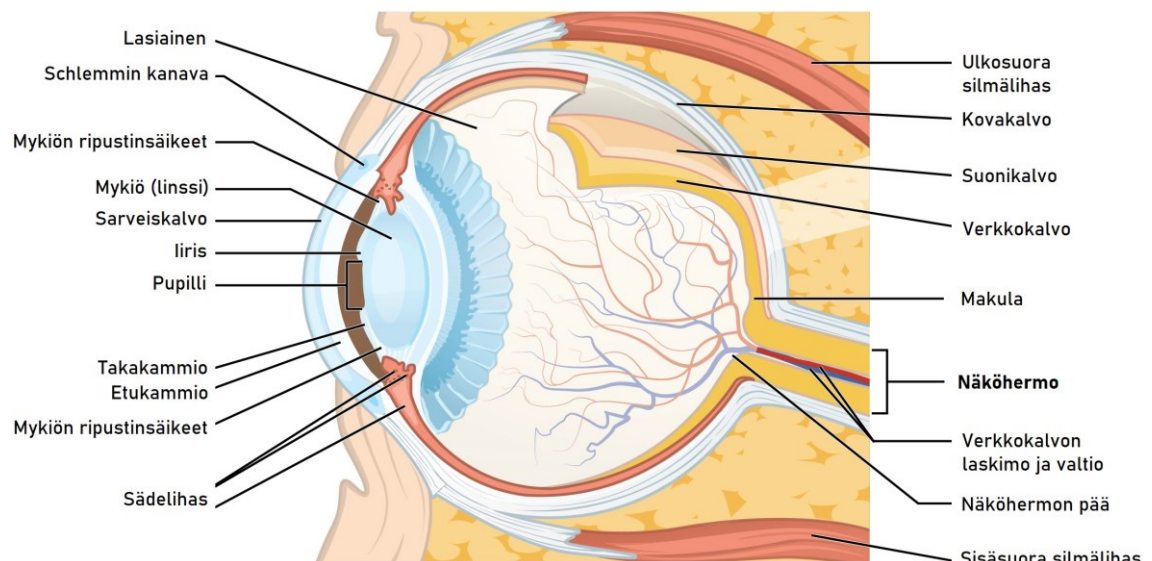
Halkaisijaltaan noin 25 mm:n pituinen silmämuna sijaitsee suojassa (ks. kuva 1), kallon luusta muodostuvassa silmäkuopassa, jonka reunalta ulospäin näkyvää silmän osaa suojaavat ylä- ja alaluomet, silmäripset sekä kulmakarvat. [2.]



Kuva 1. Silmän ulkoiset rakenteet [3].

Silmälle sen ominaisvärin antava iiris (värikalvo) säätelee silmän sisäosiin pääsevän valon määrää. Se toimii kuin kameran himmennin iiriksen keskiosassa

sijaitsevalle pupillille, jonka kautta valo pääsee etenemään syvemmällä silmässä sijaitseviin rakenteisiin. Pupillin läheisyydessä sijaitsevat läpikuultavat linssit (mykiö ja sarveiskalvo) taivattavat sisään tulevan valon verkkokalvolla sijaitsevaan makulaan, eli tarkan näkemisen alueelle (ks. kuva 2). Tällöin silmän tuottama kuva muodostuu tarkan näkemisen alueelle ja taittovirheeksi kutsutaan tilannetta, jossa silmän etuosa taivtaa valon väärään kohtaan verkkokalvoa. [2.]



Kuva 2. Silmän sisäiset rakenteet [4].

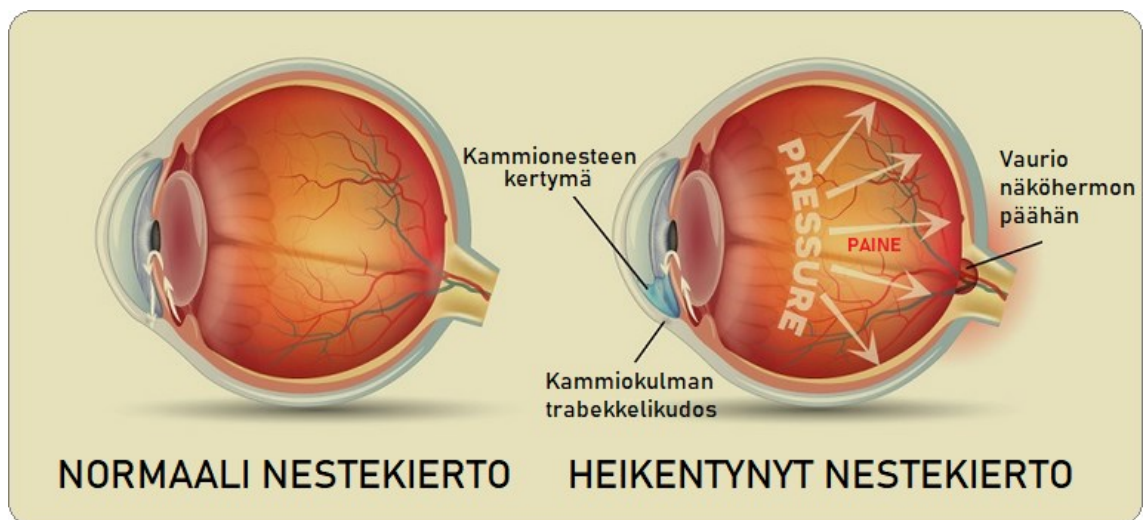
Verkkokalvo on fotorseptoreista (aistinsoluista) muodostuva pinnoite, joka peittää silmän sisäpinnan takaosan kuin tapetti. Verkkokalvolle heijastettu aistimuksesta muodostettu kuva kulkeutuu näköhermon kautta aivojen takaosassa sijaitsevaan näkökeskukseen, jossa silmien tuottamasta tiedosta kootaan kasaan lopullinen näköhavainto. [2.]

2.1 Silmänpaineen fysiologia

Sopiva silmänpaine ylläpitää silmän pallomaista muotoa, mutta liian korkea silmänpaine aiheuttaa silmän rakenteisiin vaurioita, jotka kohdistuvat pääosin silmän takaosassa sijaitsevaan näköhermon päähän. Kohonnut silmänpaine aiheuttaa oletettavasti suoria haitallisia painevaikutuksia hermosäikeisiin ja heikentää silmän näköhermon pään verenkiertoa sekä aineenvaihduntaa. [1.]

liriksen takana oleva sädekehä tuottaa silmän nestekiertoa ylläpitävää kammionestettä, jonka tehtävä on kuljettaa happea ja ravintoaineita silmän etuosassa sijaitseviin verisuonettomiin läpikuultaviin linsseihin. Iiris jakaa kammionesteen keskeltä kahteen eri osa-alueeseen: etukammioon ja takakammioon. [5.]

Etukammion kautta kammioneste poistuu silmästä iiriksen ja sarveiskalvon rajalla olevan kammiokulman trabekkelikudoksen läpi Schlemmin kanavaan, josta kammioneste jatkaa matkaansa silmän etupuolen laskimoihin. Tämä kammiokulman kautta liikkuva ulosvirtaus tunnetaan trabekulaarisena, eli konventionaalisenä ulosvirtauksena. Sädelihaksen ja kovakalvon läpi ulkoisiin laskimoihin määrällisesti huomattavasti pienempää ulosvirtausta kutsutaan puolestaan uveoskleraaliseksi virtaukseksi. Kohonnut silmänpaine aiheutuu silmän neste-kierron eli ulosvirtauksen heikkenemisen seurauksena (ks. kuva 3), kun kammionesteen tuotanto pysyy normaalilla tasolla. [5.]



Kuva 3. Silmän trabekulaarisen ulosvirtauksen heikkenemisen seuraukset [6].

Silmänpainetta alennetaan silmän nestekierron nopeuttamisella, eli kammionesteen ulosvirtauksen parantamisella. Vaurioita syntyy helposti etenkin näköhermon päähän, jos silmänpaine on pidemmän aikaa liian korkea. Lisäksi hoitamaton korkea silmänpaine voi aiheuttaa vaurioita silmän hermosäiekerrokseen ja lopulta myös näkökenttään, mikä aiheuttaa pahimmillaan täydellisen sokeutumisen. [7.]

2.2 Glaukooma

Suomessa glaukoomaa sairastaa yli 90 000 potilasta, joista suurin osa on yli 65-vuotiaita. Vuosittain Suomessa todetaan noin 2 500 uutta tapausta. Arvion mukaan ainoastaan puolet länsimaissa glaukoomaa sairastavista potilaista tietävät sairastavansa tautia [1.], joten oletettavasti myös Suomessa glaukoomaa sairastaa tilastoitua enemmän ihmisiä. Tautiin Suomessa hoitoa saavien potilaiden lukumäärä kasvaa vuosittain noin kolme prosenttia [7].

Maailmanlaajuisesti glaukoomasta on muodostumassa merkittävä kansanterveydellinen ongelma, ja kaihin jälkeen se on toiseksi yleisin peruuttamattoman sokeuden aiheuttaja maailmassa. Arvioiden mukaan vuonna 2020 glaukoomaa sairasti maailmanlaajuisesti noin 80 miljoonaa potilasta ja vuoteen 2040 mennessä tautia sairastavien potilaiden määrän arvioidaan nousevan 111 miljoonaa henkilöön. Glaukooma ja sen aiheuttamat hoitokulut muodostavat huomattavan taakan terveydenhuollolle ympäri maailmaa. [8.]

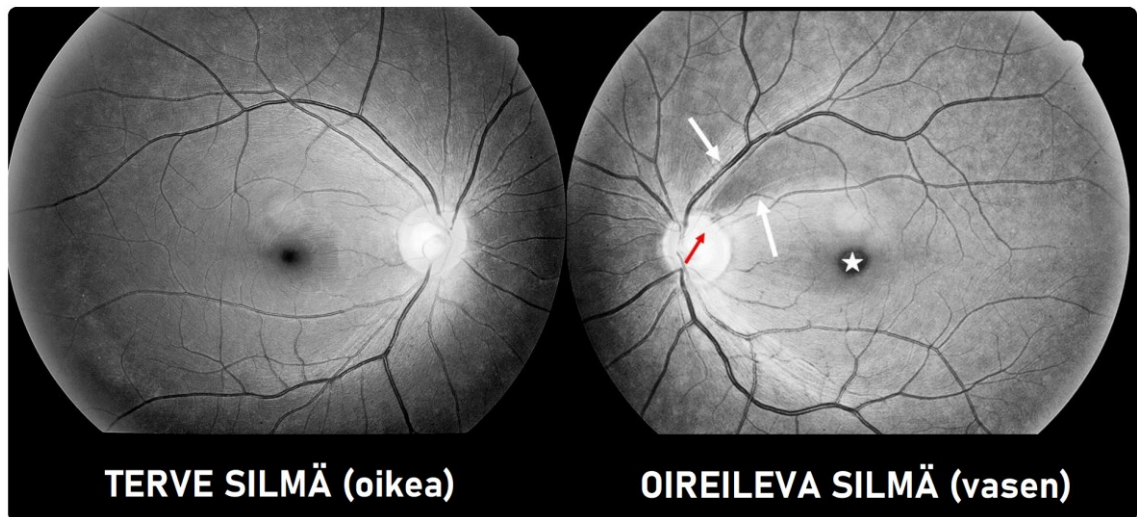
Taudin syntymekanismit ovat osittain vielä tuntemattomia, mutta glaukooman riskiä lisäävät todennäköisesti ainakin seuraavat tekijät:

- korkea silmänpaine (22–35 mmHg)
- ikääntyminen
- näköhermonpään verenvuoto
- mykiön hilseilytauti yhdistettynä kohonneeseen silmänpaineeseen
- likitaitteisuus (myopia)
- diabetes
- sukurasite
- alentunut perfuusiopaine yhdistettynä korkeaan ikään. [7.]

Taudin alkuvaiheessa glaukooma voi olla kokonaan oireeton [1], tai oireet voivat olla vaikeasti havaittavia, jonka vuoksi sairaus jää helposti diagnosoimatta [8]. Aluksi glaukooman oireet voivat tuntua siltä, kuin toisen tai molempien silmien näköterveys olisi heikentynyt; lukiessa osa tekstistä voi sumentua tai kadota kokonaan näkökentästä. Erityisesti yksittäisen silmän oireilua on hankala havaita, sillä silmien näkökentät ovat lähes identtiset ja terve silmä kompensoi aktiivisesti puutteita. Edetessään tauti saattaa johtaa vakaviin näkökentän

puutoksiin sekä aiheuttaa lopulta putkinäön, jossa näkökenttä kutistuu hyvin suppeaksi. [1.]

Vaikka kohonnut silmänpaine on suurin tunnettu riskitekijä glaukooman kehittymiselle, niin osalla potilaista silmänpaine on normaalin rajoissa. Glaukoomaa ei siksi voida diagnosoida ainoastaan kohonneen silmänpaineen perusteella, joten taudin toteamiseen käytetään näkökenttätutkimusta ja verkkokalvolla sijaitsevan näköhermon pään (ks. kuva 4) sekä verkkokalvon hermosäiekerroksen kuvantamista. [1.] Silmänpainemittaus on kuitenkin tärkein tutkimus äkillisen silmänpainekohtauksen, eli akuutin sulkukulmaglaukooman tunnistamisessa [9].



Kuva 4. Glaukooman aiheuttamat muutokset silmänpohjakameralla otetussa kuvassa [10].

Glaukooman keskeisin hoitokeino on silmänpaineen alentaminen erilaisilla lääkevalmisteilla, joiden käytön tavoitteena on laskea silmänpainetta vähintään 25 prosenttia sen lähtötasosta. Mikäli taudinkuva ei parane lääkityksellä, niin silmän nestekiertoa voidaan tarvittaessa parantaa laser- ja paineleikkauksilla. [7.]

Tautina glaukooma etenee hitaasti silloin, kun potilaan silmänpaine saadaan alennettua normaalille tasolle. Taudin etenemistä seurataan vähintään joka toinen vuosi tehtävällä näkökenttätutkimuksella ja hermosäiekerroksen kuvantamisella. Silmänpainetta puolestaan seurataan yleensä tätä tiheämmin noin kuuden kuukauden välein tehtävällä silmänpainemittauksella. [1.]

3 Silmänpainemittauksen historia

Sana "glaukooma" on peräisin kreikkalaisesta sanasta "glaukos", jota antiikin Kreikassa käytettiin kuvaamaan pupillin tai iiriksen värityksen muutosta. Toinen suomen kielessä aiemmin käytetty nimitys glaukoomalle on viherkaihi, joka viittaa glaukooman aiheuttaman sarveiskalvon turvotuksen väriltään vihertävän harmaaseen silmän sameutumiseen. Historiassa ensimmäinen kirjattu havainto silmänpaineen yhteydestä silmäoireisiin tehtiin antiikin Kreikassa 400-luvulla ennen ajanlaskua, kun modernin lääketieteen isänä pidetty Hippokrates havaitsi, että silmäluomia painelemalla potilaiden silmäoireet lievenivät. [11.]

Englantilaisen lääkärin Richard Banisterin vuonna 1622 julkaisemassa rukouskirjassa kuvaillaan silmänsairauksien yhteyttä kohonneeseen silmänpaineeseen, jota tuolloin mitattiin tunnustelemalla silmän vastustusta painallukseen. Banisteria pidetään ensimmäisenä lääketieteen ammattilaisena, joka yhdisti kohonneen silmänpaineen glaukoomaan. [11.] Myöhemmin 1800-luvun alkupuolella englantilainen lääkäri William Bowman korosti jälleen silmänpaineen käsin tunnustelun merkitystä näköhäiriöistä kärsivien potilaiden hoidossa, minkä seurauksena palpaatiosta tuli silmälääkärien hyvin taitama ja olennainen kliininen taito 1800-luvun loppuun mennessä [12].

Pyrkimykset mitata silmänpainetta mekaanisilla instrumenteilla alkoivat vasta 1800-luvun lopulla, kun preussilainen Albrecht von Graefe yritti kehittää silmänpainemittarin (tonometrin) prototyyppiä. Hän kuvaili laitteella tekemiään kokeita vuonna 1862 lähetetyssä kirjeessä hollantilaiselle silmälääkärille Franciscus Dondersille, mutta laitteen kehitys ei edennyt prototyyppiä pidemmälle. [11.]

Ensimmäiset potilaskäytössä olleet tonometrit kehitettiin Saksassa 1860-luvulla Dondersin klinikalla [11]. Tuolloin rakennettujen, intendaation periaatetta hyödyntävien tonometrien (ks. kuva 5) toiminta perustui silmänsisäisen nesteen syrjäyttämiseen, joka tapahtui tonometrin pään koskettaessa silmää, jolloin pään paino aiheutti kovakalvoon painauman. Silmälääkärit mittasivat ensin referenssiksi kovakalvon kosketuskohdan kaarevuuden, ja tämän avulla määritettiin tonometrin pään painon aiheuttaman sisennyksen eli kuopan syvyys. [12.]



Kuva 5. Dondersin klinikalla rakennettu von Graefe -tonometri [11].

Vuonna 1867 saksalainen silmälääkäri Adolf Weber havaitsi mittarin pään ja silmän kontaktin aiheuttavan silmänesteen liikkumista, jonka todettiin vaikuttavan silmänpaineeseen heikentäen oleellisesti mittaustulosten luotettavuutta ja toistettavuutta. Tämä ongelma rajoitti kaikkia tuolloin olemassa olleita tonometrejä, joten Weber kehitti applanaation tonometrin, jonka tarkoituksena oli minimoida silmänesteen ylimääräinen liikkuminen mittauksen aikana. Weberin keksintö ei kuitenkaan saanut alan laajaa arvostusta. [11.]

Vuonna 1885 C. L. Maklakoff, tietämättä Weberin keksinnöstä, kehitti vielä kehittyneemmän applanaation periaatetta hyödyntävän tonometrin (ks. kuva 6), jota pidetään nykytiedon valossa ainoana kohtuullisen tarkkana tonometrinä ennen 1900-lukua. [11.] Mittaustulosten tarkkuus parantui entuudestaan, kun vuonna 1884 Karl Koller keksi kokeilla kokaiinia sarveiskalvon puudutusaineena. Tämä löydös mahdollisti tonometrin asettamisen suoraan sarveiskalvolle, jonka pinta oli anatomisesti yhtenäisempi ja mittauksiin sopivampi kuin aiemmin mittauksiin käytetyn kovakalvon pinta. [12.]



Kuva 6. Alkuperäinen Maklakoff-tonometri vuodelta 1855 [11].

Armand Imbertin ja Adolf Eugen Fickin toisistaan riippumattomat applanaatiotonometriä tutkimukset johtivat Imbert-Fick-lakiin [11], jonka mukaan silmänsisäinen paine on yhtä suuri kuin silmän pinnan tasoittamiseen vaadittava voima ($F=pA$), jossa silmänsisäinen paine (p) päätellään voimasta (W), joka vaaditaan tietyn sarveiskalvon vakio-pinta-alan (A) litistämiseen [12]. Tätä teoriaa hyödyntävät uudemmatkin tonometrit, kuten GAT (Goldmann-applanaatiotonometri) sekä esimerkiksi Tono-Pen [11].

Maklakoff jatkoi applanaation periaatteeseen nojaavan tonometrinsä kehittämistä, ja se pysyi ainoana suhteellisen tarkkoja tuloksia antavana tonometrinä, minkä vuoksi palpaatiotonometria pysyi lääkäreiden suosimana menetelmänä silmänpaineen arvioinnissa. [11.]

Tilanne muuttui vuonna 1905, kun norjalainen lääkäri Hjalmar Schiøtz kehitti tunnetun Schiøtz-tonometrin, joka perustui ensimmäisten mekaanisten tonometriä tapaan intendaation periaatteeseen.

Schiøtzin kehittämä laite (ks. kuva 7) oli yksinkertainen, helppokäyttöinen ja hyvin tarkka, joten se hyväksyttiin nopeasti lääkäreiden keskuudessa ja varhain 1910-luvun alkupuolella Schiøtz-tonometri syrjäytti palpaation silmänpainemittauksen kultaisena standardina. Kalibroinnin innovaatiot johtivat laitteen käytön lisääntymiseen, joka taas puolestaan tuotti valtavan määrän uutta tietoa normaalista ja glaukoomaa sairastavasta silmästä. [12.] Schiøtz-tonometreillä kerättyä tietoa käytetään edelleen laajalti alan pohjakivenä ja laitteita valmistetaan edelleen useassa maassa, vastaten etenkin kehitysmaiden käyttötarpeisiin [11].



Kuva 7. Schiøtz-tonometri lisäpainoineen laitteen säilytyslaatikossa [11].

Itävaltalais-sveitsiläinen silmälääkäri Hans Goldmann julkaisi vuonna 1955 lopullisen konseptinsa Goldmann-applanaatiotonometrissa. GAT (ks. kuva 8) syrjäytti nopeasti Schiøtz-mittarin aseman IOP-mittaamisen kultaisena standardina, ja se tunnetaan edelleen nykypäivänä tonometrien kliinisenä standardina. [11.]



Kuva 8. Haag-Streit AT900 Goldmann -applanatiotonometri [13].

Laitteen menestyksestä huolimatta uusien tonometriä ja tonometriamenetelmien kehittäminen jatkuu edelleen, sillä GAT:lla on myös omat heikkoutensa:

- Se ei ole kannettava.
- Sen on oltava samassa tilassa rakolampun kanssa.
- Mittauksen tekeminen laitteella vaatii paikallispuudutustippojen ja väriainetippojen käyttämistä.
- Laite täytyy kalibroida tarkasti.
- Laite täytyy steriloida käytön jälkeen.
- Sarveiskalvon biomekaaniset ominaisuudet vaikuttavat keskeisesti mittaustuloksen tarkkuuteen ja luotettavuuteen. [11.]

4 Tiedonhakuprosessi

Insinööriyön menetelmäksi valikoitui kuvaileva kirjallisuuskatsaus, koska menetelmänä se soveltui kuvaamaan työssä valittua aihealuetta työn teoreettisesta näkökulmasta rajaten, sekä mahdollistaen tarkoin jäsennellyn ja valikoidun aineiston käyttämisen. Silmänpainemittarien menetelmien esittelyä ja vertailua varten tehty tiedonhaku perustui ennalta asetettuihin tutkimuskysymyksiin:

- Mitä eri tonometriä on olemassa ja millaisia ne ovat?
- Mitkä ovat eri menetelmien vahvuudet ja heikkoudet?
- Millä perusteilla voidaan valita oikea menetelmä oikeaan tilanteeseen?

Alustava aineisto kerättiin luotettavuuden saavuttamiseksi ainoastaan tunnetuista tietokannoista. Tiedonhaku suunniteltiin suomen ja englannin kielellä, mutta muutaman hakukierroksen jälkeen haut kohdistettiin kokonaan englanninkielisiin kansainvälisiin tutkimuksiin niiden paremman saavutettavuuden vuoksi. Käytetyt hakutermit johdettiin alkuperäisistä tutkimuskysymyksistä yhteensopivaan muotoon hakumootoreiden kanssa, sekä niistä muotoiltiin englanninkieliset vastineet (ks. taulukko 1 alla) kansainvälisten tietokantojen hakuja varten.

Taulukko 1. Tiedonhaussa käytetyt keskeiset hakutermit ja kriteerit.

Hakutermit	Tietokanta	Rajaus
tonometry, ocular tonometry, tonometry AND intraocular pressure, tonometry AND iop, tonometry AND ocular AND pressure, tonometry AND review, tonometry AND comparison, tonometry AND accuracy	PubMed, Science Direct, Google Scholar	Julkaisuvuosi: 2010–2022.
tonometry methods, tonometry AND method, tonometry AND method AND review, tonometry AND method AND accuracy, tonometry AND method AND future	PubMed, Science Direct, Google Scholar	Julkaisuvuosi: 2010–2022.
tonometer, tonometers, tonometer OR tonometers AND method, tonometer OR tonometers AND review, tonometer OR tonometers AND comparison, tonometer OR tonometers AND accuracy, tonometer OR tonometers AND future	PubMed, Science Direct, Google Scholar	Julkaisuvuosi: 2010–2022.

Hakutulokset rajattiin niiden julkaisuvuoden (2010–2022) perusteella, millä ha-
luttiin varmistaa mahdollisimman tuoreen tutkimustiedon saaminen. Lisäksi
maksulliset artikkelit poissuljettiin saaduista hakutuloksista, sillä insinööri-
työn resurssit eivät sisältäneet rahoitusta. Jäljelle jääneet hakutulokset järjestettiin
käytetyn tietokannan ja saatujen hakutulosten perusteella joko “paras osuma”
(best match) tai “uusin ensin” (most recent) -lajittelutapaa käyttäen.

Työssä käytettyjen aineistojen valinta suoritettiin manuaalisesti ja käytettävän
materiaalin suodatus aloitettiin hakutulosten otsikkojen tarkistelulla, jolla varmis-
tettiin aineiston olevan insinööri-työn tutkimuskysymyksiä kannalta osuvaa ja
ajankohtaista. Ainoastaan otsikkotasolla tehtävä tarkastelu ei kuitenkaan taan-
nut aineiston sisällön hyödyllisyyttä työn rajauksen mukaisen kokonaiskuvan
muodostamiseen, joten suodatus jatkui yhteenvedon lukemisella ja tämän jäl-
keen vielä aineiston pikaisella läpilukemisella.

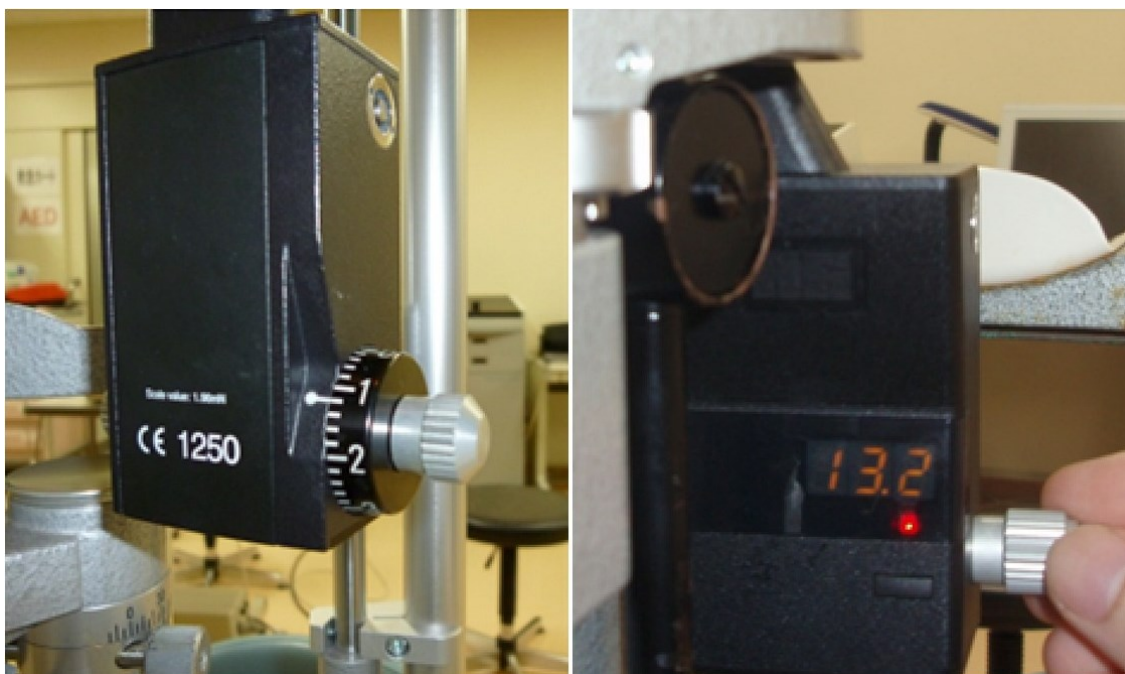
Edellä kuvatun suodatusprosessin avulla kerätty aineisto toimi tonometriamen-
telmien ja niiden vertailua käsittelevien kappaleiden tietotaustana, eli insinööri-
työn rajauksen mukaisen aihealueen yleiskuvan muodostamisen pohjana. Alus-
tavan tiedonhakuprosessin kautta kerätyn aineiston puutteita ilmeni työn ede-
tessä, sekä muun muassa silmän fysiologian ja silmänpainemittauksen historian
osuuksiin oli käytettävä muuta materiaalia. Nämä työn edetessä tunnistetut tie-
toaukot täydennettiin luotettavien lähteiden aineistoja käyttäen. Aineiston manu-
aalisella valinnalla varmistettiin insinööri-työn rajauksen kannalta mielekkään ja
ajankohtaisen tiedon kerääminen, jotta työn lopputuloksen hyödyntämisen elin-
kaari olisi mahdollisimman pitkä.

Tarkkoja aineiston hylkäys- tai hyväksymisprosentteja ei laskettu tiukasta aika-
taulusta johtuneen puutteellisen hakutilastoinnin vuoksi, mutta arvion mukaan
otsikkotason suodatuksen läpäisseistä materiaaleista noin 20–30 prosenttia
päätyi lopulliseen aineistoon manuaalisen sisällön seulomisen ja tarkemman lä-
pikäynnin jälkeen.

5 Tonometrian keskeiset menetelmät

Ensimmäiset tonometrit perustuivat havaintoon glaukooman ja silmän kovuuden yhteydestä. Palpaatiolla ei pystytty havaitsemaan riittävän tarkasti paineen muutosta ja käsin tunnustelun epätarkkuudesta syntyi tarve mekaanisille mittausrummuille, joiden kiistämättä suurin virstanpylväs oli Hans Goldmannin vuonna 1955 kehittämä applanation periaatteeseen perustuva GAT.

Pyrkimys parempiin mittaustuloksiin ja tarve erilaisille menetelmille ovat kuitenkin ylläpitäneet tonometrien jatkuvaa innovaatiota. Jopa GAT:ista on kehitetty digitaalinäyttöisiä versioita, jotka mahdollistavat IOP:n oletusarvon asettamisen yhden desimaalin tarkkuudella. Alkuperäisessä GAT:n mittausrummussa olevien jakoviivojen tarkkuus on huomattavasti heikompi ja mittaustuloksen tulkinta on käyttäjän tekemän arvioinnin varassa (ks. kuva 9). Digitaalisella GAT:lla saadaan myös luonnollisesti hieman tarkempia mittaustuloksia, koska sen mittausrummun digitaalinäyttö mahdollistaa tarkemman IOP:n oletusarvon asettamisen. [14.]

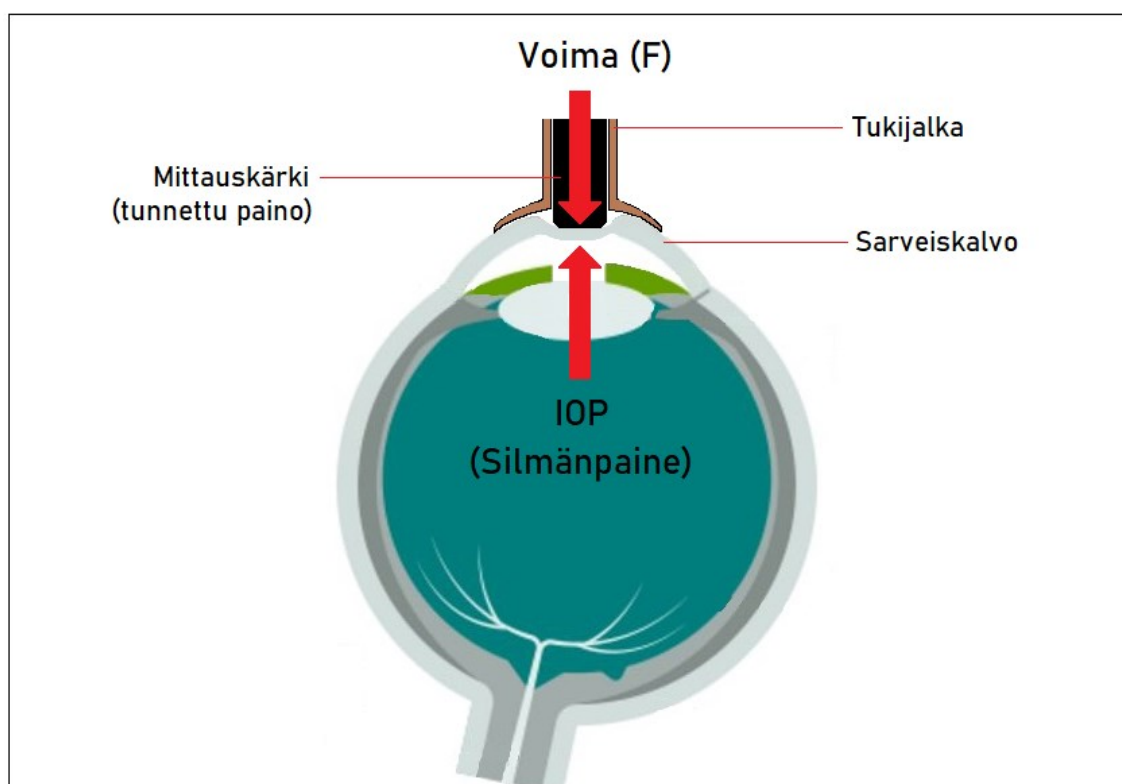


Kuva 9. GAT-mittausrummun identtisen asennon visuaalinen ero laitteen analogisella ja digitaalisella versiolla [14].

Nykypäivänä käytettävät tonometrit hyödyntävät erilaisia mittausmenetelmiä, tai ne yhdistelevät useita menetelmiä silmänpaineen mittauksessa. Kappaleessa käsitellään nykypäivänä aktiivisesti käytössä olevien tonometrien hyödyntämiä mittausmenetelmiä ja niiden keskeisiä toimintaperiaatteita.

5.1 Indentaatiotonometria

Ensimmäiset jossain määrin tarkkoja mittaustuloksia antaneet tonometrit perustuivat indentaation periaatteeseen (ks. kuva 10). Tämän menetelmän avulla mitataan sisennyksen syvyyttä, jonka painolla varustettu maan vetovoiman alainen mittauskärki painaa potilaan silmään. Kun sarveiskalvoon painautuvan mittauskärjen paino on tiedossa, voidaan sen aiheuttaman sisennyksen syvyyden avulla päätellä vastavoiman suuruus eli silmänpaine. [12.]

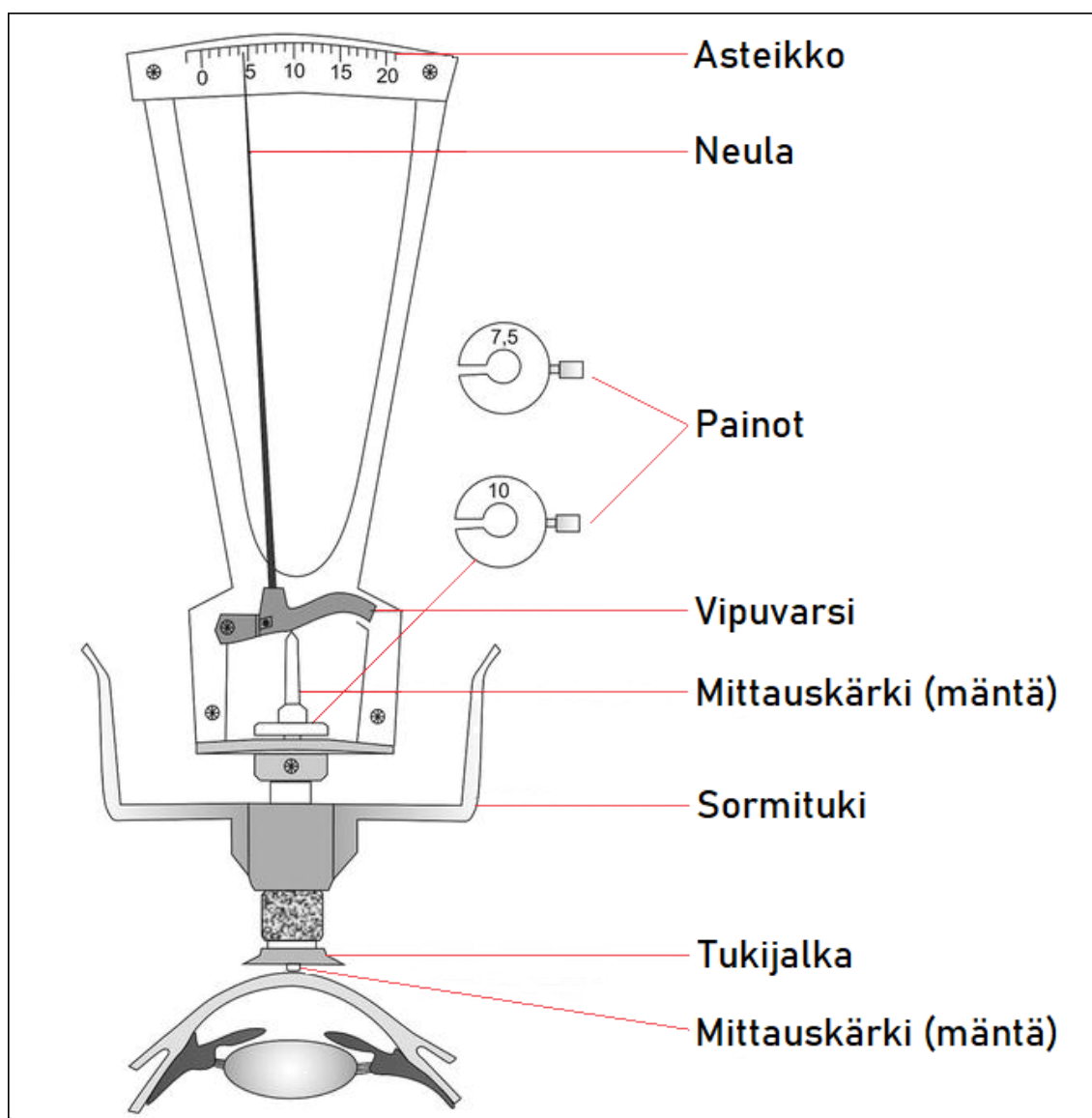


Kuva 10. Mittaus indentaatiotonometrillä [15].

Menetelmän kontaktillisuuden vuoksi sarveiskalvon puudutus on tehtävä inden-
taatiota hyödyntävää mittaria käyttäessä, ja mittaus on suoritettava vaakata-
sossa menetelmän hyödyntäessä painovoimaa mittaukseen.

Schiøtz-tonometri

Hjalmar Schiøtzin vuonna 1905 kehittämä Schiøtz-tonometri toimi suhteellisen
tarkkuutensa ja helppokäyttöisyytensä ansiosta silmänpainemittauksen- ja tutki-
muksen standardityökaluna noin 50 vuotta. Schiøtz-tonometri (ks. kuva 11) on
ainoa vielä nykypäivänä käytössä oleva täysin mekaaninen tonometri. [16.]



Kuva 11. Schiøtz-tonometrin rakenne ja sen tärkeimmät osat [17].

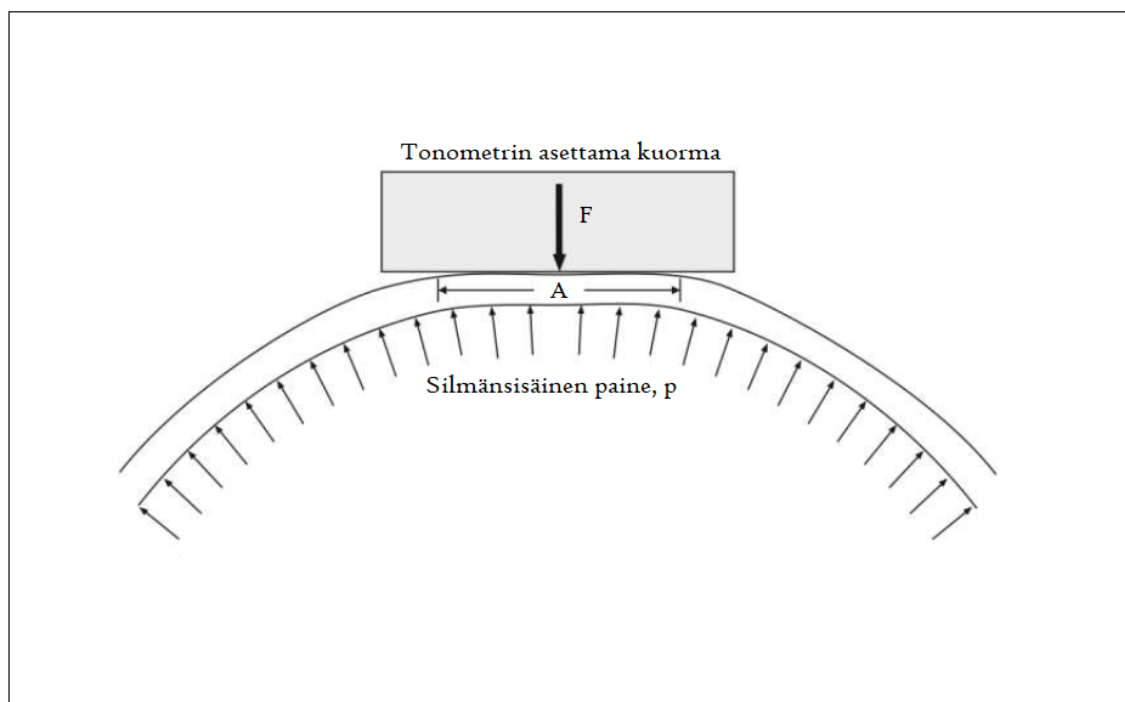
Laitteen vaihdettavalla painolla varustettu mittauskärki liikkuu metallisylinterissä, jonka toinen pää on kiinnitetty ihmisen sarveiskalvon keskimääräistä kaarevuutta jäljittelevään tukijalkaan. Metallisylinteristä mittauskärjen toinen pää lepää vasten kaarevaa vipuvartta, joka liikuttaa mittaustulosta asteikolta osoittavaa neulaa. Tukijalka asetetaan makuullaan olevan potilaan silmän päälle ja mittaria painetaan varovasti vasten sarveiskalvoa. Mittauskärjen jokainen 0,5 mm pituinen painauma sarveiskalvoon vastaa mittarin näyttöskaalassa yhtä lukemaa, eli mitä syvemmälle mittauspää uppoaa, sitä suurempi mittauslukema on. Tonometrin asteikon näyttämät mittaustulokset muunnetaan elohopeamillimetreiksi käyttäen muunnostaulukkoa, jota tulkitsemalla mitattava IOP selviää käytetyn painon ja mittarin mittauslukeman perusteella. [16.]

Schiøtz-mittarin suurin heikkous on sen mittaustarkkuuteen vaikuttavien tekijöiden suuri määrä. Näitä ovat muun muassa laitteen virheellinen asettelu silmälle, laitteen likaisuus, laitteen fyysiset viat sekä silmän yksilöllisten rakenteellisten ominaisuuksien vaikutus mittaustuloksiin. Modernimpiin mittareihin verrattuna Schiøtz-mittarin tulokset ovat yleisesti epätarkkoja. [18.] Laite on kuitenkin sen saatavuuden ja kannettavuuden ansiosta edelleen laajalti kehitysmaissa käytössä ja sitä pidetään näissä maissa luotettavana seulontatyökaluna [16].

5.2 Applanaatiotonometria

Applanaation periaatteeseen perustuvaa menetelmää käyttäessä sarveiskalvon ajatellaan olevan osa ohutseinäistä joustavaa palloa. Sen tietyn alueen tasoittamiseen tarvittavan voiman määrän avulla on mahdollista laskea likimääräisesti pallon sisällä oleva paine (ks. kuva 12).

Menetelmä perustuu Imbert-Fick-lakiin, jonka mukaan silmänsisäinen paine on yhtä suuri kuin sarveiskalvon vakiopinta-alan litistämiseen vaadittava voima (ks. kuva 12). Imbert-Fick-laki ilmaisee tämän muodossa $p=F/A$, jossa silmänpaine (p) saadaan jakamalla sarveiskalvon tietyn pinta-alan tasoittamiseen tarvittava voima (F) sarveiskalvon tietyllä pinta-alalla (A). [16.]



Kuva 12. Mittaus applanaatiotonometrillä [12].

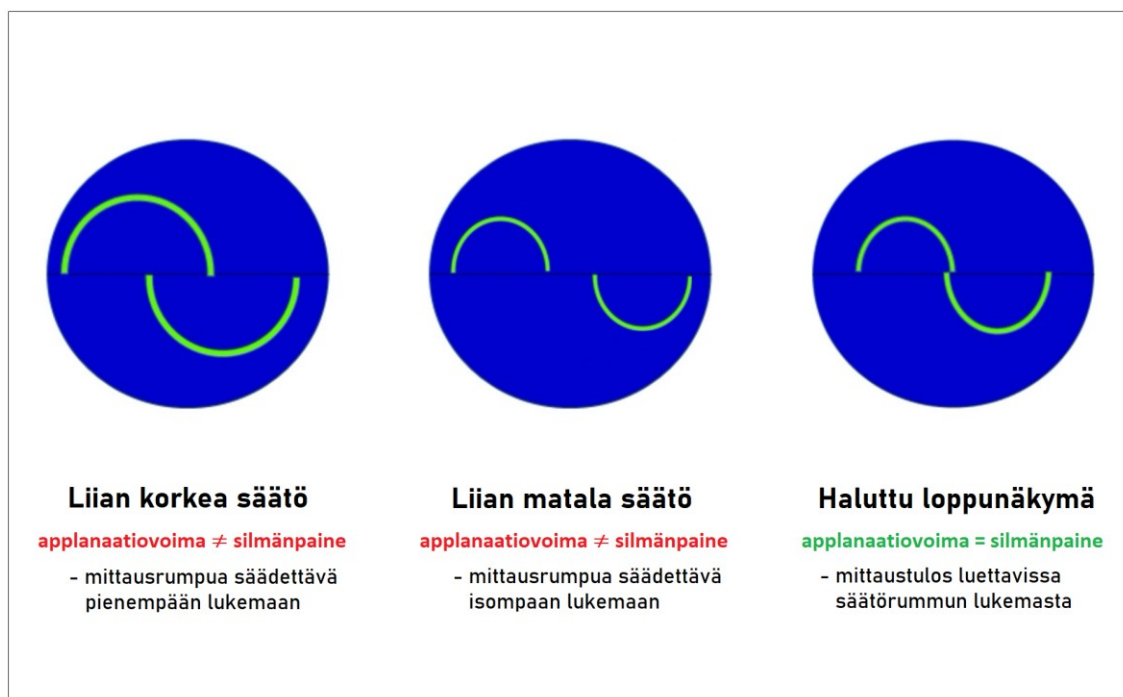
Applanaatiotonometrejä pidetään luotettavimpina laitteina tarkan silmänpaineittuloksen saamisessa. Etenkin applanaatiotonometreistä GAT on tarkkuutensa ansiosta muodostunut kliiniseksi standardiksi, kun tarkoituksena on diagnosoida tai seurata silmäsairauksia, kuten glaukoomaa tai okulaarista hypertensiota. [18.]

Goldmann-applanaatiotonometri

Hans Goldmannin 1950-luvun puolivälissä kehittämä GAT on yhä maailman käytetyin tonometri ja kliininen standardi, johon muita tonometrejä verrataan. GAT on kiinnitetty rakolamppuun ja ennen mittausta potilaan silmään tiputetaan puudutustippoja sekä rakolampun sinisen valon paljastavia väriainetippoja (fluoreseiiniä). Fluoreseiini sekoittuu kyynelnersteeseen, ja se aktivoituu rakolampun koboltinsinisen valon alla näyttäytyen keltaisen ja vihreän sävyissä. [18.]

Istuma-asennossa olevan potilaan sarveiskalvoa vasten työnnetään halkaisijaltaan noin 7 millimetrin kokoisen muovisylinterin keskellä sijaitseva 3,06 millimetrin levyinen litistyspinta, joka asemoidaan siihen kiinnitetyn liikutettavan varren avulla. Mittausrummun säätöä, eli oletettua silmänpainetta hienosäädetään

rullasta, kunnes sarveiskalvon litistetty alue on halkaisijaltaan tarkalleen 3,06 millimetrin kokoinen. Prismajärjestelmän avulla laitteen operoijalle visualisoituu, milloin litistynyt alue on oikean kokoinen. Kuvassa 13 esitetyn validin mittaustuloksen saamiseksi käyttäjän tulee käytännössä asettaa mittausrummun säätörulla asentoon, jossa rakolampun valaisemien fluoreseinikaarien sisäreunat koskettavat toisiaan. [16.]



Kuva 13. GAT-mittaustuloksen oikeaoppinen tulkinta fluoreseinikaaria käyttäen [19].

Yleisimpiä tarkan mittaustuloksen saamisen ongelmia GAT:lla ovat fluoreseinin annostelun virheet ja silmän sarveiskalvon muodon rakenteelliset erot [18]. Laitteeseen on kehitetty sen julkaisun jälkeen muitakin parannuksia digitaalinäytön ja kertakäyttöisten mittauspäiden lisäksi, kuten esimerkiksi CATS-modifioidut mittauspäät, joiden litistyspinnan muoto ja koko täsmäävät paremmin silmän todelliseen muotoon. CATS-prisman on osoitettu alkuperäiseen GAT-prismaan verrattuna parantavan mittaustulosten luotettavuutta, kun mitattavan silmän biomekaaniset ominaisuudet ovat normaalista poikkeavia. [16.]

Perkins-tonometri

Draeger ja Perkins kehittivät vuosina 1965–1966 Goldmannin toimintaperiaatteen perustuvan kannettavan ja akkukäyttöisen tonometerin. Perkins-tonometri mahdollisti GAT:lla pystyasennossa tehtävien mittauksien lisäksi myös vaakatasossa tehtävät mittaukset. Lisäksi sen kannettavuus ja akkukäyttöisyys mahdollistivat täysin uusia käyttöympäristöjä mittaukselle. [16.]

Kannettavalla Perkins-tonometrillä (ks. kuva 14) saadaan hyviä mittaustuloksia, ja pienen koon vuoksi se on helppo kuljettaa mukana, sekä mittauksen tekeminen onnistuu GAT:sta poiketen vuodepotilaille ja liikuntarajoitteisille potilaille. Laitteella saatavat mittaustulokset ovat riittävän tarkkoja myös kliniseen käyttöön. [16.]



Kuva 14. Haag-Streit Perkins mk3 -tonometri [20].

Hyvin GAT:n tuloksien kanssa korreloivien mittaustulosten vuoksi Perkins-tonometri on edelleen hyödyllinen tiloissa, joissa ei ole rakolamppua tai joissa mittausolosuhteet eivät ole GAT:lle sopivat. Tällaisia tarpeita ilmenee ensiavussa, leikkaussaleissa sekä liikkuvassa kenttätyössä. Perkins-tonometrin heikkoja puolia ovat sen käyttäjältä vaadittu suuri taitotaso, laitteen sijoitteluun liittyvät

vakauden ongelmat, paikallisuudutuksen tarve sekä epäsäännöllisen tai arpeutuneen sarveiskalvon aiheuttamat epätarkat mittaustulokset. [16.]

Tono-Pen

Vuonna 1959 McKay and Marg esittelivät ideansa tonometrasta, jonka mittausmenetelmä yhdisteli indentaation ja applanaation periaatteita. Amerikkalaisen Reichert-yrityksen kehittämä Tono-Pen on tekniseltä toteutukseltaan McKay-Marg-tonometrin suora jälkeläinen, sillä edeltäjänsä tapaan se hyödyntää molempia mittausmenetelmiä. [12.] Mittausmenetelmien periaatteiden yhdistelemisestä huolimatta Tono-Pen luokitellaan yleensä silti applanaatiotonometriksi.

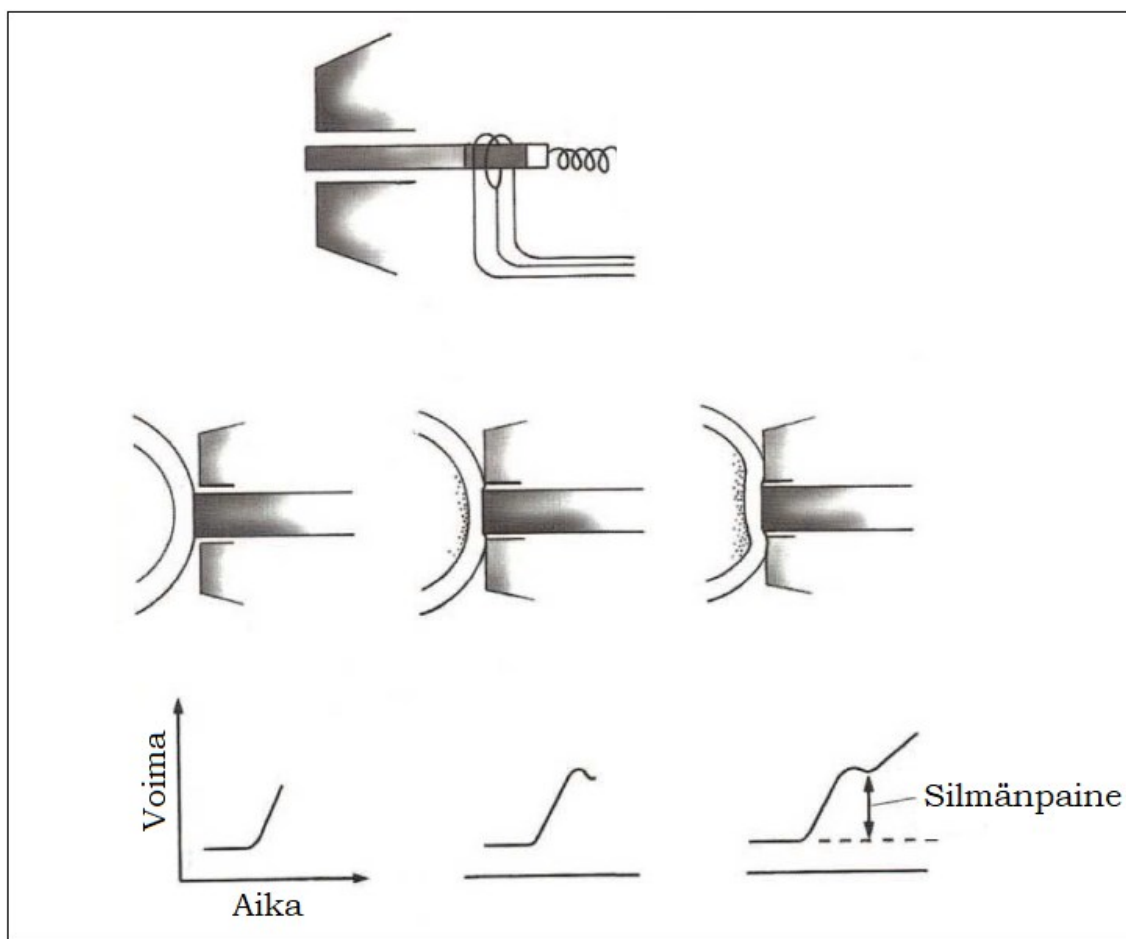
Tono-Penin ensimmäisen prototyypin kliininen arviointi aloitettiin vuonna 1987 ja nykypäivänä markkinoilla on useita malleja (ks. kuva 15 alla) tonometrin tuotekehityksen jatkuessa edelleen. Perkins-tonometrin tavoin Tono-Pen on kannettava kädessä pidettävä paristokäyttöinen tonometri, jolla mittaus voidaan suorittaa kaikissa asennoissa. Elektronisilla komponenteilla varusteltu laite hyödyntää kertakäyttöisiä lateksipäisiä mittauskärjen suojana. [16.]



Kuva 15. Markkinoilla olevat Tono-Pen-mallit AVIA ja XL [21].

Tonometrin kärjestä työntyy esiin mikroskooppisen kokoinen mäntä, joka on kiinnitetty elektroniseen venymämittariin. Kärjen osuessa silmään mäntään

kohdistuu sarveiskalvon aiheuttama paine, joka näkyy tasaisesti kasvavana voimana venymämittarin lukemassa. Sarveiskalvon litistymishetkellä voima jakautuu mittauskärjen ja männän kesken, jolloin tasaisesti kasvavaan venymämittarin kokemaan voimaan tulee hetkellinen lasku. Venymämittariin kohdistuva voiman sähköisessä aaltomuodossa voidaan tuolloin havaita pieni lovi (ks. kuva 16), josta voidaan päätellä sarveiskalvon litistämiseen vaaditun voiman määrä. Tono-Penin mikroprosessori laskee venymämittarin usean laskukohdan keskiarvon perusteella silmänpaineen. Saatu mittaustulos ja sen tilastollisen luotettavuuden indikaattori (0–100 prosenttia) näytetään käyttäjälle mittauksen päätyttyä. [12.]



Kuva 16. Tono-Penin mittausmenetelmä vaiheittain [12].

Tutkimuksien mukaan silmän biomekaaniset ominaisuudet eivät vaikuta Tono-Penin mittaustuloksiin yhtä paljoa, kuin ne vaikuttavat joidenkin muiden tonometrien, kuten esimerkiksi GAT:n kohdalla. Laite soveltuu siksi käytettäväksi

etenkin silloin, kun potilaan sarveiskalvon paksuus tai rigiditeetti on poikkeavalla tasolla tai kun mittaus täytyy suorittaa piilolinssin läpi. Tonometri soveltuu myös hyvin käytettäväksi leikkauksaleissa, kun silmänpainetta pitää arvioida välittömästi esimerkiksi kaihileikkauksen jälkeen. [16.]

Bioresonator ART

Applanaation periaatetta ja resonanssitekniikkaa yhdistävä uusi konsepti applanaatioresonanssitonometriä kehitettiin Ruotsissa vuonna 2002. Ensimmäinen laitteen kaupallinen malli ART (Applanation Resonance Tonometer) tuotiin markkinoille vuonna 2012 ruotsalaisen Bioresonator Ab:n toimesta. Laitteen (ks. kuva 17) anturin kärjessä on pietsosähköinen resonaattori, joka mittaa tajuuden muutosta suhteessa verrannolliseen kosketusalueeseen. Laite muodostaa mittaustuloksen kosketuspinta-alan ja voiman parametreistä, joita tallennetaan koko mittauksen ajalta. [18.]



Kuva 17. ART-tonometri mittauskäytössä [22].

Itsekalibroituva ART-tonometri antaa IOP arvojen mediaanin ja laatuindeksin mittaustuloksen luotettavuudesta suhteessa keskihajontaan. Laitteen kehittäjien mukaan mittaustulokset ovat tarkempia kuin GAT:n, sillä tulos lasketaan useiden mittausten mediaaniarvoista. Tutkimuksien mukaan ART-tonometri saattaa

yliarvioida silmänpainetta verrattuna GAT:iin, sekä silmän biomekaanisten ominaisuuksien ja muiden artefaktien on havaittu heikentävän mittaustulosten tarkkuutta. [18.]

ART-tonometrin etuja ovat mittauksen toistettavuus ja luotettavuus sekä fluoreseiinin käytön tarpeettomuus. Laitteella on kuitenkin paljon GAT:n kanssa yhteisiä heikkouksia: rakolampun ja sarveiskalvon puudutuksen tarve, kontaktillisuus sekä sarveiskalvon biomekaanisten ominaisuuksien vaikutus mittaustuloksiin. [18.]

ART-tonometrasta löytyy vähän tutkimustietoa, jota tarvittaisiin määrällisesti lisää tonometrin kliinisen suorituskyvyn tarkempaan arvioon. Laitteen kehityksen ja nykyisen saatavuuden tila on tuntematon, sillä valmistajan kotisivut eivät ole työn kirjoitushetkellä toiminnassa, ja valmistajan Facebook-sivulla viimeisin julkaisu on vuodelta 2016.

5.3 Kimmoketonometria

Kimmoketonometrian periaatteen esitti Obbink vuonna 1931, ja vuonna 1967 Dekking kollegoineen kehittivät tutkimuskäyttöön tarkoitetun ensimmäisen kimmoketonometrin. Kehitetty laite oli liian herkkä silmän biomekaanisille ominaisuuksille, minkä vuoksi sitä ei adoptoitu laajasti kliiniseen käyttöön. [16.]

Kimmoketonometriaa nykyisin tunnetun menetelmän kehitti Tiolat Oy:n (nykyisin iCare Finland Oy) toimitus- ja tuotekehitysjohtajana toiminut lääkäri Antti Kontiola. Hän aloitti silmänpainemittarinsa kehityksen perustuen kokemuksiinsa lääkärintyössä. Uusi menetelmä syntyi tarpeesta mitata silmänpainetta yhteistyökyvyttömiltä henkilöiltä ja sellaisilta henkilöiltä, joille silmän anestesiaa ei voida käyttää. Samoihin aikoihin yhdysvaltalaiset glaukoomatutkijat tiedustelivat Kontiolta sellaisen tonometrin perään, joka soveltuisi pienten eläinten kanssa käytettäväksi. Näiden tarpeiden lopputuloksena syntyi ensimmäinen kimmoketonometri. [23.]

Kimmoketonometria perustuu lähietäisyydeltä sarveiskalvoa vasten laukaistun anturin kimpoamisnopeuteen, joka vaihtelee suhteessa silmänpaineeseen.

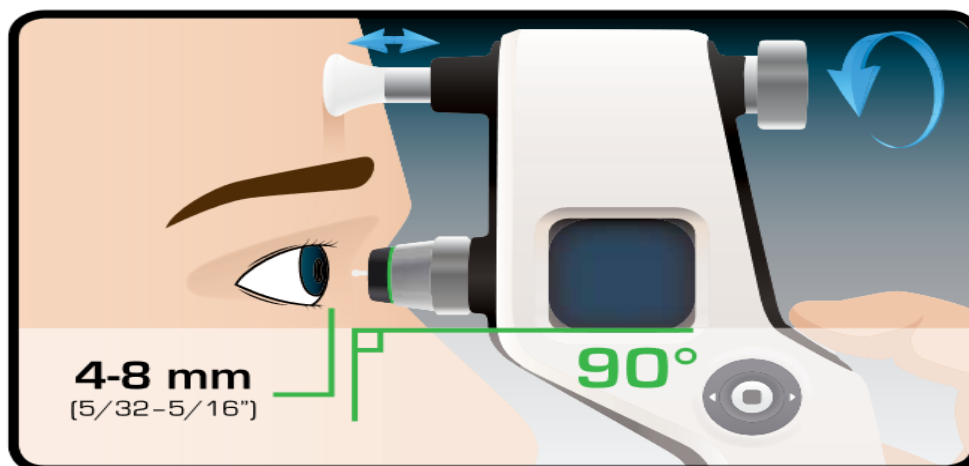
Menetelmä hyödyntää kaikkia anturin nopeudessa tapahtuvia muutoksia mitaustuloksen muodostamiseen, mutta sarveiskalvoon törmäämisen aiheuttama anturin kokema negatiivinen kiihtyvyys eli hidastuvuus kuvaa kaikista kimmoke-tonometrin mittaamista ilmiöistä parhaiten silmänpainetta. Anturin hidastuvuus on suurempi korkealla silmänpaineella, kun puolestaan matalalla silmänpaineella anturin hidastuvuus on pienempi. [12.]

iCare-kimmoke-tonometrit

Suomalaisen iCaren ensimmäinen kaupallinen kimmoke-tonometri iCare TA01i tuotiin markkinoille vuonna 2003 [24]. Alkuperäinen TA01i -versio ja sen myöhemmät iteraatiot ovat kannettavia, kevyitä, pienikokoisia ja paristokäyttöisiä laitteita, jotka mahdollistavat silmänpainemittaukset missä tahansa ympäristössä [16]. Puudutuksen tarpeettomuus, laitteen helppokäyttöisyys ja käytön nopeus tekevät sen käytöstä erityisen hyödyllistä kiireisillä klinikoilla ja lasten kanssa toimiessa [18].

Tonometreissä käytetty kertakäyttöinen anturi on suunniteltu minimoimaan kontaktin aiheuttama vaurio sarveiskalvoon. Anturin kontaktipäässä on pieni, halkaisijaltaan noin 1,8 mm kokoinen pyöreä muovinen pallo, joka on parin sentin pituisen ruostumattoman teräslangan päässä. Metallirakenteinen anturi pysyy sähkömagneettisen kentän vaikutuksesta paikoillaan mittauspesässä. Laitteissa on kaksiosainen mittauskela ja mittaus hyödyntää sähkömagneettista induktiota. Metallisen anturin liike indusoi mittauskelaan anturin nopeuteen verrannollisen jännitteen, josta mikroprosessorilla tehtävän laskennan avulla saadaan aikaan IOP:n mittaustulos. [12.]

Tarvittavien alkuvalmisteluiden jälkeen mittaus suoritetaan asettamalla laite potilaan silmän eteen laitteen otsatukea hyödyntäen niin, että anturin kärki osoittaa vaakasuorassa sarveiskalvon keskipisteeseen noin 4–8 mm:n etäisyydeltä (ks. kuva 18). Oikean asettelun varmistettua käyttäjä painaa laitteen mittauspainikkeen pohjaan, jolloin laite suorittaa kuuden mittauksen sarjan. Mittaukset voi suorittaa myös kertaluontoisesti, sillä tehtyjen mittauksien tulosten keskiarvo näytetään käyttäjälle jatkuvasti laitteen näytöllä. Laite ilmoittaa kuuden onnistuneen mittauskerran jälkeen myös arvion mittaustuloksen luotettavuudesta. [25.]



Kuva 18. iCare IC100 -ohjekirjan kuva, joka esittää oikeaoppista laitteen asettelua onnistunutta mittausta varten [25].

Alkuperäisen TA01i-mallin suurin heikkous oli sen kykenemättömyys mittaamaan silmänpainetta makuuasennossa olevalta potilaalta [12], mutta vuonna 2011 julkaistu iCare PRO mahdollisti makuuasennossa tehtävät mittaukset. Laite on jo poistunut tuotannosta, ja sen korvanneet IC100 ja IC200 -versiot pystyvät edeltäjänsä tavoin suorittamaan mittauksen myös makuuasennossa. Nämä versiot sisältävät muitakin parannuksia (ks. kuva 19), kuten anturin asentoa ilmaisevan LED-valon. [18.]



iCare TA01i



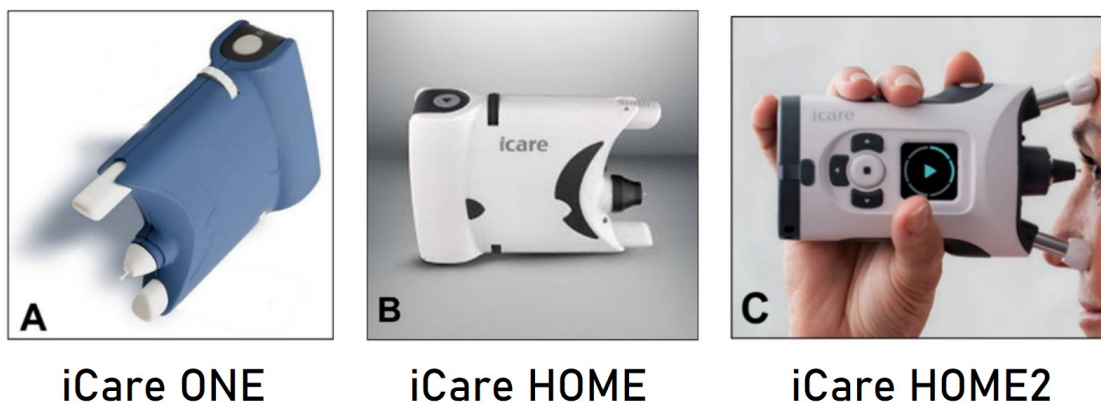
iCare IC100



iCare IC200

Kuva 19. Työn kirjoitushetkellä markkinoilla olevat TA01i-tuoteperheen iCare-versiot [26].

Lisäksi iCare valmistaa yksinkertaistettua versiota iCare-tonometrasta, jolla potilas voi suorittaa itsenäisiä mittauksia kotiolosuhteissa välttämättä vastaanotolla käymisen. Laitteen ensimmäinen versio tunnettiin nimellä iCare ONE, mutta sittemmin laite päivitettiin HOME-versioon ja hiljattain uudelleen HOME2-versioon (ks. kuva 20). HOME-versiot ovat edelleen saatavilla markkinoilta. [18.]



Kuva 20. Itsenäisiin kotimittauksiin tarkoitettujen iCare tonometrien kehityskaari vanhimmasta (A) uusimpaan (C) versioon [18].

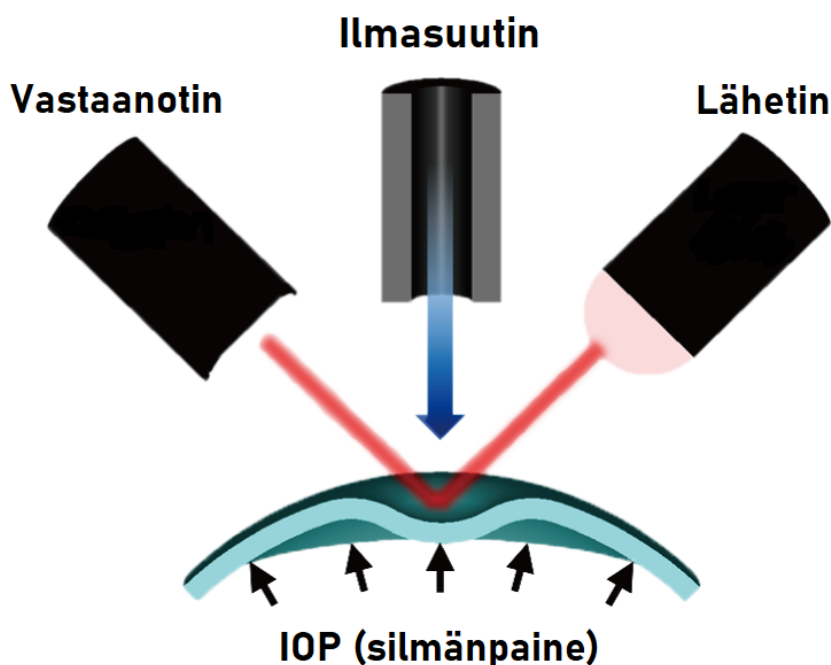
Itsenäiseen käyttöön suunnatusta versiosta on huomattu olevan hyötyä vuorokautisten silmänpainehuippujen havaitsemisessa, kun potilas voi tehdä missä vain mittauksia ympäri vuorokauden. Etenkin glaukoomaepäiltyjen ja jännitysglaukoomapotilaiden silmänpaine saattaa olla normaalin rajoissa vastaanottojen aukioloaikoina, minkä seurauksena korkea silmänpaine voi jäädä vastaanotolla huomaamatta. [18.]

Nykyiset iCare-tonometrit eivät syrjäytä GAT:ia silmänpainemittauksen kliinisenä standardina, koska tietyissä olosuhteissa ne eivät ole yhtä tarkkoja. Tutkimuksien mukaan iCare-tonometrit soveltuvat hyvin silmäsairauksien seulontaan ollessaan kohtuullisen tarkkoja ja helppokäyttöisiä ilman paikallispuudutuksen tai väriaineen tarvetta. [27.] Kimmoketonometria tarjoaa mittausvaihtoehdon tilanteisiin, joissa muita menetelmiä ei niiden heikkouksien takia voida käyttää [16]. Tulevaisuudessa iCare-tonometrit voivat osoittautua kliinisesti hyödyllisiksi silmäleikkauksien jälkeisessä seurannassa ja mitattaessa lisääntyneelle infektorisille tai vaurioille alttiita silmiä, jolloin puudutus- ja väriainetipat vaativa ja isomman kontaktin tekevä GAT on epäkäytännöllisempi vaihtoehto. [18.]

5.4 Ilmapuhallustonometria

Ilmapuhallustonometria, jota usein kutsutaan yleisesti kontaktittomaksi tonometriaksi (Non-Contact Tonometry, NCT) syntyi tarpeesta mitata silmänpainetta ilman paikallispuudutusta. Yhdysvaltalainen lääkäri Bernard Grolman kehitti teknologian vuonna 1971, jotta henkilöt ilman lääketieteellistä koulutusta voisivat myös mitata silmänpainetta. Kaikki keksintöä edeltäneet mittausmenetelmät vaativat sarveiskalvon puudutuksen, jonka annostelu oli lääketieteen alalla kouluttamattomilta henkilöiltä kielletty. [12.]

Kontaktittomat ilmapuhallusmittarit mittaavat applanatiotonometrien tavoin sarveiskalvon litistämiseen vaadittavaa voimaa. Sarveiskalvoon kohdistetun ilmavirtauksen määrää nostetaan lineaarisesti, kunnes sarveiskalvo litistyy. Sarveiskalvoa kohti osoitetaan valon optinen lähetin ja vastaanotin, joka tunnistaa sarveiskalvosta takaisin heijastuvan valon aaltomuodon perusteella hetken, jolloin sarveiskalvo on täysin litistynyt (ks. kuva 21). Tuolla hetkellä käytetyn ilmavirran voimakkuus muunnetaan tietokoneen algoritmin avulla IOP-arvoksi. [27.]



Kuva 21. Ilmasuuttimesta puhallettava ilmavirta litistää sarveiskalvon, mikä havaitaan sarveiskalvosta taittuvan laserlähettimen valon heijastuksen vastaanottiin saapuvan määrän avulla [28].

Ilmapuhallusta hyödyntävien tonometrien suurin etu on niiden kontaktittomuus, jonka vuoksi sarveiskalvon anestesiaa tai väriainetta ei tarvita mittauksen suorittamiseen. Ilmapuhallustonometrit sopivat parhaiten seulontakäyttöön [27], mutta laitteita on hankala rakentaa kuljetettavassa koossa [28], joten niiden liikuteltavuus on usein rajallista. Myös ilmaitse tarttuvan infektion riski kasvaa ilmapuhallustonometreillä menetelmän luonteen vuoksi [18].

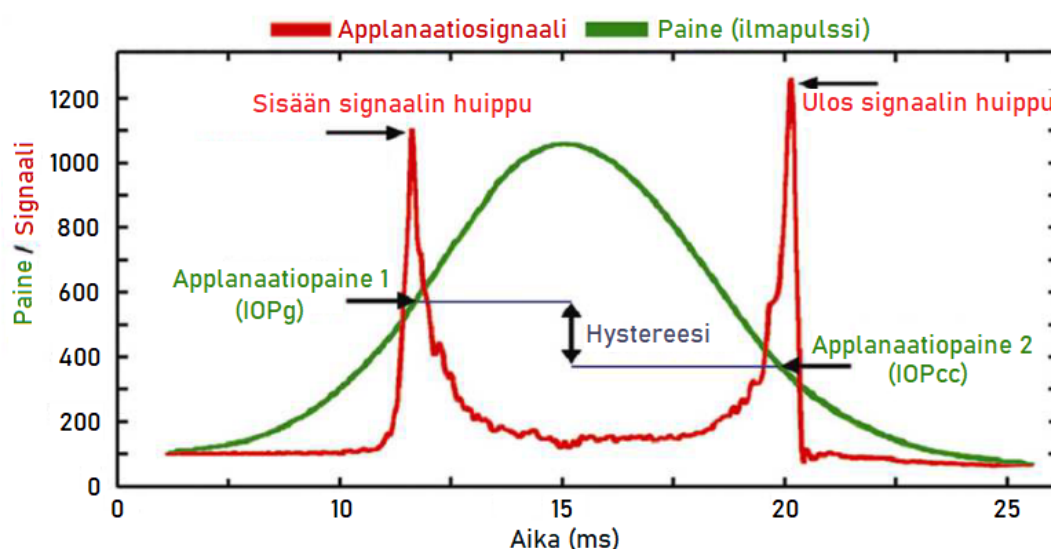
Ocular Response Analyzer

Ocular response analyzer (ORA) on yhdysvaltalaisen Reichertin vuonna 2005 kehittämä kontaktiton ilmapuhallusta hyödyntävä tonometri (ks. kuva 22). Perinteisestä ilmapuhallustonometrasta poiketen ORA mittaa applanaation lisäksi sarveiskalvon kaarevuuden muutoksen nopeutta. [18.] Ilmavirta taivuttaa sarveiskalvoa yli sen litistymispisteen kaarevaksi, josta palautuminen takaisin suoraksi muodostaa ensimmäinen mittauspisteen. Ilmapulssin loputtua sarveiskalvo palautuu litistyksestä takaisin alkuperäiseen kaarevaan muotoonsa, mikä tarjoaa kaarevuuden muutoksen toisen mittauspisteen. Sähköoptinen tunnistin rekisteröi 20 millisekunnin ajan sarveiskalvon keskipisteestä 3 mm kokoisen alueen muutoksia. Sisään- ja ulospäin suuntautuvien applanaatiotapahtumien mittaus tulosten avulla laite laskee kaksi erilaista IOP-arvoa ja parametreja sarveiskalvon ominaisuuksia. [27.]



Kuva 22. Reichert Ocular Response Analyzer G3 -tonometri [29].

Tuloksiksi ORA laskee Goldmann-korreloidun IOP:n (IOPg) lisäksi sarveiskalvon biomekaanisiin ominaisuuksiin perustuvan sarveiskalvokompensoidun IOP:n (IOPcc). Tulokseksi saatavia mielenkiintoisia parametreja ovat sarveiskalvon hystereesi (CH), joka saadaan IOPg:n ja IOPcc:n välisestä erosta (ks. kuva 23) antaen tietoa silmän viskositeetistä, sekä sarveiskalvon resistanssitekijä (CRF), joka kuvaa sarveiskalvon elastisia ominaisuuksia ulkoisen voiman aiheuttamien muodonmuutoksien vastustamiseen. [12.]



Kuva 23. Sarveiskalvon hystereesin muodostaminen esitettyä mittauskäyrällä, jossa näkyy sarveiskalvon applanaatiosignaalin ja ilmanpaineen muutos suhteessa aikaan [12].

Tutkimukset ovat osoittaneet ORA:n IOPcc:n olevan GAT:n mittaustulosta tarkempia ennustaessa glaukooman etenemisnopeutta. Alhaisen CH-arvon on osoitettu toimivan ennustajana toiminnallisten vaurioiden ja näkökentän häiriöiden kehittymisessä potilailla, jotka sairastavat glaukoomaa tai okulaarista hypertensiota. Lisäksi CH-arvo on todettu hyödylliseksi sarveiskalvon kartiorappeuman havaitsemisessa, joten sitä voidaan hyödyntää havaitsemaan muun muassa laserleikkauksen jälkeinen sarveiskalvon pullistuma. [18.]

Laitteena ORA on helppokäyttöinen, ja se antaa tarkkoja IOP-mittaustuloksia ol-lakseen kliinisesti pätevä vaihtoehto. Laitteen suurimpia heikkouksia ovat sen korkea hinta ja ilmapuhalluksen vuoksi ilmateitse tarttuvien infektioiden suurempi riski. [18.]

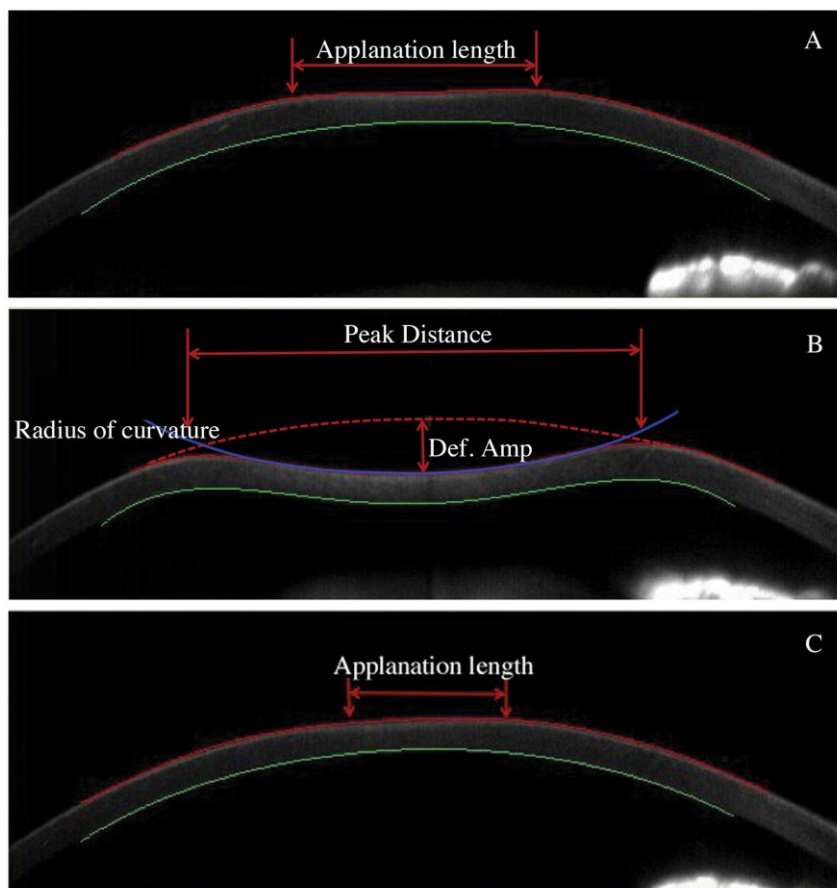
Corneal Visualization Scheimpflug Technology (Corvis ST)

Corneal Visualization Scheimpflug Technology, eli Corvis ST on vuonna 2011 julkaistu kontaktiton ilmapuhallustonometri. Laitteen (ks. kuva 24) toiminta perustuu ORA:n tavoin ilmapulssin aiheuttamiin muutoksiin sarveiskalvon kaarevuudessa. Ilmapuhalluksen aiheuttama muodonmuutos tallennetaan korkearesoluutioisella yli 4000 kuvaa sekunnissa ottavalla huippunopealla Scheimpflug-kameralla. Kamera kuvaa sinisen LED-valon valaisemaa sarveiskalvon keskipisteessä sijaitsevaa halkaisijaltaan noin 8,5 mm:n kokoista aluetta. [27.] Corvis ST tuottaa IOP-arvon lisäksi tietoa silmän biomekaanisista ominaisuuksista, joiden avulla laite laskee myös biomekaanisesti korreloidun IOP-tuloksen (bIOP) normaalin IOP:n lisäksi [18].



Kuva 24. Oculus Corvis ST -tonometri [30].

Laitteen ilmapulssi pakottaa sarveiskalvon sisäänpäin applanaation kautta, kunnes se saavuttaa suurimman kaarevuutensa. Palautuessaan sarveiskalvo käy läpi toisen applanaation ennen kuin se saavuttaa luonnollisen muotonsa (ks. kuva 25). Ilmapuhalluksen aiheuttamien muodonmuutosten seuraamisen lisäksi laite mittaa muun muassa sarveiskalvon paksuuden (CCT) optisella menetelmällä. [31.]



Kuva 25. Scheimpflug-kameran otos sarveiskalvosta applanaation kolmessa eri vaiheessa [31].

Corvis ST:n mittaamien CCT- ja IOP-arvojen tarkkuus on osoitettu erinomaiseksi. Silmän biomekaanisten ominaisuuksien, kuten CCT:n on todettu vaikuttavan vähemmän Corvis ST:n biomekaanisesti korreloitu ihin IOP-mittaustuloksiin (bIOP). [18.] Laitteen todennettavuus ja toistettavuus on arvioitu myös hyväksi ja sen hyviä puolia ovat kontaktittomuus sekä sarveiskalvon ominaisuuksien tarkka seuranta. Laite ei kuitenkaan korkean hintansa vuoksi ole vielä kovin yleinen, ja sen käyttö vaatii koulutusta sekä kiinnityksen pöytään. [27.]

5.5 Pneumatometria

Pneumatometrit ovat kontaktillisia applanaation periaatetta hyödyntäviä tonometrejä, joiden toiminta perustuu ilmalaakerissa kelluvan männän (pneumaattinen anturi) liikkeiden havaintoihin. Ilmapumpulla säädellään muoviputken kautta mäntään kulkevan ilmavirran määrää ja sarveiskalvolle asetetaan mittauksen ajaksi silikonikalvo, jonka pienistä tuuletusaukoista läpi tuleva ilmavirta saa silikonikalvon puristumaan sarveiskalvoa vasten. Ilmavirran ja sen aiheuttaman paineen kasvaessa riittävästi sarveiskalvo saadaan litistettyä. [16.]

Laitteesta säädettävän ilmavirtauksen ja sarveiskalvosta tulevan virtausvastuksen välinen tasapaino liikuttaa mäntää anturin sisällä ja tätä käytetään IOP:n laskemiseen, kun ilmavirran aiheuttaman paineen määrä on tiedossa. Sarveiskalvoon kohdistuvaa painetta lisätään ilmapumpulla, kunnes sarveiskalvo litistyy, jolloin laitteen ilmavirran luoma paine ja IOP ovat yhtä suuria. Laitteen pneumaattinen elektroninen anturi muuntaa ilmanpaineen eron silmänpaineeksi, ja laite tulostaa mittauksen käyrän paperille reaaliajassa (ks. kuva 26). [16.]



Kuva 26. Reichert Model 30 -pneumatometri [32].

Silmää on litistettävä pneumatometrillä vähintään 5–10 sekuntia, jotta silmänpaine saadaan mitattua. Paperille tulostuva mittaustulos on pulssimuotoinen

esitys silmänpaineesta, ja reaaliaikainen silmänpainedata mahdollistaa suhteellisen verenvirtauksen laskennan. Silmän veritilavuus kasvaa systolisen paineen myötä ja pienenee diastolisen paineen myötä, jolloin silmänpaineen laskee samaan aikaan, kun veren tilavuus pienenee. Näin pneumotonometrillä saatu IOP-pulssiaaltomuoto voidaan muuntaa silmän tilavuuden aaltomuodoksi. [16.]

Pneumatometrit ovat helposti liikuteltavia ja helppokäyttöisiä tonometrejä minimaalisella kontaktilla sarveiskalvoon, mutta niiden käyttö vaatii anestesiaa ja mittauskärjen huolellista desinfiointia potilaiden välissä. [27.] Vaikka pneumatonometrit toimivat applanaation periaatteen mukaisesti, niin indentaatiotonometriä tapaam ne vääristävät mittaustuloksia silmänsisäisen nesteen siirtymisen takia. [16.]

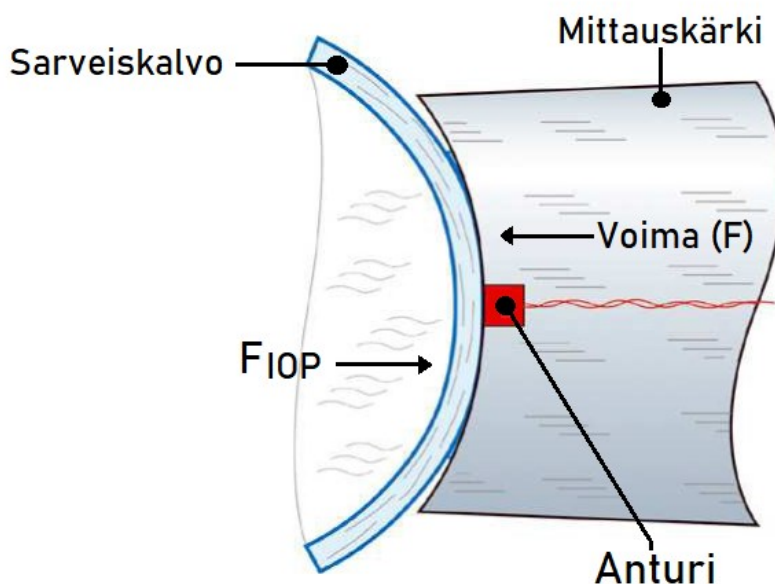
Tarkkuudeltaan pneumatonometrit ovat osoittautuneet melko tarkoiksi mittausrakenteiksi, mutta GAT:iin verrattuna ne yli- tai aliarvioivat silmänpaineen riippuen mittausalueesta [27]. Pneumatometri mielletään luotettavaksi glaukooman seulontatyökaluksi ja mittaustulosten on arvioitu olevan GAT:ia luotettavampia silmän laserleikkauksen jälkeen. Laitteen hyödyllisyys kliinisessä käytössä on tällä hetkellä kyseenalaista. [18.]

5.6 Dynaaminen ääriiivatonometria (DCT)

Sveitsissä vuonna 2005 ensi kerran esitellyssä dynaamisessa ääriiivatonometriassa (DCT) hyödynnetään ääriiivojen sovittamista, jolla voidaan eliminoida edeltävien menetelmien mittausvirheitä aiheuttavat tekijät. Näitä tekijöitä ovat muun muassa sarveiskalvon paksuus ja sarveiskalvon elastiset ominaisuudet. [12.] DCT perustuu Pascalin lakiin, jonka mukaan suljetussa tilassa olevaan nesteeseen vaikuttava ulkoinen paine jakautuu tasaisesti koko nestemäärään. [27.] Kehitetyn menetelmän tavoitteena on minimoida sarveiskalvon biomekaanisten ominaisuuksien vaikutus mittaustuloksen luotettavuuteen [12].

Mittaus suoritetaan DCT:ssä pienellä piezoresistiivisellä paineanturilla, joka on upotettu sarveiskalvon muotoa jäljittelevään mittauskärkeen [12]. Mittauskärki on suojattu ohuella silikonikalvolla, ja anturin päällä on kertakäyttöinen korkki infektioriskin vähentämiseksi [18]. Kärjen kaarevuus vastaa suunnilleen

sarveiskalvon muotoa paineen ollessa sama molemmilla puolilla pintaa [12]. Kun mittauskärjen ja sarveiskalvon ääri viivojen sovitus on valmis, sarveiskalvon tangentialiset voimat kumoutuvat, ja upotettu paineanturi mittaa teoriassa silmänpaineen ilman sarveiskalvon biomekaanisten ominaisuuksien vaikutusta (ks. kuva 27) tulokseen [18]. Silmään kohdistuvan paineen, eli anturiin kohdistuvan sähkövastuksen muuttuessa laitteen tietokone laskee paineen muutoksen sähkövastuksen muutoksen perusteella [12].



Kuva 27. Sarveiskalvon ja DCT-tonometrin mittauskärjen pinnan vierekkäin asettelu [12].

Paineanturi alkaa kerätä tietoa sarveiskalvon keskiosan otettua mittauskärjen pinnan muodon. IOP-mittaus otetaan 100 kertaa sekunnissa, ja kokonainen mittausjakso vaatii noin 8 sekunnin kosketusajan sarveiskalvoon. Mittauksen aikana laite antaa äänipalautetta, jolla varmistetaan asianmukainen kontakti sarveiskalvoon. [12.] Laite ilmoittaa mittauksen jälkeen LCD-näytöllä suoritettua IOP-mittauksituloksen (ks. kuva 28) ja sen laatuparametria (Q) sekä silmän pulsin amplitudin (OPA), jolla saadaan epäsuoraa tietoa silmän suonikalvon perfuusiosta. [18.]

DCT-tonometriä käytetään GAT:n tapaan rakolamppuun asennettuna, ja mittaus vaatii sarveiskalvon puudutuksen, mutta ei väriainetippojen käyttöä [18].



Kuva 28. Pascal DCT-tonometri ja sen näytöltä luettava mittaustulos [33].

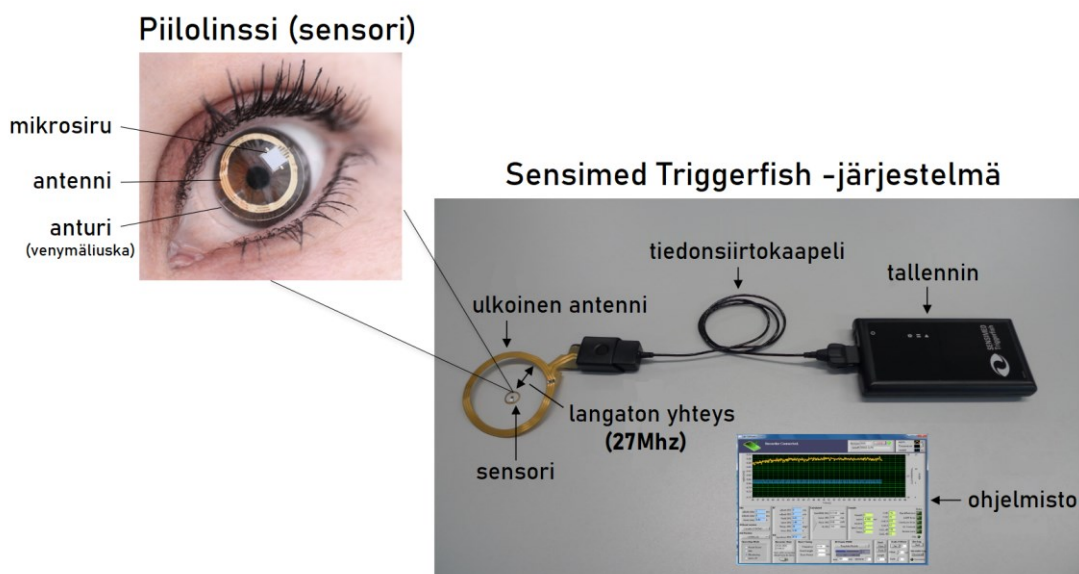
DCT-tonometrin mittaustulokset ovat tarkempia ja toistettavimpia kuin GAT:n ja ORA:n tulokset [27], ja GAT:iin suoraan verrattuna DCT:llä saadut IOP-arvot ovat korkeampia. Näiden kahden tonometrin mittaustuloksien väliset erot kasvavat erityisesti normaalista poikkeavilla CCT-arvoilla, minkä vuoksi DCT:n mittaustuloksien arvioidaan mahdollisesti olevan vähemmän alttiita CCT:n vaikutukselle. [27.] Tämän vuoksi DCT:tä voidaan hyödyntää IOP-mittauksissa potilailla, jotka ovat käyneet silmäleikkauksessa [18].

DCT:n heikkouksia ovat sen rakolampun, sarveiskalvokontaktin, anestesian ja henkilökunnan koulutuksen tarve. Lisäksi potilaan täytyy olla hyvin yhteistyökykyinen tarkkojen mittaustuloksien saamiseksi [18].

5.7 Jatkuva silmänpaineen seuranta

Sensimed Triggerfish on Sveitsissä kehitetty pienikokoinen sähkömekaaninen järjestelmä, jossa kertakäyttöiseen piipiolinssiin upotettu mikrosiru lähettää

anturin keräämän mittaustiedon langattomasti silmän ympärillä kiinnitettyssä piidikkeessä olevaan vastaanottimeen. Tiedot siirretään vastaanottimesta ohuella kaapelilla kannettavaan tallentimeen (ks. kuva 29), johon mahtuu yhteensä 288 datajoukkoa yhden vuorokauden ajalta. Mittaus-session päätyttyä tiedot vietään tallentimesta Bluetooth-teknologiaa hyödyntäen tietokoneelle, johon asennettavan sovelluksen avulla tiedot voidaan purkaa ja analysoida. [18.]



Kuva 29. Sensimed Triggerfish -järjestelmä [34].

Triggerfish mittaa sarveiskalvon kaarevuuden muutoksia, joiden uskotaan johtuvan silmänpaineen muutoksista. Laitteen mittaustulokset ilmaistaan millivolt-tiekvivalentteina (mVeq) eikä niillä ei ole suoraa korrelaatiota IOP-arvoihin. Järjestelmän etuja ovat piilolinssin helppo poistaminen ja purkaminen käytöstä, potilaiden hyvä sietokyky ja hyväksyntä sekä mittausten toistettavuus. Heikkouksia taas ovat suhteellisen korkea hankintahinta ja mittaustulosten validiteetti, sillä suora korrelaation puute millivoiteissa saatujen mittaustulosten ja IOP-arvojen välillä puuttuu, minkä vuoksi Triggerfishin kliininen hyöty on toistaiseksi kyseenalaista. [18.]

5.8 Laitteiden luokittelu menetelmittäin

Luvussa läpi käydyistä tonometriä menetelmistä ja niitä hyödyntävistä laitteista tehtiin kokonaiskuvan tarkastelua helpottava luettelo (ks. taulukko 2 alla).

Taulukko 2. Silmänpainemittausmenetelmiä ja hyödynnäviä laitteita.

Menetelmä	Laite	Toimintaperiaate
Indentaatio	Schiøtz, Tono-Pen	Mitataan etäisyyttä, jonka verran painolla varustettu maan vetovoiman alainen mittauskärki painuu sarveiskalvoon.
Applanaatio	Bioresonator ART, GAT, Perkins, Pneumatonometrit, Tono-Pen	Mitataan sarveiskalvon tietyn pinta-alan litistämiseen tarvittavan voiman määrää.
Kimmoke	iCare-tonometrit	Hitaasti liikkuva kevyt anturi ammutaan sarveiskalvoa päin ja mitataan sähkömagneettisen induktion avulla anturin hidastuvuutta, josta lasketaan silmänpaine.
Ilmapuhallus (kontaktiton applanaatio)	Corvis ST, ORA	Selvitetään sarveiskalvon litistymiseen tarvittavan ilmapuhalluksen paineen määrä, josta lasketaan silmänpaine.
Dynaaminen ääriiviasovitus	Pascal DCT	Mittauskärkeen upotettu pieni piezoresistiivinen paineanturi mittaa 100 kertaa sekunnissa sähkövastuksen muutosta, josta lasketaan silmänpaine.
Jatkuva seuranta	Sensimed Triggerfish	Pieni venymäliuska-anturi mittaa sarveiskalvon kaarevuuden muutosta ja palauttaa tuloksen millivoltteikvivalenteina.

Taulukosta voi silmällä menetelmittäin nykyisin käytössä olevat tonometrit sekä niiden toimintaperiaatteen. Ilmapuhallustonometrit on luokiteltu omaan kategoriinsa, vaikka suurin osa ilmapuhallustonometreistä hyödyntää mittauksessa applanaation periaatetta, minkä vuoksi ne voidaan mieltää myös kontaktitonta applanaatiotonometriä (Non-Contact Tonometry, NCT) hyödyntävinä mittauslaitteina.

6 Tonometriamenetelmien ja laitteiden vertailua

Oikean tonometrin valintaan vaikuttaa useita tekijöitä, joista kannattaa ensin pohtia mittaustuloksen käyttötarkoitusta ja valitun menetelmän vaatimia resursseja. Valintaan vaikuttavia resursseja ovat mittaushenkilön kokemus ja koulutus, budjetti, valmius huoltaa laitteita, mittaustila ja mittauksen kesto. Kun ollaan tekemässä ensimmäistä suuntaa antavaa mittausta tai kyse on rutiinimaisesta seulontamittauksesta, niin tilanteeseen soveltuu yleensä halpa, helppokäyttöinen ja nopea tonometri, jota voidaan käyttää kätevästi tarpeen vaatiessa lyhyelläkin varoitusaajalla. Tällöin mittaustarkkuus ei välttämättä ole riittävä kliiniseen päätöksen tekoon tai sairauden diagnosointiin, mutta mittauksella voidaan helposti tehdä päätöksiä jatkotutkimusten suhteen. Hienovaraisempia ja enemmän valmistelua vaativia tonometrejä siirrytään käyttämään, kun halutaan tarkempia tuloksia ja potilaasta on jo kerätty enemmän terveydellistä tietoa.

6.1 Kustannukset

Tonometrit on työssä jaettu kolmeen eri hintaluokkaan (ks. taulukko 3 alla), joiden avulla voidaan valita resursseihin sopiva ja käyttötarpeita vastaava laite silmänpaineen mittaukseen.

Taulukko 3. Tonometrejä hintaluokittain.

Hintaluokka	Alle 5 000 €	5 000–10 000 €	Yli 10 000 €
Hintaluokkaan sisältyviä laitteita	iCare, Tono-Pen, Perkins, Goldmann, Schiøtz, Sensimed Triggerfish	Ilmapuhallustonometri, Pascal, Bioresonator ART	Corvis ST, pneu-matonometrit, ORA

Edullisimpaan alle 5000 euron hintaluokkaan kuuluu pienikokoisia kannettavia tonometrejä, kuten iCare-, Tono-Pen- ja Perkins-mittarien eri mallit. Myös Goldmann-tonometrejä ja Sensimed Triggerfish-järjestelmä on saatavilla alle 1000 euron hintaan. Schiøtz-tonometrejä on yhä käytössä ympäri maailmaa niiden edullisen hinnan vuoksi.

Mittarin hinnan lisäksi mittauskustannuksia voivat lisätä kertakäyttöiset ja vaihdettavat osat kuten paristot, akut ja mittauspäät sekä mittaustoimenpiteen vaatimukset, kuten puudutus ja fluoreseiini. Perinteisessä GAT- ja Perkins-mittauksessa potilaan silmä puudutetaan ja värjätään. Tono-Penistä vaihdetaan mitausten välissä silikonisuoja, ja iCare käyttää kertakäyttöisiä anturipäitä. [16.] Etenkin iCaren ja Tono-Pen Avia-mallin akun kesto on pitkä. iCaren paristo on vaihdettava vain kerran vuodessa. [25.]

Noin 5 000–10 000 euron hintaluokkaan sisältyy ilmapuhallustonometrejä, Pascal DCT sekä Bioresonator ART. Ilmapuhallustonometriä ei edellytä puudutusaineen tai väriaineen käyttöä. Pascal-tonometrillä ja Bioresonator ART:lla mitattaessa käytetään puudutusainetta, mutta ei fluoreseiinia. [18.]

Kalleimpaan 10 000 euron hintaluokkaan sijoittuvat Corvis ST, ORA sekä erilaiset pneumatonometrit. Kontaktittomien ilmapuhallustonometriä Corvis ST:n ja ORA:n käyttö ei vaadi paikallispuudutusta tai fluoreseiinia. Pneumatonometreillä mitattaessa joudutaan käyttämään paikallispuudutusta. [18.]

6.2 Helppokäyttöisyys, kannettavuus, nopeus, huollontarve

Budjetin lisäksi mittarin valintaan vaikuttaa laitetta käyttävän henkilökunnan kokemus ja mittaustilanteen toivottu kesto. Mittauksiin vaaditaan osalla menetelmistä kokenut mittaaja, sillä asiat kuten liiallisen paineen kohdistaminen silmäluomiin tai virheellisen fluoreseiinin määrän annostelu heikentävät mittauksen tarkkuutta. Pieniltä vaikuttavat asiat, kuten mitattavan potilaan hengityksen pidättäminen voivat vaikuttaa mittaustarkkuuteen, mutta pätevä mittaaja osaa kiinnittää huomiota pieniinkin yksityiskohtiin. [18.]

Helppokäyttöisyydeltään ja kätevyydeltään kannettavat tonometrit ovat omassa luokassaan. Ne vaativat mittaajalta vähiten kokemusta tarkkojen tulosten saamiseksi. Kannettavat tonometrit ovat tämän lisäksi nopeita ja vähiten huoltoa sekä ylläpitoa vaativia laitteita. Mittaus ilmapuhallustonometrillä, iCarella ja Tono-Penillä ei edellytä lääketieteellistä osaamista. Myös iCare HOME -versiot on suunniteltu potilaan itsenäisesti suoritettavaan silmänpaineen seurantaan.

[18.] Kannettavat pneumatonometrit ovat myös helppokäyttöisiä, mutta laitteet vaativat säännöllistä kalibrointia ja mittaaminen sarveiskalvon anestesiaa [27].

Istuma-asennossa käytettävän GAT:n operointi vaatii käyttäjältä kokemusta, mutta laite on silti suhteellisen helppokäyttöinen. Mittaushenkilön aikaisempi kokemus voi vaikuttaa mittaustarkkuuteen. Tähän vaikuttavat myös anestesian ja fluoreseiinin käyttö, joista jälkimmäisen väärä annostelu voi heikentää mittauksen tarkkuutta. GAT:n tarkkuuden säilyminen vaatii myös kuukausittaisen kalibroinnin, jonka suorittaa osaava henkilökunta. GAT:n kanssa monilta piirteiltään samankaltainen Bioresonator ART tarjoaa hieman helpompaa käytettävyyttä, sillä mittaus ei vaadi fluoreseiinin käyttöä ja laite on itsekalibroituva. Pascal-tonometrin käyttö on melko haastavaa, joten käyttö vaatii koulutusta. [18.]

6.3 Potilaan yhteistyökykyisyys

Etenkin lapsilta ja vanhuksilta silmänpainetta mitattaessa valinnassa tulee huomioida laitteen mukavuus ja se, kuinka paljon mittaustilanteessa tarvitaan mitattavan yhteistyökykyisyyttä ja sietokykyä. Tämän vuoksi joissain tilanteissa väriaineen käytön ja puudutuksen tarpeettomuus voivat olla selkeitä etuja.

Kannettavat kontaktittomat mittarit ovat yleensä paras vaihtoehto, sillä mittaaminen ei vaadi pitkää paikallaan olemista, eikä se tunnu epämiellyttävältä. Myöskään puudutus- tai väriainetippojen käyttö ei ole tarpeen. Kontaktillisista mitta-reista iCare ja Tono-Pen tekevät lyhytkestoisen kontaktin silmän kanssa. Kuitenkin joissain tapauksissa, kuten erittäin herkillä silmillä, saattaa normaalisti lähes huomaamaton iCare-mittari aiheuttaa epämukavuutta [16]. Tono-Penillä voidaan mitata silmänpaine myös terapeuttisten piilolinssien läpi, mikä tekee siitä hyvän vaihtoehdon silloin, kun piilolinssin poistaminen ei ole suositeltavaa vakavasta silmävammasta tai -sairaudesta johtuen. [12.]

Toisin kuin täysin kontaktittomat ilmapuhallustonometrit, pneumatonometri on kosketuksissa sarveiskalvon kanssa, joten anestesian käyttö on tarpeellista. Verrattuna muihin tonometreihin kontakti sarveiskalvon kanssa on kuitenkin minimaalinen.

Pascal-mittari vaatii käyttäjän osaamisen lisäksi mitattavalta henkilöltä kärsivällisyyttä. Laite ei sovellu käytettäväksi lasten ja vanhusten kanssa muuten kuin erityisen tarpeen vaatiessa. Potilaan sarveiskalvo puudutetaan, ja mittauksen aikana on pidettävä päätä paikoillaan mittausasennossa vähintään kahdeksan sekunnin ajan. [18.]

6.4 Mittaus eri asennoissa

Mittarin valintaan voi vaikuttaa potilaan asento ja tila, jossa mittaus suoritetaan, kun silmänpaine halutaan mitata esimerkiksi sänkypotilaalta tai muuten liikuntarajoitteiselta. Mahdollisuudesta mitata silmänpainetta eri asennoissa on myös hyötyä glaukooman diagnosoinnissa, sillä silmänpaineen on havaittu muuttuvan asennon mukaan. Yleensä silmänpaine on korkeampi makuuasennoissa, etenkin vatsaltaan. Asennosta johtuvan silmänpaineen vaihtelun on havaittu olevan suurempaa glaukoomaa sairastavilla, tai glaukoomariskissä olevilla henkilöillä, etenkin yön aikana. [35.] Suurin osa tonometreistä kuitenkin rajoittaa mittaushenkilön istuma-asentoon.

Tonometreistä vain Schiøtz-mittaria, jonka indentaatiomenetelmä hyödyntää painovoimaa, voidaan käyttää ainoastaan makuuasennossa oleviin potilaisiin. Suurinta osaa tonometreistä rajoittavat niiden oheislaitteet, kuten rakolamppu, ja puudutus- sekä väriaineiden ominaisuudet. Goldmann-, Corvis-, ORA-, Bioresonator ART- ja Pascal DCT-tonometrit toimivat vain pystyasennossa, sillä potilaan on istuttava mittarin edessä. GAT:n kannettava versio Perkins toimii myös makuuasennossa, mutta puudutuksen pakollisuus voi olla epäkäytännöllistä - esimerkiksi tutkimuksissa, joissa otetaan myös yön aikaisia mittauksia. [35.] Sama ongelma pätee kannettaviin pneumatonometreihin, joilla mitatessa sarveiskalvon puudutus on pakollista. Kannetavat tonometrit tarjoavat ratkaisuja kyseisten olosuhteiden luomaan ongelmaan, ja esimerkiksi Tono-Penillä voidaan tehdä mittaus potilaan ollessa missä vain asennossa, mutta puudutuksen pakollisuus rajaa käyttömahdollisuutta. Alkuperäinen iCare-mittari vaati pystyssä olemista, mutta uudemmissa PRO-, IC100- ja IC200-malleissa mittaus onnistuu myös makuuasennossa ilman sarveiskalvon anestesiaa. [16.]

Ilmapuhallusmittareiden ei-kannettavilla versioilla mittaus tehdään istualtaan, mutta kannettavat versiot mahdollistavat mittauksen missä vain asennossa, eikä puudutusta tarvita ilmapuhallustonometreillä.

Silmänpaineen ympärivuorokautiseen seuraamiseen Sensimed Triggerfish -järjestelmä on paras vaihtoehto, kun halutaan hahmottaa silmänpaineen vaihtelua eri tilanteissa päivän mittaan. [18.]

6.5 Infektioriskit

COVID-19:n myötä ajankohtaiseksi valintakriteeriksi voidaan nostaa ilmaitse tai kosketuksen välityksellä tarttuvien infektioiden leviämisen riski silmäpainemittauksen aikana. COVID-19:n ja muiden ilmaitse leviävien tautien osalta jotkin tonometrit sisältävät suuremman tartuntariskin. Ilmaitse tapahtuvan tartunnan kasvaneeseen riskiin on syytä kiinnittää huomiota esimerkiksi Influenssakauden aikana, koronatartuntojen määrän ollessa korkealla tasolla tai työskennellessä riskiryhmään kuuluvan potilaan kanssa, jolla heikentynyt vastustuskyky lisää infektioriskin vakavuutta.

Tartunnan riskin minimoimiseksi voi olla tarpeellista valita tietty mittausvaihtoehto tai tehdä joitain muutoksia aikaisempiin mittaustapoihin. Kertakäyttöisiä mittauspäitä hyödyntävät iCare ja Tono-Pen ovat lisääntyneen tartuntariskin aikaan parhaita vaihtoehtoja silmäpainemittaukseen. Molemmat niistä ovat helposti puhdistettavia ja silmän kanssa kontaktissa oleva kertakäyttöinen steriilisti pakattu mittauspää vaihdetaan joka mittauksen jälkeen. Näiden laitteiden käyttö aiheuttaa hyvin pienen riskin kontaktissa saatavalle infektiolle, ja etenkin iCare-tonometrin minimaalinen ja nopea kontakti on erinomainen vaihtoehto lisääntyneen tartuntariskin kohdalla. Myös GAT:ssa voidaan vaihtaa kertakäyttöisiin aplanaatiopäihin, jolloin huonosti desinfioidun tai likaisen mittauspään kontaktin aiheuttama infektioriski pienenee hieman. [36.]

Kaikista tonometreistä kontaktittomat ilmapuhallusmittarit sisältävät suurimman ilmaitse tarttuvan taudin leviämisen riskin, kun mittauksen aiheuttaman ilmapuhalluksen mukana kulkeutuu pisaroita ja aerosoleja [36].

6.6 Tarkkuus

Edellä mainitut käytännön rajoitukset eivät vaadi kovinkaan syvällistä mittarien ominaisuuksien vertailua tai tonometrien ja silmän ominaisuuksien vuorovaikutusten tutkimista, jotta voidaan löytää sopiva menetelmä. Tilanne muuttuu haastavammaksi, kun otetaan huomioon potilaan muu terveydellinen tila ja halutaan alkaa saamaan tarkkoja mittaustuloksia oikean hoidon valitsemiseksi, etenkin jos silmänpainemittauksen tulokset vaikuttavat valintaan. Monet terveydelliset tekijät voivat vääristää mittaustulosta, sekä eri mittarit reagoivat näihin tekijöihin eri tavoin. Mahdollisimman luotettavan mittaustuloksen saamiseksi on tunnettava potilaan tausta ja eri tonometrien soveltuvuus kuhunkin tilanteeseen, sekä lopuksi sovitettava nämä tekijät yhteen.

Tonometrien tarkkuuksissa on paljon tilannekohtaisia eroja. Siirryttäessä mataliin tai korkeisiin silmänpaineen mittausalueisiin suurin osa mittareista alkaa aliarvioimaan silmänpaineen määrää. Schiøtz-mittaria ei enää yleensä oteta mukaan vertailuihin, sillä sen tarkkuus ei ole uudempien menetelmien tasolla. Schiøtz-tonometri jätetään myös tässä osiossa vertailun ulkopuolelle.

Goldmann-tonometria ollaan pitkän ikänsä ja tarkkuutensa ansiosta käytetty vertailukohteenä muille tonometreille ja se tunnetaan alan kliinisenä standardina. GAT-mittausten hyvä toistettavuus lisää myös menetelmän vertailukelpoisuutta [16]. Kannettavat GAT, eli Perkins, vastaa tarkkuudeltaan ja virhealttiudeltaan GAT-mittausta, ja näiden on havaittu yli- ja aliarvioivan silmänpainetta matalilla ja korkeilla silmänpaineen mittausalueilla [18].

Bioresonator ART:n tarkkuuden määrittely vaatii vielä tutkimusta. Vähäiset tutkimukset ja vertailut ovat antaneet viitteitä, että mittari olisi melko tarkka ja tulosten toistettavuus olisi hyvä [18].

Tono-Penin ja GAT:n välisissä vertailuissa mittareiden antamat IOP-arvot ovat olleet hyvin verrannollisia kohtuullisilla silmänpaineilla (10–30 mmHg), vaikkakin Tono-Penin tulosten toistettavuus on ollut hieman heikompaa. Korkeammilla silmänpaineilla Tono-Pen alkaa aliarvioimaan silmänpainetta toisin kuin GAT, joka tunnetusti taas yliarvioi silmänpainetta korkeammalle mennessä. [37.]

Myös iCaren mittaustulosten on tutkittu korreloivan hyvin GAT:n kanssa, mutta aliarvioivan silmänpainetta korkeilla paineilla. Laitteilla saadut mittaustulokset eivät sovellu kliinisen päätöksen korkeilla silmänpaineilla. [37.]

Perinteisten ilmapuhallusta hyödyntävien kontaktittomien (NCT) mittareiden on havaittu yliarvioivan silmänpainetta merkittävästi verrattuna GAT:iin ja iCare-kimmoketonometreihin. Tämän lisäksi NCT-mittareiden tarkkuus alkaa heikentyä yli 16 mmHg:n ylittävällä silmänpaineella, sekä tarkkuus heikentyy vielä huomattavammin korkeammalla yli 20 mmHg:n menevällä paineella. Mittaustarkkuus on myös ilmanpainemittareilla laitekohtaista ja kalibrointia on tehtävä jatkuvasti. [12.]

NCT-mittarit soveltuvat tarkkuutensa ja ominaisuuksiensa perusteella paremmin seulontatyökaluiksi, eikä mittaustuloksia voi suositella käytettäväksi kliiniseen päätöksentekoon [18.]

Uudemmissa NCT-mittareista myös ORA yliarvioi silmänpainetta huomattavasti verrattuna GAT:iin. Corvis ST puolestaan hieman aliarvioi silmänpainetta GAT:iin verrattuna, mutta sen antamat silmänpaine arvot ovat erittäin tarkkoja. Kontaktittomuuden lisäksi molempien laitteiden etuna on se, että niillä voidaan minimoida silmän biomekaanisten tekijöiden vaikutus mittaustuloksen tarkkuuteen. Tämän lisäksi uusimpien tutkimusten perusteella ORA:lla saadaan paremmin ennakoitua glaukooman etenemistä kuin GAT:lla. ORA:n mittaustulosten GAT-vertailun silmänpaine (IOPg), sarveiskalvon hystereesiarvo (CH) sekä sarveiskalvokompensoitu silmänpaine (IOPcc) ja Corvis ST:n (CST) biomekaanisesti korreloitu IOP (bIOP) tarjoavat tietoa, jota suurimmalla osalla muista menetelmistä ei voi mitata. [18.] CST ja ORA ovat tarkkuutensa, mittauksellisten ominaisuuksiensa sekä käyttömukavuutensa ansiosta hyvin käyttökelpoisia laitteita, mutta ne eivät suoraan voi korvata GAT:ia [38]. Vertailuissa on huomattu mittaustuloksien merkittävästi eroavan toisistaan joissain tilanteissa ja tulosten verrannollisuuden olevan huonoa. Jos tulevaisuudessa toinen laite korvaisi GAT:n, jouduttaisiin glaukoomariskille altistavia silmänpainerajojen suosituksia mahdollisesti muuttamaan täsmäämään uuden laitteen antamia arvoja. [39.]

Perinteisten ilmapuhallustonometrien tavoin pneumatonometrit soveltuvat tarkkuudeltaan paremmin seulontatyökaluiksi. Matalilla paineilla pneumatonometrit aliarvioivat ja korkeilla yliarvioivat silmänpainetta GAT:ia enemmän. [27.]

DCT antaa tarkempia ja luotettavampia IOP-mittaustuloksia kuin GAT. Toisin kuin muut menetelmät, DCT ei perustu tietyn alueen appanointiin tai indentaatioon, jolloin se ei ole muiden metodien tavoin altis sarveiskalvon biomekaanisista ominaisuuksista aiheutuville virhetekijöille. Mittarin sijoittelu ei myöskään vaikuta mittauksen tarkkuuteen, sillä anturi peittää koko sarveiskalvon. [12.] Pascal DCT antaa lisäksi mittaustuloksen laadulle arvosanan asteikolla 1–5, jossa 5 tarkoittaa epäonnistunutta mittausta, kun arvot 1 ja 2 ovat kliinisesti käyttökelpoisia mittaustuloksia [27].

Mittareiden välisissä vertailuissa DCT antaa terveillä silmillä korkeampia silmänpainearvoja kuin GAT, sekä GAT:n tavoin DCT:n on huomattu yliarvoivan silmänpainetta sarveiskalvon kaarevuuden kasvaessa. NCT-mittari tai Tono-Pen voivat olla parempia vaihtoehtoja sellaisissa tilanteissa, joissa sarveiskalvon kaarevuuden vaihtelu on suurempaa. [40.]

Piilolinssiin upotetun Sensimed Triggerfishin vertailu toisiin tonometreihin ei välttämättä ole hyödyllistä niiden erilaisten käyttötarkoitusten ja mittaustulosten muodon takia, kun Triggerfish ei mittaa suoraa IOP-arvoa normaaliin tonometriin tapaan. Vertailuissa on kuitenkin havaittu, että linssin mitaamat arvot korreloivat hyvin GAT:n antamien IOP-mittaustulosten kanssa ensimmäisten 24 tunnin ajan, jonka jälkeen yhtäläisyydet vähenevät. [18.]

6.6.1 Mittausaika

Myös mittauksen ajallinen pituus ja hetki vaikuttavat mittaustulosten luotettavuuteen. Silmän seinämässä sijaitseva suonikalvo täyttyy ja tyhjenee verestä sydämen toimintakierron mukana aiheuttaen jatkuvaa silmänpaineen vaihtelua. Muutos systolisen (yläpaineen) ja diastolisen (alapaineen) välillä voi olla jopa 6 mmHg sekunnissa riippuen, missä vaiheessa kiertoa mittausta otetaan. [12.] Jotkut laitteet ratkaisevat ongelman käyttämällä useamman mittaustulosten keskiarvoa, tai laskemalla silmän pulssin amplitudin (OPA), eli verenkierron

aiheuttaman muutoksen silmänpaineessa ja tunnistamalla verenkierron vaiheen mittaushetkellä. OPA:n mittausmahdollisuus auttaa glaukooman diagnosoinnissa, sillä OPA on usein matalampi glaukoomaisilla silmillä, sekä madaltuneen OPA:n tiedetään olevan yhteydessä vakavammille glaukooman aiheuttamille vaurioille. [41.]

GAT:lla mitattaessa OPA otetaan joissain määrin huomioon fluoreseiinikaarien vuoksi, sillä OPA vaikuttaa kaarien asentoon. Kun applanaatiovoima on säädetty oikein, eli kaaret on oikein positioitu, niin äärimmäisimmät OPA:n vaikutukset on luonnostaan minimoitu mittaustuloksesta. [12.]

Ilmapuhalluksen yksi heikkouksista on se, että sarveiskalvoa litistetään vain 1–3 millisekunnin ajan, jolloin mittaustulos saadaan OPA:n sattumanvaraiselta hetkeltä. Tällöin suonikalvon täyttymisen asteen vaikutus voi olla huomattava mittaustuloksen kannalta. Perinteisellä NCT-mittarilla ei myöskään voida määrittellä, missä vaiheessa kalvon sykliä ollaan. [12.] Uudemmat NCT-mittarit tarjoavat mahdollisuuden kerätä tarkempaa biomekaanista tietoa silmästä ja OPA:sta, mutta tämä ei olisi mahdollista perinteisen NCT-mittarin lyhyemmällä mittausajalla ja esimerkiksi ORA:lla mittausaika on noin 20 millisekuntia [12].

Joillain pneumatonometreillä, kuten OBF-mittarilla (Ocular Blood Flow), on mahdollista mitata epäsuorasti verenkierron aiheuttamaa silmänpaineen vaihtelua [18]. Kontakti sarveiskalvon kanssa kestää vähintään noin 5–10 sekuntia [16].

Tono-Penin mittauksen aikaväli vastaa perinteistä ilmapuhallusmittausta ja pulsstin vaiheen arviointi on lyhyen mittausajan takia haastavaa. Tono-Pen kuitenkin laskee usean mittauksen keskiarvon ja antaa myös arvion lasketun mittaustulokseksi annetun keskiarvon tarkkuuden laadusta. Tono-Pen XL laskee keskiarvon neljästä ja Tono-Pen Avia puolestaan kymmenestä mittauskerrasta [12].

iCaren vuorovaikutus sarveiskalvon kanssa kestää kaikista tonometreistä lyhyimmän aikaa, ja kontakti kestää vain muutamia mikrosekunteja. Kuten NCT-mittarilla ja Tono-Penillä, mittaus voi ajoittua mihin tahansa kohtaa silmänpaineen sykliä, minkä vuoksi mittauksen tarkkuus kärsii verrattuna esimerkiksi GAT:iin. [12.] Myös iCare hyödyntää useita mittauskertoja tuloksen

muodostamiseen ja laskennassa käytetään kuuden peräkkäisen mittauksen arvoja. Lisäksi lopulliselle mittaustuloksien keskiarvolle annetaan myös laatu parametri [18].

DCT:n kontakti silmään kestää noin 8–10 sekuntia, joka mahdollistaa myös OPA:n mittaamisen silmänpainemittauksen yhteydessä. DCT:llä voidaan erottaa mittauksen ajankohdan sijoittuminen diastoliseen tai systoliseen silmänpainevaiheeseen [40], ja DCT antaa tuloksena diastolisen IOP-arvon [18].

6.6.2 Silmän ominaisuuksien vaikutus

Silmän rakeenteelliset ja biomekaaniset ominaisuudet vaikuttavat eri tavoin tonometrien tarkkuuteen. Esimerkkejä mittaustulokseen vaikuttavista tekijöistä ovat muun muassa sarveiskalvon muodon epäsäännöllisyydet, haavat ja paksuus sekä hajataitto.

Yksi merkittävimpiä mittaustarkkuuteen vaikuttavia silmän ominaisuuksia on sarveiskalvon paksuus eli Central Corneal Thickness (CCT). Yleisesti normaalia paksumpi sarveiskalvo vääristää silmänpainemittausten tulosta todellista suuremmaksi ja ohuempi pienemmäksi. CCT:n suuruuteen vaikuttavat esimerkiksi ikä, jotkut sairaudet sekä myös elämäntavat. [12.]

Huolimatta Goldmannin pitkäaikaisesta asemasta alan kliinisenä standardina, sen yksi suurimpia heikkouksia on sen alttius silmän biomekaanisten ominaisuuksien vaikutus mittaustuloksien tarkkuuteen. GAT:n mittaukset aliarvioivat silmänpainetta matalilla CCT-arvoilla ja yliarvioivat sitä korkeilla arvoilla. CCT:n vaikutuksen kompensoimiseksi on kehitelty erilaisia kaavoja [18.] sekä biomekaanisten ominaisuuksien vaikutusta vähentäviä CATS-prismoja [16], mutta mikään yksittäinen ratkaisu ei ole laajassa käytössä. Silmänpaineseen vaikuttavat muutkin silmän ominaisuudet kuin CCT, joten vain yhden tekijän minimoiminen mittauksessa matemaattisen kaavan avulla ei ratkaise koko ongelmaa. Uudemmat tonometrit, joilla voidaan kerätä lisätietoa silmän biomekaanisista ominaisuuksista silmänpainemittauksen yhteydessä puolestaan mahdollistavat tarkemman CCT:n vaikutuksen laskennan. [18.]

CCT vaikuttaa perinteisiin NCT-mittauksiin vielä enemmän kuin GAT:iin [18]. NCT-mittaustulokset ovat verrattavissa GAT:n tuloksiin matalammilla CCT:n arvoilla, mutta paksummilla sarveiskalvoilla NCT yliarvioi huomattavasti GAT:ia enemmän. NCT on havaittu yliarvioivan IOP:ta noin 0,46 mmHg verran jokaista CCT:n 10 μ m kasvua kohden, kun puolestaan GAT:lla vastaava luku on noin 0,28 mmHg per 10 μ m. [27.]

ORA:n suurin etu on sen kyky kompensoida sarveiskalvon ominaisuuksien aiheuttamia mittausvirheitä. Laitteen mittaaman sarveiskalvon resistanssitekijän CRF-parametrin, eli sarveiskalvon muodonmuutoksen vastustusvoiman suuruudella voidaan matemaattisesti laskea CCT:n vaikutus mittaustuloksen tarkkuuteen. [18.]

Corvis ST:n laskema mittaustulos (bIOP) on ORA:n laskeman IOPcc:n tavoin esitys silmänpaineesta, jossa on laskelmallisesti minimoitu CCT:n vaikutus mittaustulokseen [18].

CCT vaikuttaa myös ilmanpaineen eroja hyödyntävään pneumatonometrin mittaustuloksiin enemmän kuin GAT:n tuloksiin. Vertailussa GAT:n kanssa Reichert Technologiesin valmistaman Model 30 -pneumatonometrin mittaamat IOP-arvot nousivat 0,1 mmHg enemmän kohti jokaista 10 μ m:n CCT:n kasvua kuin GAT:lla mitatut IOP-arvot. Kyseisessä vertailussa pneumatonometri hävisi tarkkuudeltaan CCT:n vaikutuksen eroja vertaillessa niukasti Tono-Penille, mutta se tuotti tarkempia tuloksia vaihtelevilla CCT:n arvoilla kuin NCT-mittari. [27.] Erot ovat kuitenkin monissa vertailuissa suhteellisen pieniä ja ne voivat johtua muistakin tekijöistä. Etenkin pneumatonometriä tarkkuutta koskien on tehtävä enemmän tutkimusta [18].

Vertailussa GAT:n kanssa DCT antoi huomattavasti korkeampia IOP-arvoja matalalla CCT:llä ja matalampia IOP-arvoja korkealla CCT:llä. Tämä voi enimmäkseen selittyä GAT:n taipumuksella yli- ja aliarvioida silmänpainetta suurilla ja matalilla CCT-arvoilla, vaikka CCT:n on havaittu vaikuttavan myös DCT:n tuotamiin mittaustuloksiin. [18.] DCT-menetelmän etuna CCT:n vaikutusta arvioitaessa on se, että mittausmenetelmä ei perustu sarveiskalvon applanaatioon. Paksumpi sarveiskalvo lisää applanaatioon vaadittavan voiman määrää, mikä

vaikuttaa siten suoraan mittauksesta saatuihin silmänpainearvoihin. Tämän takia Tono-Pen, NCT-mittarit sekä GAT antavat epäluotettavia tuloksia CCT:n muuttuessa, mutta DCT:n tuloksiin CCT:n vaikutus ei ole merkittävä. Näiden menetelmien vertailussa NCT on enemmän altis CCT:n vaikutuksille kuin Tono-Pen ja GAT. GAT:n ja DCT:n mittausarvojen erot pienenevät CCT:n kasvaessa, eli ohut sarveiskalvo vääristää GAT:n tuloksia enemmän kuin paksumpi CCT. Etenkin matalilla CCT-arvoilla on siis mittauksissa huomioitava GAT:n mittaman IOP-arvon aliarviointi. Sama pätee myös jossain määrin NCT-mittareihin ja Tono-Peniin. [40.]

CCT vääristää myös iCaren mittausarvoja ja etenkin korkealla CCT:llä iCare yliarvioi IOP:ta GAT:ia enemmän [27].

Sarveiskalvon vaikutuksen takia sen paksuuden mittaaminen on suositeltavaa silmänpainemittauksen yhteydessä. On myös hyvä huomioida, että joissain tapauksissa paksuuntunut sarveiskalvo voi vaikuttaa päinvastaisesti mittaustulokseen, koska nesteen aiheuttaman turvotuksen, eli edeeman, aiheuttama sarveiskalvon paksuuntuminen aiheuttaa monilla mittareilla silmänpaineen aliarviointia. Tono-Pen ja iCare aliarvoivat edemasilmän IOP:ta vähemmän verrattuna GAT:iin, mutta niiden aliarviointi on kuitenkin huomioitavalla tasolla. [37.]

Sarveiskalvon paksuuden lisäksi silmän muut rakenteelliset muutokset, kuten sarveiskalvon vauriot ja tautien aiheuttamat poikkeavuudet vaikuttavat myös tonometrien tarkkuuteen. Useiden mittausmenetelmien tarkkuus heikkenee myös mitattaessa silmiä, joihin on tehty leikkaushoitoja. Etenkin sarveiskalvoon vaikuttavien laserleikkausten, kuten SMILE-, PRK- ja LASIK-leikkausten on tutkittu heikentävän mittaustarkkuutta monilla menetelmillä. [42.]

CCT:n lisäksi GAT:n tarkkuuteen vaikuttaa useat häiriötekijät, kuten sarveiskalvon muodon epätasaisuudet, haavaumat ja hajataitaisuus [27]. GAT:n tarkkuutta voidaan parantaa epätasaisen sarveiskalvon ominaisuuksien osalta käyttämällä CATS-modifioitua prismaa, joka vähentää alttiutta silmän biomekaanisille ominaisuuksille [16].

Vertailussa suuri sarveiskalvon kaarevuus aiheutti GAT:lla ja DCT:lla IOP-tuloksen yliarviointia, kun taas Tono-Penin ja NCT:n mittaustuloksiin kaarevuudella ei ollut merkittävää vaikutusta. Samassa vertailuissa havaittiin merkittävää silmänpaineen aliarviointia korkeilla mykiön paksuuden arvoilla mitattaessa NCT- ja DCT-mittareilla. [40.] Myös sarveiskalvon rigiditeetti eli jäykkyys vaikutti Tono-Peniin GAT:ia vähemmän [16]. Tono-Pen on erinomainen valinta mittariksi, jos halutaan nopeita ja luotettavia mittaustuloksia, etenkin silloin kun silmän biomekaaniset ominaisuudet ovat normaalista poikkeavat. DCT:n kyky minimoida muille menetelmille tyypillisiä mittauksen virhelähteitä näkyy laitteiden vertailuissa. Silmän elastiset ominaisuudet, rigiditeetti ja sarveiskalvon muodon epätasaisuudet vaikuttavat DCT-mittauksiin muita menetelmiä vähemmän. [12.] Tämä tekee DCT:sta hyvän vaihtoehdon myös sarveiskalvoleikkausten ja -siirtojen jälkeisiin mittauksiin, eikä hajataitolla ole havaittu olevan merkittävää vaikutusta sen mittaustarkkuuteen [27].

iCaren erittäin lyhyt kontakti sarveiskalvon kanssa tekee siitä käyttäjäystävällisen vaihtoehdon vaurioituneille, herkille ja leikkauksenjälkeisille silmille. Kimmo-
ketonometrin mittaustuloksen tarkkuuteen vaikuttavat tutkitusti sarveiskalvon kaarevuus, hystereesi ja erilaisten tautien aiheuttamat tilat, mutta ei taittovirheet. Edellä mainitut asiat tulee huomioida, jos mittaus tehdään silmälle, jonka ominaisuudet ovat jollain tapaa poikkeuksellisia. Monessa tilanteessa iCare:lla saadut IOP-mittaustulokset korreloivat suhteellisen hyvin GAT:n tuloksiin, jonka vuoksi se voi olla hyvä työkalu GAT:n tueksi. [18.]

NCT-mittareiden toiminta perustuu usein enimmäkseen applanaation periaatteeseen, joten se on GAT:n lailla altis erilaisten silmän rakenteellisten poikkeamien aiheuttamille virhemittauksille [12]. ORA:n sarveiskalvon ominaisuuksien suhteen korreloitu IOPcc kompensoi sarveiskalvon poikkeavien ominaisuuksien aiheuttamia mittausvirheitä. ORA mittaa silmänpaineen GAT:ia tarkemmin leikkauksen jälkeisistä silmistä. Lisäksi sen antamat lisätiedot silmän biomekaanisista ominaisuuksista ovat hyödyllisiä esimerkiksi LASIK-leikkauksen aiheuttamien silmänsairauksien synnyn seurannassa. ORA:n CH-mittausarvojen avulla voidaan havaita myös muita sarveiskalvon sairauksia, kuten sarveiskalvon kartiorappeuma. [18.]

Myös CST:llä mitattaessa silmän biomekaanisten ominaisuuksien vaikutus mitaustulokseen on vähäisempää. CST on myös erinomainen vaihtoehto silmäleikkauksen jälkeisiin mittauksiin. Lisäksi sillä voidaan erottaa kartiorappeumaisia silmiä terveistä silmistä. [18.]

Samoin pneumatonometrit antavat GAT:ia luotettavampia tuloksia PRK- ja LASIK-leikkausten jälkeen. Muiden silmän rakenne-erojen ja pneumatonometrin IOP-mittaustuloksien välistä suhdetta on vielä tutkittava enemmän. [18.]

Käsitellyt tonometrit sekä niiden keskeisiä ominaisuuksia voi tarkastella tarkemmin luodusta valintataulukosta (liite 1). Taulukkoon on koottu tonometrin valintaa keskeisesti ohjaavat ominaisuudet.

7 Yhteenveto

Mittareita ja mittaustilanteita vertaillen havaittiin, että silmänpainemittauksen tekemiseen ei ole yhtä ainoaa oikeaa työkalua, joka toimisi joka tehtävään. Ymmärrystä silmänpaineesta ja eri menetelmistä kartoitetaan jatkuvasti ja kasvava tiedon määrä parantaa edelleen ymmärrystä menetelmien heikkouksista ja vahvuuksista. Glaukooman ja muiden silmäsairauksien seulonnassa, diagnosoinnissa ja seurannassa yhdistellään yleensä useita eri menetelmiä. Menetelmiä yhdistellessä on tärkeää ymmärtää, miksi tonometrien mittaustulokset eroavat toisistaan ja mitä niiden erot voivat paljastaa sekä miten eri tonometreilla saadut mittaustulokset vertautuvat toisiinsa.

Schiøtz-tonometreja näkee nykyisin harvoin laitteiden välisissä vertailuissa ja tutkimuksissa, eikä laitteilla otettuja mittaustuloksia käytetä enää kliinisten päätösten tekemiseen länsimaissa. Kehitysmaissa Schiøtz-tonometri on edelleen aktiivisessa käytössä ja hyväksyttävä vaihtoehto kliinisen päätöksenteon tukena. Laitteen matala hinta ja täysin mekaaninen toimintaperiaate voivat tehdä siitä joissain tilanteissa ainoan vaihtoehdon silmänpainemittaukselle.

Goldmann-applanaationometrin kehittämisen jälkeen tonometriä tutkimus otti suuria askelia eteenpäin sen uuden mittaussuunnitelman tarjoaman tarkkuuden myötä. Uudemmat mittaussuunnitelmat tuovat silmänpainetutkimukseen koko

ajan uutta tietoa, joka tulee jatkuvasti kehittämään ja muovaamaan alan kokonaisymmärrystä aiheesta. Modernit tonometrit voivat selventää silmänpainemittaukseen vaikuttavia tekijöitä, esimerkiksi hyödyntäen silmän biomekaanisia ominaisuuksia kuvaavia parametrejä, joiden vaikutuksista silmänpaineeseen ei välttämättä vielä edes tiedetä. Silmänpaineeseen vaikuttavien mekanismien tutkimuksen jatkuessa osa näistä parametreista tulee todennäköisesti vaikuttamaan tonometriä menetelmien kehittämiseen tulevaisuudessa.

Silmänpainemittauksen kliinisenä standardina tunnettu Goldmann-applanatiotonometri ei välttämättä ole vielä luovuttamassa asemaa nykyisille tonometreille. GAT:n vakiintunut asema alan standardina ja muiden menetelmien vertailukohteena on vaikuttanut siihen, miten kaikkea tonometriä alalla tarkastellaan – jopa siihen mitkä mittaustulokset mielletään tarkaksi. Toistaiseksi moderneimmista tonometreistä (ORA, CST, DCT) ei ole ainakaan suoraksi seuraajaksi GAT:lle, koska niiden mittaustulokset eivät ole riittävän verrannollisia GAT:n tuloksiin. Vaikka uudemmat tonometrit monelta osin olisivat GAT:ia tarkempia ja tarjoavat paljon uusia ominaisuuksia, niin laitteiden korkea hinta tulee hidastamaan niiden laajempaa yleistymistä käytössä. Toistaiseksi nämä laitteet tarjoavat ratkaisun tilanteisiin, joissa tarvitaan niiden tuottamaa lisätietoa, kuten esimerkiksi DCT:n mittaustuloksiin sisältyvää silmän perfuusiota kuvaavaa silmän pulssin amplitudia (OPA).

Corvis ST:n (CST) ja Ocular Response Analyzerin (ORA) mittauss ominaisuudet ovat hyödyllisiä poikkeuksellisten CCT-, OPA-, CH-arvojen sekä sarveiskalvon rakenteiden kanssa. Kontaktittomuus on myös näiden ilmapuhallusta hyödyntävien laitteiden tarjoama suurin etu.

Kannettavat mittarit ovat tonometreistä käytännöllisimpiä ja helppokäyttöisimpiä. NCT-mittari on paras vaihtoehto matalan yhteistyökykytason potilailla, sekä halutessa välttää sarveiskalvokontaktia. Toiset kannettavat mittarit tarjoavat muita etuja tietyissä erityistilanteissa, kuten sarveiskalvon poikkeavien ominaisuuksien kohdalla Tono-Penillä on matalampi alttius häiriötekijöille. Kannettavat kimmoketonometrit ja ilmapuhallustonometrit ovat täydellisiä seulontatyökaluja. Edullisen hintatason vuoksi niitä voidaan ottaa tarvittaessa käyttöön GAT-mittausten tueksi.

Myös pneumatonometrit ovat helppokäyttöisiä ja helposti kuljetettavia laitteita. Ne ovat tarkkoja sarveiskalvoleikkauksen jälkeen. OBF-mittarilla voidaan mitata OPA-arvon muutosta, mikä on tällä hetkellä harvinainen ominaisuus tonometrisissä. Pneumatonometrit ovat kuitenkin tonometrien kalleimmasta päästä.

Pascal DCT -mittari on tarkka ja mittausvirheitä hyvin välttelevä tonometri, mutta hyvien mittausominaisuuksien käänköpuolena on laitteen käytön haastavuus. Mittauksen suorittaminen vaatii käyttäjältä taitoa ja mitattavan henkilön yhteistyökykyä, minkä vuoksi laite ei sovellu kuin erityisesti menetelmän mahdollistaviin tarpeisiin.

Bioresonator ART saattaa tarjota samankaltaisia ja hieman tarkempia mittaustuloksia kuin GAT, mutta laitteen jatkotutkimus on vielä tarpeen. Hinnaltaan ART on myös GAT:ia huomattavasti kalliimpi, eikä ART siksi ole kovin yleisesti käytössä.

Sensimed Triggerfish -piilolinssiä ei ole suunniteltu korvaamaan olemassa olevia tonometrejä. Sillä ei voida mitata suoraan silmänpainetta, mutta se mahdollistaa silmänpaineen ympärivuorokautisen seurannan. Laitteen mittaamat silmänpainetta kuvaavat mV_{eq} -arvot voivat kuitenkin osoittautua hyödyllisiksi yhdistettynä perinteisten tonometrien mittaamiin IOP-tuloksiin, sillä silmänpaineen on havaittu vaihtelevan asennosta, vuorokaudenajasta ja muista tekijöistä riippuen. Mikäli Triggerfishin mittaustulosten ja IOP-mittaustulosten tai todellisen silmänpaineen välinen korrelaatio voidaan vahvistaa, niin voi silmänpainemittauksen tulevaisuus näyttää hyvin erilaiselta, koska edellä mainittuja silmänpaineeseen vaikuttavia tekijöitä ei tällä hetkellä oteta huomioon perinteisessä silmänpainemittauksessa.

Lähteet

- 1 Seppänen, Matti. 2021. Silmänpainetauti (glaukooma). Lääkärikirja Duodecim. Helsinki: Kustannus Oy Duodecim. <<https://www.terveyskirjasto.fi/dlk00452>>. Luettu 24.3.2022.
- 2 Silmän rakenne. 2019. Verkkoaineisto. Terveyskylä. <<https://www.terveyskyla.fi/silmasairaudet/tietoa/silm%C3%A4n-rakenne-ja-toiminta/silm%C3%A4n-rakenne>>. Luettu 27.3.2022.
- 3 OpenStax College 2013. Eye in The Orbit. Kuvatiedosto. Wikimedia Commons. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:1411_Eye_in_The_Orbit.jpg>. Katsottu 27.3.2022. Muokattu 28.3.2022.
- 4 OpenStax College 2013. Structure of the Eye. Kuvatiedosto. Wikimedia Commons. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:1413_Structure_of_the_Eye.jpg>. Katsottu 27.3.2022. Muokattu 28.3.2022.
- 5 Silmän rakenne. Verkkoaineisto. Pfizer. <<https://www.terveydentukena.fi/sairaudet-ja-hoito/silmasairaudet/silman-rakenne>>. Luettu 29.3.2022.
- 6 Glaucoma. Verkkoaineisto. Susrut Eye Foundation & Research Centre. <<https://www.susrut.org/glaucoma/>>. Luettu 30.3.2022.
- 7 Käypä hoito -suositus 2014. Glaukooma. Suomalaisen Lääkäriseuran Duodecimin, Suomen Silmälääkäriyhdistys ry:n ja Suomen Glaukoomaseura ry:n asettama työryhmä. <<https://www.kaypahoito.fi/hoi37030>>. Luettu 12.4.2022.
- 8 Allison, Karen; Deepkumar, Patel & Omobolante, Alabi. 2020. Epidemiology of Glaucoma: The Past, Present, and Predictions for the Future. *Cureus*, 12(11). <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7769798>>. Luettu 4.4.2022.
- 9 Suuronen, Terttu. 2013. Silmänpainetaudin hoito. Teoksessa Mustajoki, Marianne; Alila, Anja; Matilainen, Elina; Pellikka, Minna & Rasimus, Mirja (toim.). Sairaanhoidajan käsikirja, 8. uudistettu painos, s. 673. Helsinki: Kustannus Oy Duodecim.
- 10 Glaukooman toteaminen. 2019. Verkkoaineisto. Terveyskylä. <<https://www.terveyskyla.fi/silmasairaudet/silm%C3%A4sairauksia/glaukooma/glaukooman-toteaminen>>. Luettu 5.4.2022.

- 11 Albert, Daniel M. & Keeler, Richard. 2020. The Pressure: Before and after Schiøtz. *Ophthalmol Glaucoma*, 3(6). <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7642165>>. Luettu 24.3.2022.
- 12 Kirstein, Elliot M.; Elsheikh, Ahmed & Gunvant, Pinakin. 2011. Tonometry – Past, Present and Future, *Glaucoma - Current Clinical and Research Aspects*. IntechOpen. <<https://www.intechopen.com/chapters/22969>>. Luettu 4.4.2022.
- 13 Tonometers. Verkkoaineisto. Haag-Streit. <<https://www.haag-streit.com/haag-streit-usa/products/haag-streit-diagnostics/tonometers/>>. Katsottu 28.3.2022.
- 14 Sakaue, Yuta; Ueda, Jun; Seki, Masaaki; Tanaka, Takayuki; Togano, Tetsuya; Yoshino, Takaiko & Fukuchi, Takeo. 2014. Evaluation of the new digital goldmann applanation tonometer for measuring intraocular pressure. *Journal of Ophthalmology* 2014. <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4121251>>. Luettu 10.4.2022.
- 15 Parts of the human eye. Kuvatiedosto. BBC. <https://ichef.bbci.co.uk/news/976/cpsprodpb/A68B/production/_87953624_parts_of_human_eye_624.png>. Katsottu 14.4.2022. Muokattu 14.4.2022.
- 16 Da Silva, Filipe & Lira, Madalena. 2022. Intraocular pressure measurement: A review. Verkkoaineisto. *Survey of Ophthalmology*. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0039625722000388>>. Luettu 15.4.2022.
- 17 Yolcu, Umit; Ilhan, Abdullah & Tas, Ahmet. 2016. Conventional Intraocular Pressure Measurement Techniques. IntechOpen. <<https://www.intechopen.com/chapters/53466>>. Luettu 4.4.2022.
- 18 Bruisini, Paolo; Salvetat, Maria S. & Zeppieri, Marco. 2021. How to Measure Intraocular Pressure: An Updated Review of Various Tonometers Verkkoaineisto. *Journal of Clinical Medicine*, 10(17). <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8456330>>. Luettu 4.4.2022.
- 19 Chelerkar, Vidya & Borrse, Mrunall. 2021. A Postgraduate's Guide To Tonometry. Verkkoaineisto. eOphtha. <<https://www.eophtha.com/posts/a-post-graduates-guide-to-tonometry>>. Luettu 19.4.2022.

- 20 Perkins mk3. Verkkoaineisto. Haag-Streit. <<https://www.haag-streit.com/haag-streit-uk/products/haag-streit-diagnostics/tonometry/perkins-mk3/>>. Luettu 30.3.2022.
- 21 Tono-Pen Avia. Verkkoaineisto. Reichert. <<https://www.reichert.com/products/tono-pen-avia>>. Luettu 4.4.2022.
- 22 Bioresonator AB 2013. BioResonator - Demonstration of the ART Tonometer. Verkkoaineisto. Youtube. <<https://www.youtube.com/watch?v=cW3hdWyKFDm>>. Katsottu 5.4.2022.
- 23 ReijoWaraan palkinto silmänpainemittarin keksijä Antti Kontiolalle. 2017. Lääketieteellinen Aikakauskirja Duodecim 133 (1), s. 96–97. Helsinki: Kustannus Oy Duodecim. <<https://www.duodecimlehti.fi/duo13492>>. Luettu 8.4.2022.
- 24 Kontiola, Antti. 2007. Kimmoketonometri, helppo ja luotettava silmänpaineen mittausslaite. Lääketieteellinen Aikakauskirja Duodecim 123 (21), s. 2636. Helsinki: Kustannus Oy Duodecim. <<https://www.duodecimlehti.fi/duo96853>>. Luettu 15.4.2022.
- 25 Icare ic100 instruction manual. 2017. Verkkoaineisto. Icare Finland Oy. <https://www.kahiko.fi/img/icare/ic100/Icare_ic100_instruction_manual.pdf>. Luettu 20.4.2022.
- 26 Products. Verkkoaineisto. Icare <<https://www.icare-world.com/products>>. Luettu 21.4.2022.
- 27 Aziz, Kanza & Friedman David S. 2018. Tonometers-which one should I use?. Lontoo: Eye. <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5944656>>. Luettu 13.4.2022.
- 28 Kim, Huyung Jim; Seo, Yeong Ho & Kim, Byeong Hee. 2017. New intraocular pressure measurement method using reflected pneumatic pressure from cornea deformed by air puff of ring-type nozzle. PLOS ONE, 12(12). <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186738>>. Luettu 21.4.2022.
- 29 Reichert Ocular Response Analyzer G3. Verkkoaineisto. Haag-Streit. <<https://www.haag-streit.com/haag-streit-switzerland/products/reichert/tonometry/ocular-response-analyzer-g3>>. Luettu 15.4.2022.
- 30 Corvis ST. Verkkoaineisto. Oculus. <<https://www.oculus.de/en/products/tonometer/corvis-st/highlights/>>. Luettu 20.4.2022.

- 31 Chen, Xiangjun; Stojanovic, Aleksandar; Hua Yanjun; Eidet, Jon R.; Hu, Di; Wang, Jingting & Utheim, Tor Paaske. 2014. Reliability of Corneal Dynamic Scheimpflug Analyser Measurements in Virgin and Post-PRK Eyes. PLOS ONE, 9(10). <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0109577>>. Luettu 22.4.2022.
- 32 Model 30 Pneumatometer. Verkkoaineisto. Reichert. <<https://www.reichert.com/en/products/model-30>>. Luettu 22.4.2022.
- 33 PASCAL Tonometer Product Brochure 2012. Verkkoaineisto. Ziemer Ophthalmology. <https://www.ziemertonometry.com/assets/files/LOW-RES_PASCAL_DCT_broschure_A4_sec.pdf>. Luettu 23.4.2022.
- 34 Leonardi, Matteo. 2015. The SENSIMED Triggerfish® 24h continuous monitoring of ocular dimensional changes for Glaucoma management. Verkkoaineisto. Alliance. <<https://www.alliance-tt.ch/manifestations/31/docs/sensimed.pdf>>. Luettu 25.4.2022.
- 35 Lam, Andrew; Wu, Yi-Fei; Wong, Lok-Yan & Ho Ngon-Ling. 2013. IOP variations from sitting to supine postures determined by rebound tonometer. Journal of Optometry, 6(2). <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3880499>>. Luettu 23.4.2022.
- 36 Petersen, Christine A.; Chen, Andrew & Chen, Philip P. 2022. How should we measure intraocular pressure in the era of coronavirus disease 2019? Balancing infectious risk, cleaning requirements, and accuracy. Current Opinion in Ophthalmology, 33(2). <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35025839>>. Luettu 25.4.2022.
- 37 Ruland, Kelly; Olayanju, Jessica; Borrás, Terete; Grewal, Dilraj S. & Fleischman, David. 2019. Accuracy of Tonopen Versus iCare in Human Cadaveric Eyes With Edematous Corneas Over a Wide Range of Intraocular Pressures. Journal of Glaucoma, 28(5). <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7476322>>. Luettu 23.4.2022.
- 38 Salouti, Ramin; Alishiri, Ali agha; Gharebaghi, Reza; Naderi, Mostafa; Jaididi, Khosrow; Shojaei-Baghini, Ahmad; Talebnejad, Mohammadreza; Nasiri, Zahra; Hosseini, Seyedmorteza & Heidary, Fatemeh. 2018. Comparison among Ocular Response Analyzer, Corvis ST and Goldmann applanation tonometry in healthy children. International Journal of Ophthalmology, 11(8). <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6090110>>. Luettu 23.4.2022.

- 39 Lanza, Michele; Rinaldi, Michele; Carnevale, Ugo A.G.; di Staso, Silvio; Sconocchia, Mario B. & Costagliola, Ciro. 2018. Analysis of differences in intraocular pressure evaluation performed with contact and non-contact devices. *BMC ophthalmology*, 18(1). <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6122572>>. Luettu 22.4.2022.
- 40 Hsu, S. Y.; Sheu, M. M.; Hsu, A. H.; Wu, K. Y.; Yeh, J. I.; Tien, J. N. & Tsai, R. K. 2009. Comparisons of intraocular pressure measurements: Goldmann applanation tonometry, noncontact tonometry, Tono-Pen tonometry, and dynamic contour tonometry. *Lontoo: Eye*, 23(7). <<https://doi.org/10.1038/eye.2009.77>>. Luettu 23.4.2022.
- 41 Willekens, Koen; Rocha, Rita; Van Keer, Karel; Vandewalle, Evelien; Abegão Pinto, Luis; Stalmans, Ingeborg & Marques-Neves, Carlos. 2015. Review on Dynamic Contour Tonometry and Ocular Pulse Amplitude. *Ophthalmic research*, 55(2). <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26650248>>. Luettu 24.4.2022.
- 42 Seppänen, Matti. 2021. Silmän taittovirheen korjaus laserleikkauksella. *Lääkärikirja Duodecim*. Helsinki: Kustannus Oy Duodecim. <<https://www.terveyskirjasto.fi/dlk01250>>. Luettu 24.4.2022.

Tonometrin valintataulukko

Tonometrien vertailun tulokset on koostettu alla olevaan taulukkoon.

Laite	Hinta	Käytettävyys	Mittausasento	Oheistarpeet	Tarkkuus	Muita ominaisuuksia
Schiøtz	alle 1000 €	Nykystandardeilla ei kätevä	Makuultaan	Anestesia	Häviää nykymittareille	Täysin mekaaninen Kannettava
GAT	ale 5000 €	Suhteellisen helppo Kokemus vaikuttaa saatavien tulosten tarkkuuteen	Istuen	Anestesia Fluoreseiini Rakolamppu	Soveltuu kliinisten päätösten pohjaksi Hyvä toistettavuus Altis silmän rakenteen vaikutuksille	Hyvä saatavuus Edullinen
Perkins	alle 5000 €	Haastava	Mikä vain	Anestesia Fluoreseiini	Verrannollinen GAT:n kanssa	Paristokäyttöinen Kannettava
Tono-Pen	alle 5000 €	Erittäin helppokäyttöinen	Mikä vain	Anestesia	Jossain määrin verrannollinen GAT:n kanssa. Yliarvioi enemmän.	Paristokäyttöinen Kannettava GAT:ia tarkempi edeemassa
iCare	alle 5000 €	Erittäin helppokäyttöinen	Mikä vain (mallikohtainen)	-	Hyvin verrannollinen GAT:n kanssa. Yliarvioi enemmän	Paristokäyttöinen Kannettava GAT:ia tarkempi edeemassa Taittovirheet eivät haittaa mittausta
Ilmapuhallus	alle 10 000 €	Helppokäyttöinen	Istuen / mikä vain (kannettava)	-	CCT:n vaikutus mitaustulokseen suurempi kuin GAT:lla	Kontaktiton
ORA ja CST	yli 10 000 €	Melko yksinkertainen, mutta vaatii koulutusta	Istuen	-	Tarkkoja. Vähemmän alttiita useille virhetekijöille	Mittaustuloksien lisäparametrit (OPA, CCT, CH)
Bioresonator ART	alle 10 000 €	GAT:ia vastaava	Istuen	Anestesia Rakolamppu	Mahdollisesti GAT:ia tarkempi	Itsekalibroituva
Pneumatonometrit	yli 10 000 €	Helppokäyttöinen	Istuen / mikä vain (kannettava)	Anestesia	Yli- ja aliarvioi GAT:ia enemmän CCT vaikuttaa mitaustulokseen	OPA:n havainnointi
Pascal DCT	alle 10 000 €	Haastava	Istuen	Anestesia Rakolamppu	Tarkka ja välttää hyvin virhetekijöitä	Eroittaa systolisen ja diastolisen IOP:n Mittaa OPA:n arvon
Sensimed Triggerfish (piilo-linssi)	alle 5000 €	Ammattilaisen on asetettava laite paikoilleen	Mikä vain	-	Ei mittaa IOP:ta Mittaustuloksien vastaavuus GAT:iin hyvä	Ympäri vuorokautinen seuranta