

3

LASERTURVALLISUUS

Kari Jokela, Lasse Ylianttila, Reijo Visuri, Maila Hietanen

SISÄLLYSLUETTELO

3.1	Yleistä laserturvallisuudesta.....	76
3.2	Altistumisrajojen biologiset perusteet.....	77
3.3	Lasersäteilyn altistumisrajat.....	87
3.4	Lasersäteilyä koskevat turvallisuusstandardit	96
3.5	Lasereiden turvallisuusluokitus.....	97
3.6	Lasereiden yleinen käyttöturvallisuus työpaikoilla.....	107

3.1 Yleistä laserturvallisuudesta

Lasersäteilyn energia ylittää herkästi kudoksen vauriokynnyksen iholle ja silmiin osuessaan. Tästä syystä lasersäteilylle on ollut pakko määrittää altistumisrajat onnettomuuksien välttämiseksi. Lasersäteilylle määritetyt altistumisrajat perustuvat laajaan biologiseen tutkimukseen, joka aloitettiin heti, kun ensimmäinen laser oli kehitetty vuonna 1960. Mittavan tutkimustyön tuloksena on muodostunut selkeä käsitys siitä miten lasersäteily vahingoittaa silmiä ja ihoa, minkä altistumistason yläpuolella vaurioita alkaa esiintyä, millaisia vaurioita syntyy altistuksen kasvaessa sekä mitkä fyysiset ja biologiset tekijät vaikuttavat vaurion syntyyn. Tämä tieto on kerätty pääasiassa eläinkokeista, mutta hyödyllistä lisätietoa on saatu myös lasereilla tapahtuneista silmätapaturmista, silmien laserhoidosta ja vapaaehtoisilla koehenkilöillä tehdyistä kokeista. Laserin vaikutukset hallitaan nykyisin niin hyvin, että altistumisrajojen ja minimivauriokynnyksen välillä oleva turvamarginaali ei ole kovin suuri, tyypillisesti se on 2–10-kertainen verrattuna altistumisrajaan.

Maailmalla tapahtuneiden silmäonnettomuuksien kokonaismäärää ei tiedetä, mutta voidaan arvioida, että kyse on tuhansista tapauksista. Suurin osa onnettomuuksista on tapahtunut tutkimuslaboratorioissa, joissa lasersäteet risteilevät tilapäisissä koejärjestelyissä, eikä varotoimista kuten silmien suojaamisesta huolehdita aina riittävästi. Myös ulkomaiset sotilaskäytössä olevat etäisyydenmittauslasarit ovat myös aiheuttaneet joitakin vahinkoja jopa täysin sivullisille siviileille. Näiden tavallisen kiikarin kokoisten laitteiden varoetäisyydet voivat olla useita kilometrejä. Suurvaltojen aselaboratoriot ovat kehittäneet myös laitteita, joilla tarkoituksellisesti voidaan vahingoittaa vastustajan optisia sensoreita ja sokaista taistelijoita. Kansainvälisillä sopimuksilla pyritään kuitenkin rajoittamaan tällaisten epäinhimillisten pidettyjen aseiden käyttöä. Lasersäteen aiheuttamia silmäonnettomuuksia on lääketieteellisessä kirjallisuudessa kuvattu yli sata tapausta. Suomessa ei ole tietävästi tapahtunut toistaiseksi sellaisia laserien aiheuttamia onnettomuuksia, joissa olisi syntynyt näköä haittaavia vammoja. Lasereiden määrän jatkuvasta kasvusta ei välttämättä aiheudu onnettomuuksien lisääntymistä, koska käytöturvallisuus on ajan myötä parantunut turvallisuusstandardien ja varomääräysten myötä.

Näkyvä lasersäde on epämiellyttävä katsoa ja se aiheuttaa häikäistymisen ja jälkikuvia jo enimmäisarvoja huomattavasti pienemmällä altistuksella. Lasersädetä ei saisikaan koskaan kohdistaa silmiin. Erityisesti liikenteessä tilapäinen häikäistyminen voi aiheuttaa vaaratilanteen. Lentokenttien ympärillä on tämän vuoksi tiukemmat rajoitukset laserien käytölle.

Käsillä olevan luvun pyrkimyksenä on esittää lasersäteilyn keskeiset terveyshaitat niin, että lukijalla olisi niiden perusteella mahdollisimman selvä kuva altistumisrajojen varsin vakiintuneista perusteista. Luvussa 3.2 tutustutaan lasersäteilyn eri aallonpituusalueiden vaikutuksiin silmässä ja ihossa sekä tarkastellaan miten biolääketieteellisen tutkimuksen tulokset heijastuvat altistumisrajoissa. Painopiste on silmässä, koska silmän vaurioituminen on huomattavasti vakavampi asia kuin ihon vaurioituminen. Luvussa 3.3 selvitetään miten altistumisrajataulukoita sovelletaan enimmäisarvojen laskemiseksi. Luvussa 3.4 tutustutaan lasersäteilyä koskeviin turvallisuusstandardeihin ja luvussa 3.5 käsitellään laserlaitteiden turvallisuusluokat. Luvussa 3.6 annetaan yleiset käyttöturvallisuusohjeet, jotka koskevat pääasiassa työpaikkoja. Väestön käytössä olevien lasereiden tulee lähtökohtaisesti olla niin turvallisia, että terveellä maalaisjärjellä toimittaessa tapaturman riski on minimaalinen.

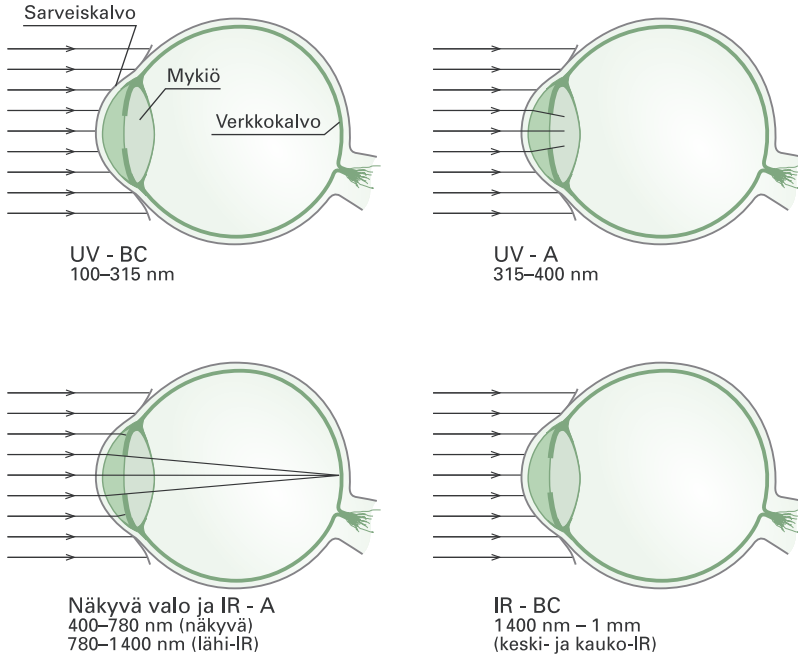
3.2 Altistumisrajojen biologiset perusteet

Optisen säteilyn lähteiden joukossa laser on erikoistapaus, jolle on ominaista, että säteily sisältää vain yhtä aallonpituutta eli se on monokromaattista, säteily on samanvaiheista eli koherenttia, säteilyn lähtöaukko on hyvin pieni ja säteen kirkkaus eli radianssi on hyvin suuri (kuva 1.2, luku 1). Näistä ominaisuuksista johtuen lasersäteilyn säteilyenergia keskittyy hyvin pieneen tilavuuteen, jossa energia massayksikköä kohden saattaa ylittää kudoksen vauriokynnyksen helpostikin. Lisäksi lasersäde voidaan koota kapeaksi säteilykeilaksi eli kollimoida, jonka seurauksena säteilystä tulee lähes yhdensuuntaista. Tällöin säteen tehotiheys tai säteilyn pulssienergian tiheys voi olla vaarallisen suuri hyvinkin kaukana lähteestä, kun taas tavallinen valon lähde levittää voimakkaasti säteilyä eri suuntiin, jolloin sen energia pienenee etäisyyden kasvaessa.

Erityyppisten kudosten herkkyys lasersäteilyn vaikutuksille ei vaihtelevi kovin suuresti. Oleellisinta on kuinka suuri energia kudokseen absorboituu ja mikä on lasersäteilyn aallonpituus. Keskeisimmät altistumisen voimakkuutta ja altistumisrajoja kuvaavat mittayksiköt ovat silmän ja ihon pinnalle tulevan laserpulssin energiatiheys (J/m^2) ja tehotiheys eli irradianssi (W/m^2).

Näkyvän valon ja lähi-infrapunasäteilylaserien aiheuttamat verkkokalvovauriot

Lasersäde on erityisen vaarallinen silmille näkyvän valon eli 400–780 nanometrin (nm) ja lähi-infrapunasäteilyn (IR-A 780–1 400 nm) aallon-



Kuva 3.1 Optisen säteilyn tunkeutuminen silmään

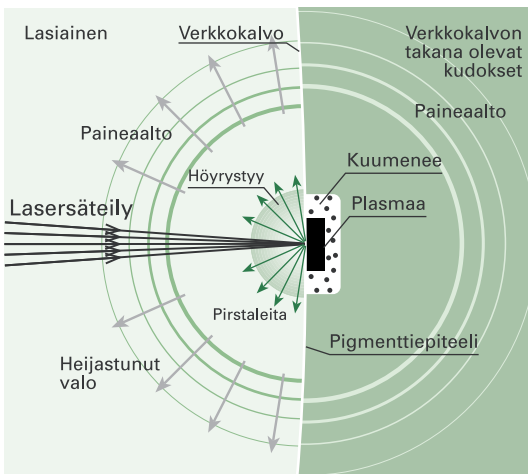
UV-aallonpituudet tunkeutuvat lähinnä sarveiskalvoon ja mykiöön. Näkyvä valo ja IR-A-säteily tunkeutuvat verkkokalvolle saakka ja fokuoivat suhteellisen pienelle alueelle silmän linssijärjestelmän toiminnan seurauksena. IR-B- ja IR-C-säteily pysähtyvät pääasiallisesti sarveiskalvolle.

pituuksilla, koska silmän linssijärjestelmä toimii juuri näkyvän valon alueella ja silmän etuosat eivät vaimenna näitä aallonpituuksia (kuva 3.1). Näistä syistä johtuen säteilyenergia pääsee fokuoittumaan eli tarkentumaan verkkokalvolle hyvin pienelle alueelle ja vaurioittaa verkkokalvoa herkästi. Se kuinka paljon silmä vaurioituu, riippuu pulssienergiasta ja sattumasta. Säteen osumakohta ja silmän optisen järjestelmän fokustila vauriohetkellä ovat myös ratkaisevia. Silmän anatominen rakenne on kuvattu kuvassa 2.22, luvussa 2.

Pulssilaserien aiheuttama verkkokalvovaurio on yleensä pahempi kuin jatkuvan lasersäteilyn aiheuttama ja se voi olla varsin dramaattinen tapahtuma. Näkö hämärtyy äkillisesti ja näkyvän valon aallonpituuksilla näkyy kirkas välähdys. Joskus saattaa kuulua pokahtava ääni ja tuntua kipua. Säteen osumakohtaan ja sen ympärille syntyy paikallinen vaurio, joka näkyy sokeana täplänä eli niin sanottuna skotoomana. Se mihin kohtaan säde osuu, on ratkaisevaa. Näkökuopan (fovea) ja sen lähellä olevien alueiden

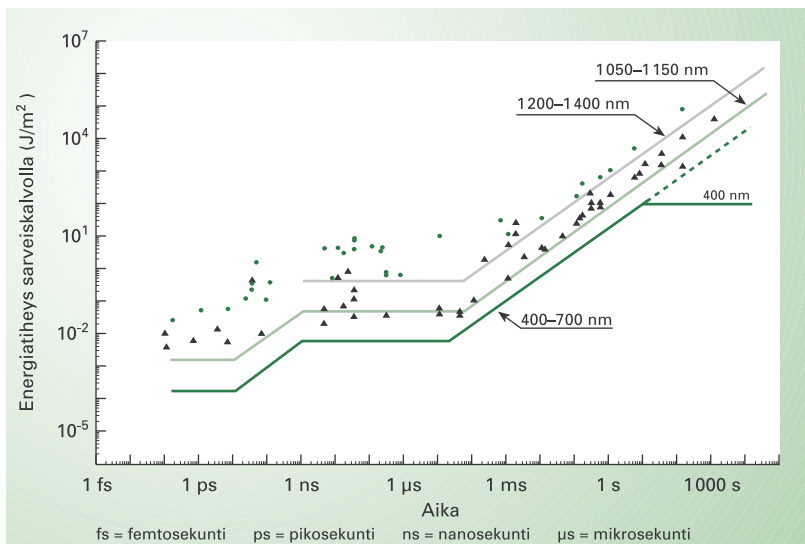
vaurioituminen heikentää pysyvästi näön tarkkuutta, kun taas verkkokalvon reunaosiin syntyvä sokea täplä voi jopa jäädä huomiotta. Hyvin suurilla energioilla vaurio voi kuitenkin olla laaja-alaisempi, jos näköreseptoreilta näköhermolle kulkevat hermoyhteydet vaurioituvat. Verenvuoto suonikalvolta verkkokalvon ja lasiaisen väliin voi olla varsin vahingollista, koska tämä hämärtää näköä, hermoyhteydet voivat vahingoittua ja vaarana on jopa verkkokalvon irtoaminen. Vaurioitunut verkkokalvon kohta ei enää korjaannu laseronnettomuuden jälkeen, mutta näkö voi silti huomattavasti korjaantua viikkojen kuluessa, kun vuotanut veri poistuu itsestään ja sokea täplä häviää tietoisuudesta.

Silmänpohjan vauriokynnys määritetään eläinkokeissa nostamalla lasersäteilyn pulssienergiaa, kunnes silmänpohjassa havaitaan minimaalinen muutos. Useista mittaustuloksista määritetään energia, joka aiheuttaa 50 prosentin todennäköisyydellä havaittavan vaurion. Altistusraja on asetettu yleensä kymmenen kertaa pienemmäksi kuin havaittu minimivauriotaso, jotta saadaan riittävä turvamarginaali. Koe-eläinten ja ihmisen silmän eroista sekä silmän rakenteen vaihteluista johtuen voi yksittäisen silmän pisteen kohdalla oleva turvamarginaali olla pienimmillään vain kaksinkertainen verrattuna altistusrajaan, mutta merkittävien vaurioiden riski alkaa lisääntyä käytännössä vasta, kun altistumistaso ylittää rajan kymmenkertaisesti. Jos pulssilaserin säteily ylittää altistusrajan yli satakertaisesti, on verenvuodon vaara suuri.



Kuva 3.2. Lyhyiden laserpulslien vaikutuksia silmässä

Suurin osa pulssienergiasta absorboituu ohueen pigmenttiepiteeliin. Absorboitunut energia muuttuu lämmöksi, joka johtuu viereisiin kudoksiin. Hyvin lyhyet pulssit voivat aiheuttaa repivän paineaallon, laajalle ulottuvia mekaanisia vaurioita ja jopa plasmanmuodostusta.



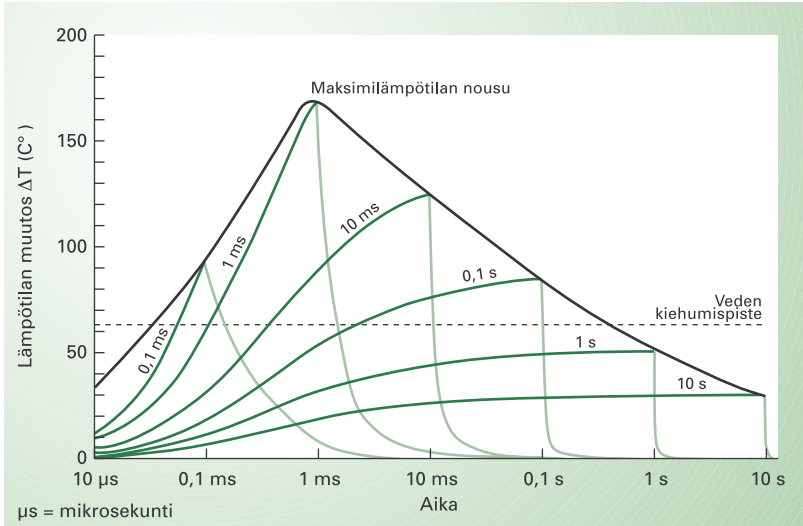
Kuva 3.3 Lasersäteilyn altistumisrajat ja näkyvään verkkokalvovaurioon tarvittava kynnysergiätiheys näkyvälle valolle ja IR-A-säteilylle pulssinkeston funktiona.

Standardin IEC 60825-1 mukaiset aallonpituusalueittain muuttuvat altistumisrajat on esitetty viivoilla, kynnysergiätiheydet näkyvälle säteilylle kolmioina ja IR-A-säteilylle pisteinä.

Verkkokalvovaurion mekanismit

Suurin osa verkkokalvolle tulevan laserpulssin energiasta absorboituu eli imeytyy vain noin kymmenen mikrometrin (μm) paksuisen pigmentti-epiteelikerroksen pigmenttihiukkasiin, joten fokuksipisteeseen absorboitua energiaa massayksikköä kohden nousee helposti hyvin suureksi (kuva 3.2). Hyvän absorptiokykynsä johdosta pigmenttiepiteelillä on keskeinen asema laserin aiheuttamissa verkkokalvovaurioissa. Mitä pienempään tilavuuteen ja mitä lyhyemmässä ajassa laserpulssin energia absorboituu, sitä pienempi energia tarvitaan vaurion syntymiseen. Tyypillistä on, että vaurio kohta on paljon suurempi kuin se alue, jolle pulssi sattuu osumaan. Tämä johtuu siitä, että lämmönjohtumisen ja muiden sekundaarisesti vaikuttavien tekijöiden seurauksena vahingoittuvat myös absorptiokohdan lähellä olevat näköreseptorit ja hermosolut, vaikka niihin absorboitua energiaa jäisikin suhteellisen vähäiseksi. Kaiken kaikkiaan silmän verkkokalvo on niin herkkä vaurioitumaan aallonpituusalueen 400–1400 nm lasersäteilystä, että kyseistä aallonpituusaluetta voidaan hyvällä syyllä kutsua verkkokalvovaurio-alueeksi.

Kuvassa 3.3 esitetään kuinka verkkokalvon vaurioitumiskynnys muuttuu pulssinkeston suhteen näkyvän valon ja lähi-infrapunasäteilyn aallonpituuksilla. Tulokset on saatu lähinnä reesusapinoilla ja kaneilla tehdyistä



Kuva 3.4 Eripituisten laserpulssien aiheuttamia lämpötilanousuja pigmenttiepiteelissä, kun yksittäisen pulssin energia on säädetty minimivaurion aiheuttavalle tasolle

Käyrät perustuvat termodynaamisella mallilla tehtyihin laskelmiin. Pulssin loputtua lämmönsiirtyminen laskee lämpötilaa nopeasti. Pitkillä pulseilla lämmönsiirto jarruttaa lämmön nousua jo pulssin aikana. Huomaa, etteivät eripituisten laserpulssien energiat ole samat, yli yhden millisekunnin pituisilla altistuksilla minimivaurion aiheuttama pulssienergia kasvaa pulssinpituuden kasvaessa verrannollisesti funktion t^3 .

silmänpohjantutkimuksista. Vaurioitumiskynnys on esitetty kuvassa sarveiskalvolle tulevan säteilyn energiatiheytenä sellaisessa altistustilanteessa, jossa verkkokalvokuva on fokusoitunut mahdollisimman pieneksi eli 10–20 μ m kokoiseksi.

Pulssinkestosta riippuen vaurio voi aiheutua verkkokalvon lämpenemisestä, termomekaanisista vaikutuksista ja plasmanmuodostuksesta. Suhteellisen pitkällä, yli yhden millisekunnin (ms) pulseilla verkkokalvovaurio aiheutuu solujen liiallisesta lämpenemisestä (kuva 3.4). Lämpenemisessä säteilyenergia muuntuu molekyylien ja atomien kineettiseksi värähtely- ja rotaatioenergiaksi (katso myös faktalaatikko 3.1). Energiatiheysraja ja verkkokalvovaurion kynnyenergia kasvavat yli yhden millisekunnin lämpövaurioalueella ajan kasvaessa suoraan verrannollisesti funktion t^3 , jossa t on pulssinkestä. Pulssin lopussa saavutettu maksimilämpötila on kriittisin tekijä.

Yhden millisekunnin kohdalla vauriomekanismi muuttuu termisestä ei-termiseksi ja tästä syystä vaurio syntyy pienemmällä lämpötilan muutoksella (kuva 3.4). Mekanismin muuttuminen näkyy altistumisrajoissa

siinä, että verkkokalvovaurion energiatiheysraja laskee pulssinkestovälillä 1 millisekuntia – 18 mikrosekuntia (kuva 3.3), vaikka maksimilämpötila laskee. Pulssinkestoalueella 18 mikrosekuntia – 1 nanosekuntia energiatiheysraja asettuu vakiotasolle, joka näkyvän valon alueella on 5 mJ/m^2 , jota vastaava pulssienergia 7 mm pupillissa on 0,2 mikrojoulea (μJ).

Ei-termisiä vaikutuksia ovat lämmön epätasainen jakautuminen mikroskooppisella tasolla sekä termomekaaniset ja fotoakustiset vaikutukset, jotka ovat seurausta lyhyen pulssin aiheuttamista mekaanisista värähtelyistä. Valtaosa pulssin energiasta absorboituu 1–3 mikrometrin suuruisiin pigmenttihiukkasiin, jotka kuumenevat satojen asteiden lämpöisiksi hiukkasiksi kuitenkin ilman, että näkyvän vaurion kynnystä ylitetään. Tämä johtuu siitä, että lämpö johtuu näin pienestä hiukkasesta hyvin nopeasti, noin kuudessa mikrosekunnissa, ympäröivään väliaineeseen ja laaja-alaisia, lämmöstä johtuvia proteiinivaurioita ei ehdi tapahtua soluissa. Paikalliset solun osien vauriot kuumenneen pigmenttihiukkasen läheisyydessä ovat kuitenkin mahdollisia. Termomekaaniset vauriot aiheutuvat kudostenesteiden äkillisen höyrystymisen aiheuttamasta paineaallosta, joka voi repiä verkkokalvoa rikki suoraa absorptiokohtaa paljon laajemmaltakin alueelta. Seurauksena voi olla reikä tai pieni ”räjähdyskraatteri” verkkokalvolle.

Pulssinkeston pienentyessä edelleen alle yhden nanosekunnin kokeellisesti saatujen tuloksien perusteella kudosa vaurioituu herkemmin ja tämän vuoksi altistusrajoja on laskettu (kuva 3.3). Tällöin pulssinaikainen tehoitiheys nousee niin suureksi, että kudoksessa syntyy epälineaarisia optisia ilmiöitä, kuten esimerkiksi monifotoniabsorptiota, säteen itse-fokusointia, optista läpilyöntiä ja plasmanmuodostusta. Epälineaaristen optisten ilmiöiden aiheuttamia kudosa vauriomekanismeja ei ole vielä saatu tarkasti määritettyä.

Jatkuvatoimisilla lasereilla verkkokalvon fokusalue altistuu vain rajoitetun ajan. Lähi-infrapuna-alueella altistumisaika ei käytännössä ole yli kymmentä sekuntia, koska silmän ja pään tahdosta riippumattomien liikkeiden johdosta fokustäplä ei pysy kauempaa paikallaan. Näkyvän valon alueella 400–700 nm silmän altistumisaika on käytännössä vielä paljon lyhyempi. Liian kirkkaan valon välähtäessä silmä pyrkii sulkeutumaan automaattisesti ja pää kääntyy nopeasti pois valonlähteen suunnasta. Laserstandardeja laadittaessa on näistä syistä oletettu, että käytännön altistumisaika on näkyvällä valolla korkeintaan 0,25 sekuntia. Sulkeutumisen ja väistörefleksit eivät kuitenkaan tarjoa täysin varmaa 0,25 sekunnin suojaa, vaan altistumisaika voi eri ihmisillä olla suurempikin ja jopa tarkoituksellinen tuijottaminen heikkoon, mutta potentiaalisesti vaaralliseen, säteeseen, on mahdollista. Käytännössä ei kuitenkaan tiettävästi ole koskaan havaittu

silmävaurioita, jos silmään vahingossa osuneen näkyvän laserin säteen teho on jäänyt alle yhden milliwatin (mW).

Fokuspisteen siirtyessä pois verkkokalvolta, toisin sanoen sen eteen tai taakse, verkkokalvolle tuleva tehotiheys pienenee pulssienergian hajotessa laajemmalle alueelle. Sen seurauksena vauriokynnys nousee huomattavasti. Vauriokynnyksen nousemista verkkokalvokuvan kasvaessa hidastaa kuitenkin se, että suurikokoisen säteilytysalueen jäähtyminen keskeltä on huomattavasti hitaampaa kuin pienikokoisen. Jos verkkokalvolle tuleva säteilyenergia pysyy vakiona, niin vaurioitumiskynnys laskee lähes kääntäen verrannollisesti kuvan halkaisijaan.

FAKTALAATIKKO 3.1

Termiset vaikutukset

Solutasolla lämmön vaikutukset ilmenevät proteiinien rakenteen vaurioitumisena (koaguloituminen), joka saattaa aiheuttaa solun kuoleman, mikäli sen korjausmekanismit eivät korjaa proteiinien rakennetta entiselleen. Solukuoleman todennäköisyys alkaa kasvaa, kun lämpötilannousu on yli viisi astetta ja yli kymmenen asteen lämpötilannousua solut kestävät vain noin kymmenen minuuttia. Lyhyillä laserpulsseilla sallitaan paljon suurempiakin lämmönnousuja. Alle kymmenen millisekunnin altistusajoilla lämpeneminen voi olla yli sata astetta, kuitenkin ilman vahinkoa. Kuvasta 3.4 nähdään miten pigmenttiepiteelin lämpötilan nousu hidastuu yli yhden millisekunnin pulsseilla. Vain aivan pulssin alkuvaiheessa lämpötila kasvaa lineaarisesti kudokseen absorboituneen tehon ja ominaislämpökapasiteetin määräämässä tahdissa (huomaa logaritminen aika-asteikko), mutta loppupuolella lämmön siirtyminen johtumalla ja verenkierron kuljettamana jarruttavat lämpötilan nousua.

Keski- ja kaukoinfrapunasäteily

Siirryttäessä lähi-infrapuna-alueelta keski-infrapuna-alueelle eli IR-B-alueelle (1 400–3 000 nm) vesimolekyylit alkavat absorboida säteilyä voimakkaasti ja silmän väliaineen vaimennus kasvaa nopeasti (kuva 3.1; kuva 2.23, luku 2). Tämän seurauksena vauriokohta siirtyy verkkokalvolta sarveiskalvolle ja vähemmässä määrin mykiöön. IR-B-alueella noin 20 prosenttia säteilystä pääsee aallonpituudesta riippuen mykiöön asti. Näillä aallonpituuksilla on kuitenkin kaksi voimakkaan absorption aluetta, joilla

säteily pysähtyy käytännössä sarveiskalvoon. Ensimmäinen absorptiopiikki esiintyy aallonpituuksilla 1 400–1 500 nm ja seuraava aallonpituuksilla 1 800–2 500 nm. Näillä alueilla alle yhden millisekunnin pulssien vauriokynnys on likimain kymmenesosa verrattuna näiden väliin jäävien aallonpituuksien (1 500–1 800 nm) vauriokynnykseen eli sarveiskalvo vaurioituu näiden piikkien kohdalla herkästi.

Keski-infrapuna-aallonpituuksilla vaurio on puhtaasti terminen eli lämmöstä johtuva. Vaurioitumisherkkyyteen vaikuttaa oleellisesti se, kuinka paksuun kudosterrokseen säteily absorboituu ja mikä on pulssinkesto. Lyhyillä pulsseilla sarveiskalvon minimivaurion aiheuttava energiatiheys laskee, kun tunkeutumissyvyys pienenee. Tämä johtuu siitä, että ohueen absorptiokerrokseen keskittyy enemmän energiaa kuin paksuun kerrokseen eikä lämmönsiirtyminen pulssin aikana ehdi vaimentaa lämpötilannousua ja kudosa vaurioituu. Kyse on samantyyppisestä ilmiöstä, kun pulssienergia fokuoitetu verkkoalvalle. Pitkillä, yli kymmenen sekunnin pulsseilla lämpöenergia ehtii siirtyä tai johtua pulssin aikana alempiin kudoksiin ja lämmönsiirtyminen tasaa lämpötilannousua samaan tapaan kuin absorptiokerroksen paksuneminen. Tunkeutumissyvyys ja siten myös vauriokynnys ovat pienimmillään edellä mainittujen IR-B-absorptiohuippujen sekä pitkäaaltoisen IR-C-säteilyn alueella (3 µm – 1 mm). Esimerkiksi hiilidioksidilaserin aallonpituudella 10,6 µm 50 prosenttia energiasta absorboituu vain noin kymmenen mikrometrin paksuiseen sarveiskalvon pintakerrokseen (vertaa sarveiskalvon paksuuteen, joka on 600 µm). Vastaava irradianssiraaja on 1 000 W/m² halkaisijaltaan 3,5 mm aukon keskiarvona. Se on voimassa aallonpituuksilla 2,6–1 000 µm, kun pulssi kestää yli kymmenen sekuntia.

Ultraviolettilaserit

Verkkokalvon suoja paranee ultravioletialueella (UV) suuresti verrattuna näkyvään valoon, koska silmän etuosan kudokset vaimentavat tehokkaasti säteilyä UV-aallonpituuksilla. Lyhytaaltainen UV-B-säteily (280–315 nm) ja UV-C-säteily (100–280 nm) absorboituvat tehokkaasti sarveis- ja sidekalvoon, kun taas pitkäaaltoinen UV-A-säteily (315–400 nm) pysähtyy pääasiassa vasta mykiöön (kuva 3.1; kuva 2.25, luku 2). Vaimennuksen lisäksi verkkokalvoa suoja myös se, että suuri osa säteilystä siroaa mykiössä ja lasiaisessa fokuoitetuutta verkkokalvalle. Tästä syystä UV-lasereiden silmävaikutukset eivät poikkea kovin paljoa tavallisen epäkoherentin UV-säteilyn vaikutuksista. UV-laserilla on kuitenkin helpompi saada aikaan lyhyempiä pulsseja kuin tavallisilla UV-lampuilla. Lisäksi laserin aiheuttama altistuminen on aina äkillinen ja onnettomuusluonteinen tapahtuma,

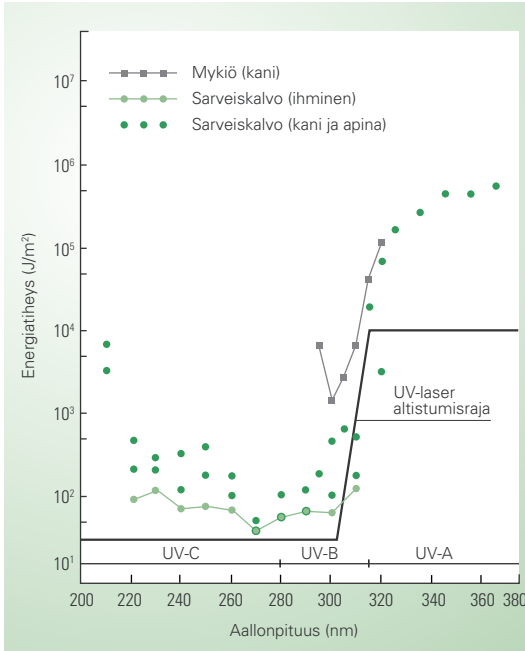
kun taas epäkoherentti UV-säteily voi vaikuttaa myös hitaasti soluvaurioiden kertyessä pitkän ajan kuluessa.

UV-säteilyssä fotonin energia on suurempi kuin näkyvällä valolla, jolloin UV-säteilyn aiheuttamat vauriot ovat myös suurempia. UV-alueella absorboituneen fotonin energia on tarpeeksi suuri virittämään elektronin atomi- tai molekyyllitasolla perustilaltaan korkeammalle, kemiallisesti aktiiviselle tasolle. Absorboitunut energia muuttuu joko lämmöksi tai se voi käynnistää kemiallisia reaktioita kudoksessa. Ultravioletialueella soluvauriot ovat pääasiallisesti valo- eli fotokemiallisia vaurioita solun kriittisissä DNA- ja proteiinimolekyyleissä, joita käsitellään yksityiskohtaisemmin luvussa 5. Fotokemialliselle muutokselle on ominaista, että se syntyy yhden fotonin luovuttaman energian ansiosta. Muutokset korjautuvat usein itsestään, mutta seurauksena voi olla myös solun kuolema tai pysyvä vaurioituminen, esimerkiksi virheellisen korjauksen seurauksena. Fotokemiallisen vaikutuksen tunnistaa siitä, että vaurion kynnystaso määräytyy suoraviivaisesti kudokseen absorboituneesta säteilyannoksesta eli tehotiheyden ja ajan tulosta. Fotokemiallinen vaurio voi syntyä laajalla aika-alueella mikrosekunneista vuorokauten. Siten säteilyaltistusta kuvaa UV-alueella parhaiten energiatiheys (J/m^2) silmän tai ihon pinnalla.

Fotokemialliset vaikutukset soluihin ovat tehokkaimmillaan UV-C- ja UV-B-alueella. UV-B-alueella herkkyys vähenee jyrkästi, mutta on edelleenkin merkittävämpi kuin kudosten lämpeneminen. UV-A-alueella lämpövaikutus voi ilmetä altistumisajasta riippuen pienemmällä tasolla kuin fotokemiallinen vaikutus. Lämpövaikutus tulee usein esiin suhteellisen lyhyillä alle muutamien sekunnin altistumisajalla tai pulssinkestolla, kun taas fotokemiallinen vaikutus vaatii pidemmän ajan.

Tunnetuin UV-laserin aiheuttama fotokemiallinen silmävaikutus on sarveis- ja sidekalvon tulehtuminen eli fotokeratiitti, joka tunnetaan paremmin nimellä lumisokeus tai hitsaajan silmä. Sen syynä on lyhytaaltainen UV-B- ja UV-C-säteily, joka vaurioittaa sarveiskalvon epiteelikerroksen soluja (luku 5). Kuvassa 3.5 esitetään sarveis- ja sidekalvon tulehduksen kynnystason muuttuminen aallonpituuden funktiona. UV-laser voi altistaa myös harmaakaihien synnylle eli mykiön samenesselle kapealla UV-B-aallonpituusalueella 295–320 nm. Fotokemiallisen ja lämpövaikutuksen lisäksi UV-lasereilla saadaan aikaan fotoablaatio eli kudoksen höyrystyminen, jota hyödynnetään sarveiskalvon taittovirhekirurgiassa. Tästä voi lukea lisää luvusta 4, Lasersäteilylle altistuminen.

Vaikka UV-säteily pysähtyykin pääasiallisesti sarveiskalvolle, verkkokalvon suoja ei ole UV-alueellakaan aivan täydellinen, koska noin 320 nm



Kuva 3.5 Silmän sarveiskalvon ja mykiön vaurioitumiskynnys aallonpituuden funktiona

Pisteet kuvaavat sarveiskalvoon ja mykiöön tulleita vaurioita eri UV-aallonpituuksilla. Nämä tulokset on saatu pääosin eläinkokeista mutta myös ihmissilmästä UV-altistus-onnettomuuksien seurauksena. Kuvassa on esitetty vertailun vuoksi myös altistumisrajat UV-laserille (IEC 60825-1). Kynnystason ylittävä UV-altistus aiheuttaa sarveis- ja sidekalvon tulehduksen ja mykiöön samentumia eli harmaakaihin.

aallonpituuksilla noin yksi prosentti UV-säteilystä pääsee tunkeutumaan verkkokalvolle asti. Eläinkokeista on saatu viitteitä, että tällä aallonpituudella UV-säteilyn fokuusoituminen verkkokalvolle voi merkittävästi lisätä verkkokalvon irradianssia, vaikka kaikista parhaiten silmän optinen järjestelmä tarkentaakin UV-säteilyn sijasta näkyvää valoa. Aallonpituudella 325 nm toimivien helium-cadmium-laserien (HeCd) onkin havaittu suhteellisen herkästi vaurioittavan verkkokalvoa. Verkkokalvon solujen vaurioherkkyttä lisää suuresti fotokemiallisten vaurioiden lisääntyminen näkyvää valoa pienemmillä aallonpituuksilla.

Lasersäteilyn vaikutukset ihoon

Ihon herkkyys lasersäteilylle ei eroa juurikaan silmän kudosten herkkyystä niillä aallonpituuksilla, joilla silmän linssijärjestelmä ei toimi. Näkyvän valon ja lähi-infrapunasaiteilyn aallonpituusalueilla, joilla säteily fokuusoituu verkkokalvolle, silmä on kuitenkin paljon herkempi kuin iho.

Laserin aiheuttama ihovaurio on yleensä pieni paikallinen palovamma, joissa iho voi lievimmillään punoittaa ja joka useimmiten parantuu helposti. Altistuksen lisääntyessä tulee rakkuloita, kolmannen asteen palovammoja ja jopa kudoksen hiiltymistä. Myöhäisempiä oireita ja muutoksia ovat paloalueen märkiminen, arpeutuminen ja UV-lasereilla pigmentoituminen. Muista piilevistä tai kumuloituvista vaikutuksista ei ole havaintoja.

Ihonalaiset kudokset ovat yleensä hyvässä suojassa. Teoriassa hyvin suuritehoisen yli yhden kilowatin (kW) tehoisen jatkuvatoimisen laserin säde voi porautua ihon läpi ja vaurioittaa ihonalaisia kudoksia, mutta käytännössä tällaisen tapahtuman riski on pieni, kun standardien mukaisia varotoimia noudatetaan. Lasersäteilyn vaikutus ihoon määräytyy energiatiheydestä tai tehotiheystä, altistumisajasta, säteen koosta ja aallonpituudesta.

3.3 Lasersäteilyn altistumisrajat

Lasersäteilylle määritetyt väestöön kohdistuvat enimmäisarvot on annettu sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa ionisoimattoman säteilyn väestölle aiheuttaman altistumisen rajoittamisesta (294/2002). Työntekijöihin kohdistuvat enimmäisarvot annetaan puolestaan sosiaali- ja terveysministeriön päätöksessä ionisoimattoman säteilyn altistuksen enimmäisarvoista (1474/1991). Lasersäteilyn energiatiheys, tehotiheys eli irradianssi, radianssi ja integroitu radianssi eivät saa ylittää standardissa EN 60825-1 esitettyjä arvoja. Laserstandardit käsitellään lähemmin kohdassa 3.4. EU:ssa työntekijöihin kohdistuvat laseraltistuksen enimmäisarvot annetaan Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivissä 2006/25/EY¹, joka tulee saattaa voimaan viimeistään toukokuussa 2010. Direktiivin enimmäisarvot perustuvat standardissa EN 60825-1 esitettyihin enimmäisarvoihin, joskin pieniä eroja on. Tässä kirjassa lasersäteilylle määritetyt enimmäisarvot esitetään EU:n direktiivin mukaan. Direktiivin nojalla annettava valtioneuvoston päätös korvaa edellä mainitun sosiaali- ja terveysministeriön päätöksen.

Enimmäisarvoja määritettäessä silmien normaalien suojelemissä, kuten silmän sulkeutumisrefleksin, pupillin halkaisijan muuttuminen, pään

¹⁾ Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2006/25/EY, terveyttä ja turvallisuutta koskevista vähimmäisvaatimuksista työntekijöiden suojelemiseksi altistumiselta fyysikaalisista tekijöistä (keinotekoinen optinen säteily) aiheutuville riskeille

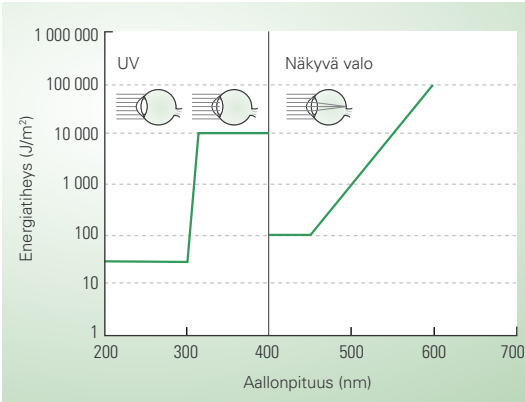
ja silmän liikkeen, on oletettu toimivan normaalisti. Lääketieteellisissä silmätutkimuksissa osa näistä suojamekanismeista voi olla estetty ja ICNIRP on antanut erikseen suositusarvot lääketieteellisille silmätoimenpiteille (Slaney et al., 2005).

Lasersäteilylle määritetyt enimmäisarvot on annettu erikseen silmä- ja ihoaltistukselle energia- ja tehotiheyksinä, jotka esitetään liitteessä 3 olevissa taulukoissa. Enimmäisarvot määräytyvät lasersäteilyn aallonpituuden, altistusajan, pulssinkeston, pulssintoistotaajuuden ja laserlähteen kulmakoon mukaan. Enimmäisarvoilla suojataan kudoksia termisiltä eli lämmöstä johtuvilta vaurioilta ja alle 600 nm aallonpituuksilla myös fotokemiallisilta vaurioilta. Alle kymmenen sekunnin altistuksilla enimmäisarvot on annettu energiatiheytinä (J/m^2) ja yli kymmenen sekunnin altistuksilla tehotiheytinä eli irradianssina (W/m^2). UV-aallonpituuksilla käytetään vain energiatihyettä altistumisajoista riippumatta. Kuvissa 3.6 ja 3.7 on kuvattu esimerkkinä fotokemiallisen ja termisen enimmäisarvon aallonpituusriippuvuus jatkuvatoimiselle pistemäiselle lasersäteelle. Kuvaan 3.7 on piirretty erikseen iho- ja silmäaltistuksen enimmäisarvot. Koska silmän optinen järjestelmä fokusoi näkyvän valon ja lähi-infrapunasäteilyn (IR-A) aallonpituuksia verkkokalvolle, enimmäisarvot silmälle ovat näillä aallonpituuksilla tiukemmat kuin vastaavat enimmäisarvot iholle. Kuvassa 3.8 on kuvattu silmään kohdistuvan enimmäisarvon altistusaikariippuvuutta punaiselle näkyvän säteilyn laserille alle kymmenen sekunnin altistuksilla. Enimmäisarvo kasvaa altistusajan kasvaessa, kun kudokseen absorboitunut säteilyenergia johtuu ympäröivään kudokseen eikä nosta kudoksen lämpötilaa yli vauriorajan.

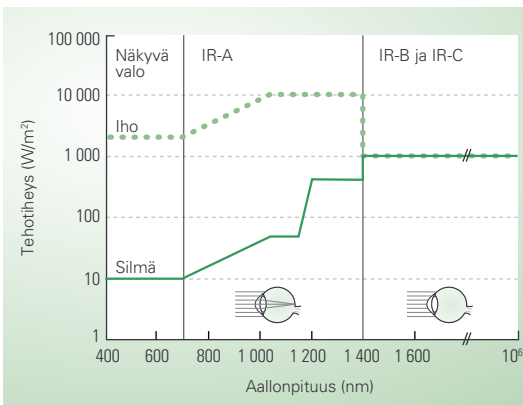
Jo tapahtunutta altistusta arvioitaessa käytetään altistusaikana todellista altistusaikaa. Jos altistumisen turvallisuutta halutaan arvioida etukäteen, esimerkiksi turvaetäisyyksien laskemista varten, käytetään altistumisaikoina normaaliolosuhteissa satunnaiselle altistukselle odotettavissa olevia aikoja, jotka on esitetty taulukossa 3.1. Kun altistuminen on tietoista, ja altistusaika on tiedossa etukäteen, käytetään todellista altistusaikaa.

Tärkeimmät yksittäiset altistumisrajat ovat yli kymmenen sekunnin altistuksen tehotiheys 10 W/m^2 ja 0,25 sekunnin altistuksen energiatiheysraja $6,4 \text{ J/m}^2$. Käytännössä nämä ovat altistumisrajoja, jotka erottelevat näkyvän valon aallonpituuksilla silmälle riittävän turvalliset laserit vaarallisista lasereista.

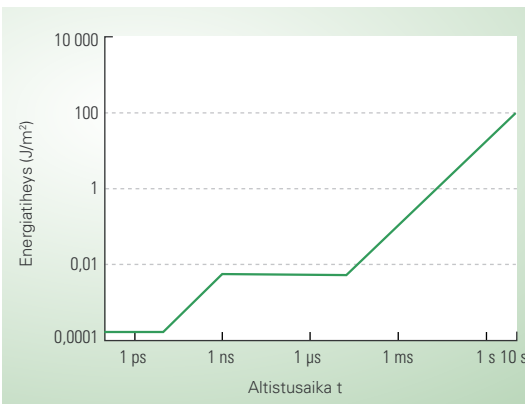
Enimmäisarvot on annettu energiatiheytinä (J/m^2) tai tehotiheytinä (W/m^2) tietyn kokaisen aukon yli keskiarvostettuna arvona. Aukkojen koot silmä- ja ihoaltistukselle on annettu aallonpituuden mukaan taulukossa 3.2. Vaikka



Kuva 3.6 Fotokemialliset enimmäisarvot jatkuvatoimiselle pistelähteelle



Kuva 3.7 Termiset enimmäisarvot jatkuvatoimiselle pistelähteelle



Kuva 3.8 Enimmäisarvot punaiselle näkyvän alueen laserille kymmenen sekuntia lyhyemmillä altistuksilla

Aallonpituus	Altistusaika
UV < 400 nm	30 000 s
Näkyvä valo 400–700 nm	0,25 s tai tietoinen altistusaika
IR > 700 nm	100 s

Taulukko 3.1 Altistumisajat altistuttaessa satunnaiselle lasersäteilylle

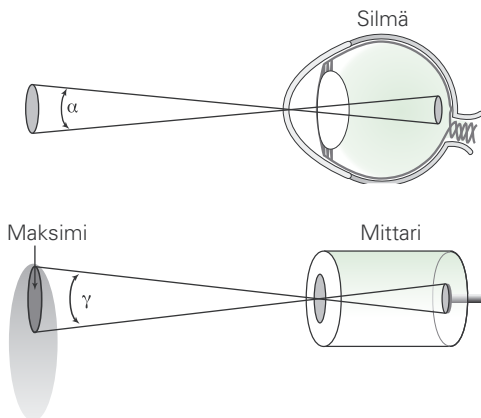
Aallonpituusalue		Rajoittavan aukon halkaisija Silmä	Iho
UV	180–400 nm	1 mm, kun $t \leq 0,3$ s $1,5 \cdot t^{0,375}$ mm, kun $0,3 \text{ s} < t \leq 10 \text{ s}$ 3,5 mm kun $t > 10 \text{ s}$	3,5 mm
Näkyvä valo	400–700 nm	7 mm	3,5 mm
IR-A	700–1 400 nm	7 mm	3,5 mm
IR-B ja IR-C	1 400–10 000 nm	1 mm, kun $t \leq 0,3$ s $1,5 \cdot t^{0,375}$ mm, kun $0,3 \text{ s} < t \leq 10 \text{ s}$ 3,5 mm, kun $t > 10 \text{ s}$	3,5 mm
	0,1–1 mm	11 mm	3,5 mm

Taulukko 3.2 Enimmäisarvojen rajoittavat aukot

säteen halkaisija olisi pienempi kuin taulukossa oleva rajoittava aukko, käytetään energiatihyden ja tehottiheyden (irradianssin) laskentaan rajoittavan aukon mukaista halkaisijaa. Jos säteen halkaisija on suurempi kuin rajoittava aukko, sijoitetaan aukko säteen maksimikohtaan.

Pistelähde ja pintalähde

Silmään kohdistuvan säteilyn enimmäisarvot riippuvat säteilylähteen kulmakoosta α (kuva 3.9). Lähteen kulmakoko α kertoo kuinka suuressa kulmassa säteilylähteestä näkyy silmään. Kun α on alle 1,5 milliradiaania (mrad), on kyseessä pistelähde. Normaalisti lasersäde ja sen peiliheijastukset ovat pistelähteitä. Joskus lasersäteilyn lähteen koko on niin suuri, että silmä



Kuva 3.9 Pyöreän lähteen kulmakoko α ja mittausrakenteen näkökenttä γ

Kerroin	Aallonpituus (nm)	Määritelmä
C_6	400–1 400	jos $\alpha \leq 1,5$ mrad, niin $C_6 = 1$ jos $1,5$ mrad $< \alpha \leq 100$ mrad, niin $C_6 = \alpha / 1,5$ mrad jos $\alpha > 100$ mrad, niin $C_6 = \alpha^2 / (1,5 \text{ mrad} \cdot 100 \text{ mrad})$
T_2	400–1 400	jos $\alpha \leq 1,5$ mrad, niin $T_2 = 10$ s jos $1,5$ mrad $< \alpha \leq 100$ mrad, niin $T_2 = 10 \cdot 10^{((\alpha - 1,5) / 98,5)}$ s jos $\alpha > 100$ mrad, niin $T_2 = 100$ s

Taulukko 3.3 Säteilylähteen kulmakokoon α liittyvät kertoimet

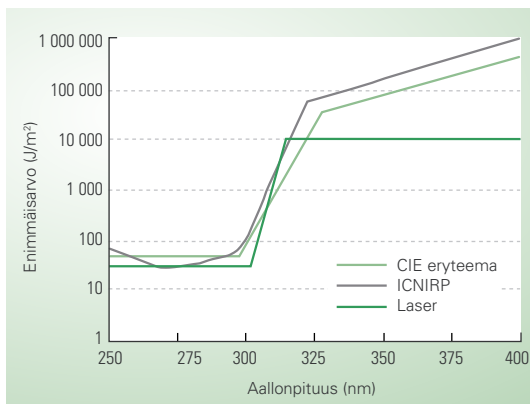
erottaa sen äärellisenä kuvana. Laserdiodimatriiseilla ja suurtehoisen laserin aiheuttamassa heijastustäplässä hajaheijastavalla pinnalla säteilylähteen kulmakoko α voi olla yli 1,5 mrad, jolloin kyseessä on pintalähde. Silmä ei enää kohdistaa lähteen kuvaa yhdeksi pisteeksi, vaan lähteen kuvalla on lähteen kulmakoosta riippuva koko.

Pintalähteen energia absorboituu ja jakautuu laajemmalle alueelle verkkokalvolla kuin fokuoituneen pistelähteen energia. Sen seurauksena sarveiskalvon altistumisrajat kasvavat lähteen koosta riippuvalla kertoimella C_6 eli säteilyn enimmäisarvoa voidaan nostaa kertoimen C_6 verran (taulukko 3.3). Useasta pienemmästä lähteestä koostuvalla lähteellä enimmäisarvo lasketaan kaikille eri lähdekombinaatioille ja enimmäisarvona käytetään tiukimman enimmäisarvon antavaa lähdekombinaatiota.

Näkyvän säteilyn fotokemiallisen vaurion enimmäisarvoissa määritellään niin sanottu mittausnäkökenttä γ . Jos lähteen kulmakoko α on suurempi kuin γ , ei säteilylähteen koko säteilyä oteta huomioon, vaan altistumisen määrittämiseen käytettävän mittarin mittausnäkökenttä on rajattava kulman γ suuruiseksi. Mittari kohdistetaan tällöin säteilyn maksimia kohden, niin että mitattavan säteilyn tehotiheys on mahdollisimman suuri. Jos lähteen kulmakoko α on pienempi kuin γ , ei mittarin mittausnäkökenttää tarvitse rajoittaa (kuva 3.9).

Fotokemiallisen vaurion rajat UV-säteilyn ja näkyvän valon aallonpituuksilla

UV-aallonpituuksilla (alle 400 nm) altistumisrajat määräytyvät pääasiallisesti fotokemiallisen silmä- ja ihovaurion aiheuttavasta säteilyannoksesta. Enimmäisarvoilla rajoitetaan koko päivän kuluessa kertyvää annosta. Enimmäisarvo riippuu säteilyn aallonpituudesta; alle 302,5 nm aallonpituuksilla enimmäisarvo on 30 J/m² ja yli 315 nm aallonpituuksilla 10 000 J/m².



Kuva 3.10 Lasersäteilyn enimmäisarvot silmälle ja iholle UV-alueella sekä ICNIRPin ja CIE:n eryteemapainotuksen mukaiset yksittäistä aallonpituutta vastaavat enimmäisarvot.

Näiden aallonpituuksien välillä (302,5–315 nm) enimmäisarvo määräytyy kertoimesta C_2 . Kuvassa 3.10 on esitetty lasersäteilyn enimmäisarvot UV-säteilylle sekä vastaavat kansainvälisten asiantuntijajärjestöjen ICNIRPin ja CIE:n eryteemapainotuksen mukaiset enimmäisarvot epäkoherentille säteilylle yksittäisillä aallonpituuksilla.

Kun säteilyannos kertyy lyhyessä ajassa, on säteilyä tarpeen rajoittaa myös termisen vaurion varalta. Termisen vaurion enimmäisarvon antaa suoraan kerroin C_1 , jonka suuruus riippuu altistusajasta (taulukko 3.4). UV-A-aallonpituuksilla terminen enimmäisarvo on rajoittava alle kymmenen sekunnin altistuksilla. Alle 302,5 nm aallonpituuksilla fotokemiallinen vaurio syntyy ennen termistä vauriota, jolloin rajana käytetään fotokemiallisen vaurion enimmäisarvoa. Aallonpituusalueella 302,5–315 nm aikaa T_1 lyhyemmällä altistusajoilla käytetään termisen altistuksen rajaa ja pidemmällä altistusajoilla fotokemiallisen vaurion enimmäisarvoa. Toisin sanoen, kun

Kerroin	Aallonpituusalue (nm)	Määritelmä
C_1	302,5–400	$C_1 = 5,6 \cdot 10^3 \cdot t^{0,25}$
C_2	302,5–315	$C_2 = 10^{0,2 \cdot (l-295)}$
T_1	302,5–315	$T_1 = 10^{0,8 \cdot (l-295)} \cdot 10^{-15} \text{ s}$
C_3	400–600	jos $\lambda < 450 \text{ nm}$, niin $C_3 = 1$ jos $450 \text{ nm} \leq \lambda \leq 600 \text{ nm}$, niin $C_3 = 10^{0,02(l-450)}$

Taulukko 3.4 Fotokemialliseen vaurioon liittyvät kertoimet C_1 , C_2 , C_3 ja T_1

fotokemiallisesti sallitun enimmäisarvon kertymiseen kuluu aikaa vähemmän kuin T_1 , se voi aiheuttaa termisen vaurion ja säteilyä rajoitetaan termisen altistuksen mukaan. Ajan T_1 pituus vaihtelee yhdestä nanosekunnista (302,5 nm) kymmeneen sekuntiin (315 nm).

Näkyvän säteilyn alueella enimmäisarvot on määritetty sekä termisten että fotokemiallisten vaurioiden varalta. Fotokemialliset enimmäisarvot on määritetty yli kymmenen sekunnin altistuksille aallonpituusalueelle 400–600 nm. Fotokemiallinen enimmäisarvo riippuu säteilyn aallonpituudesta. Aallonpituusriippuvuus on määritetty kertoimella C_3 , joka on esitetty taulukossa 3.4. Käytännön altistustilanteissa termisen vaurion enimmäisarvo on yleensä rajoittava. Fotokemiallinen enimmäisarvo nousee rajoittavaksi, kun lähde on suurikokoinen ja altistusaika pitkä.

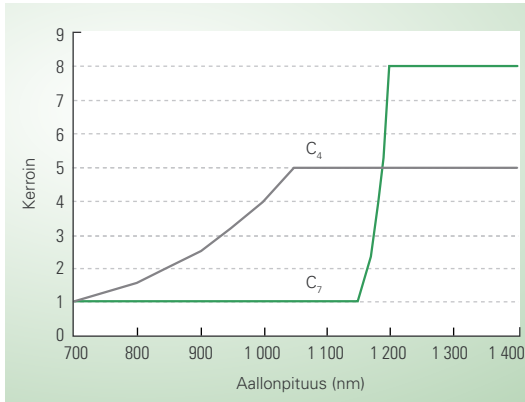
Näkyvän säteilyn fotokemiallisessa enimmäisarvossa säteily on rajattu mitausnäkökentän γ suuruudesta kulmasta tulevaan säteilyyn. Mittausnäkökenttä γ riippuu altistusajasta kasvaen 11 mrad:sta 110 mrad:iin altistusajan kasvaessa 10 sekunnista 10 000 sekuntiin. Huomionarvoista on, ettei koko säteilylähteen tarvitse mahtua mitausnäkökentän sisään, vaan mitausnäkökentällä rajataan mitattavaa säteilykeilaa. Samalla määräytyy se verkkokalvon alue, jolle tuleva säteilyenergia huomioidaan. Mittausnäkökenttä suunnataan säteilyn maksimiin.

Infrapuna-aallonpituudet

Lähi-infrapuna-aallonpituuksilla (IR-A, 700–1 400 nm) on käytössä kaksi aallonpituudesta riippuvaa kerrointa. Kerroin C_4 liittyy melaniinin eli ihossa ja silmissä olevan ruskean pigmentin absorptiokykyyn, joka vaikuttaa silmän ja ihon enimmäisarvoihin. Kerroin C_7 johtuu veden absorptiosta, jolloin pidempi aallonpituinen säteily ei enää läpäise lasiaista. Kertoimet C_4 ja C_7 on esitetty taulukossa 3.5 ja kuvassa 3.11.

Kerroin	Aallonpituus (nm)	Määritelmä
C_4	700–1 400	jos $700 \leq \lambda < 1\,050$ nm, niin $C_4 = 10^{0,002(\lambda-700)}$ jos $1\,050 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1\,400$ nm, niin $C_4 = 5$
C_7	700–1 400	jos $700 \text{ nm} \leq \lambda < 1\,150$ nm, niin $C_7 = 1$ jos $1\,150 \text{ nm} \leq \lambda < 1\,200$ nm, niin $C_7 = 10^{0,018(\lambda-1150)}$ jos $1\,200 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1\,400$ nm, niin $C_7 = 8$

Taulukko 3.5 Lähi-infrapuna-aallonpituuksilla käytettävät kertoimet C_4 ja C_7



Kuva 3.11 Lähi-infrapuna-aallonpituuksilla käytettävät kertoimet C_4 ja C_7

Toistuva altistus

Jatkuvaa pulssijonoa lähettävän laserin tapauksessa on huomioitava pulssien määrä. Termodynaamisten mallien perusteella lämpötilan pitäisi palautua säteilytyspisteessä perustasolle noin yhden millisekunnin aikana. Täten seuraavilla pulsseilla ei pitäisi olla vaikutusta, jos niiden väli on suurempi kuin yksi millisekunti ja yksittäinen pulssi ei aiheuta näkyvää vauriota. Tutkimuksissa on kuitenkin havaittu, että vauriokynnys laskee hitaasti silmään tulevien pulssien funktiona ilman, että mitään selvää tai turvallista aikarajaa pulssien välillä olisi löydetty. Täten yksittäinenkin pulssi saattaa aiheuttaa mikroskooppisia muutoksia kudoksessa, joita sitten seuraavat pulssit lisäävät. Vaikutukset korjaantuvat mahdollisesti itsestään, mutta korjausmekanismien häiriintyminen jatkuvasti tulevien pulssien vaikutuksesta on mahdollista. Altistumisrajoissa pulssivaikutus huomioidaankin pulssien lukumäärästä N riippuvalla vähennyskertoimella C_5 .

Pulssilaserien ja skannaavien laserien aiheuttamaan toistuvaan altistukseen sovelletaan seuraavaa kolmea sääntöä, jotka kaikki tulee alittaa:

Aallonpituus	Pulssin minimikesto T_{\min}	Pulssien kertymisaika
315–400 nm	1 ns	10 s (ei sovelleta)
400–700 nm	18 μ s	T_2 tai 0,25 s
700–1 050 nm	18 μ s	T_2 ¹⁾
1 050–1 400 nm	50 μ s	T_2 ¹⁾
1 400–1 500 nm	1 ms	10 s
1 500–1 800 nm	10 s	10 s
1 800–2 600 nm	1 ms	10 s
2 600 nm–1 mm	100 ns	10 s

¹⁾ Katso taulukko 3.3.

Taulukko 3.6 Pulssien kertymisaika aallonpituuden mukaan

- 1) Pulssijonon yksittäisen pulssin altistus ei saa ylittää kyseisen pulssinpituisen yksittäisen pulssin enimmäisarvoa.
- 2) Minkään ajan t kestoisen pulssijoukon tai pulssijonon osan aiheuttama altistuminen ei saa ylittää altistusajan t vastaavaa enimmäisarvoa.
- 3) Pulssijoukon yksittäisen pulssin altistuminen ei saa ylittää yksittäisen pulssin enimmäisarvoa kerrottuna kertoimella $C_5 = N^{-0,25}$, jossa N on pulssien lukumäärä. Pulssien kertymisaika, jonka kuluessa kertyneet pulssit lasketaan mukaan pulssien lukumäärään, on annettu aallonpituuden mukaan taulukossa 3.6. Pulssivähennyskerroin kasvaa kuitenkin vain hitaasti silmään tulevien pulssien lukumäärän kasvaessa. Esimerkiksi kymmenellä pulssilla vähennyskerroin on 0,56. Jos yksittäisen pulssin kesto on lyhyempi kuin taulukossa 3.6 määritetty minimiaika T_{\min} , lasketaan kaikki ajan T_{\min} kuluessa tulleet pulssit yhdeksi pulssiksi, jonka kesto on T_{\min} ja energia ajan T_{\min} kuluessa kertyneiden pulssien energia. Pulssijoukon altistusta verrataan tällöin ajan T_{\min} mukaiseen enimmäisarvoon.

Laskuesimerkissä 3.1 havainnollistetaan kuinka lasketaan enimmäisarvot silmässä satunnaisen ja jatkuvatoimisen laserin tapauksessa. Laskuesimerkkejä on lisää luvussa 4, jossa tutustutaan lähemmin erilaisiin lasersäteilyä tuottaviin laitteisiin.

LASKUESIMERKKI 3.1

Mitkä ovat silmään kohdistuvan säteilyn enimmäisarvot ja niitä vastaavat tehot Helium-Neon-laserin ($\lambda = 632,8$ nm) jatkuvalle ja satunnaiselle ($t = 0,25$ s) altistukselle?

Jatkuva altistus: Säteilylähde on pistemäinen, joten $\alpha < 1,5$ mrad. Tällöin enimmäisarvo on 10 W/m^2 . Näkyvän säteilyn aallonpituuksilla rajoittavan aperttuurin eli pupillin halkaisija on 7 mm, jolloin enimmäisarvoa vastaava laserin teho on $10 \text{ W/m}^2 \cdot \pi(0,007 \text{ m}/2)^2 = 0,38 \text{ mW}$, joka vastaa turvallisuusluokkaan 1 kuuluvien laserien tehorajaa $0,39 \text{ mW}$ (lasereiden turvallisuusluokitusta käsitellään kohdassa 3.5).

Satunnainen altistus: Satunnaisessa altistuksessa säteelle altistusta ei tietoisesti pitkitetä, jolloin silmän sulkeutumiskesto rajoittaa altistuksen $0,25$ s mittaiseksi. Enimmäisarvo $0,25$ s altistukselle on $18 \cdot t^{0,75} \cdot C_6 \text{ J/m}^2$. Kun kyseessä on pistelähde, on $C = 1$. Enimmäisarvoksi saadaan nyt $18 \cdot 0,25^{0,75} \cdot 1 \text{ J/m}^2 = 6,4 \text{ J/m}^2$. Enimmäisarvoa vastaavan laserin tehoksi saadaan $6,4 \text{ J/m}^2 \cdot \pi(0,007 \text{ m}/2)^2 / 0,25 \text{ s} = 0,98 \text{ mW}$, joka vastaa turvallisuusluokkaan 2 kuuluvien laserien tehorajaa 1 mW .

3.4 Lasersäteilyä koskevat turvallisuusstandardit

Lasersäteilyn vaarallisuus erityisesti silmille alkoi selvitä asiantuntijoille jo lasertekniikan varhaisvaiheissa 1960-luvulla. Ongelman hallitsemiseksi alettiin kehittää turvallisuusstandardeja, joihin on koottu keskeiset laserturvallisuuden periaatteet säteilyn fysikaalisia ominaisuuksia ja biologisia vaikutuksia koskevan tiedon pohjalta (taulukko 3.7). Keskeisimpiä ovat yleiset kaikkia lasereita koskevat standardit, joissa esitetään altistumisrajat silmään ja ihoon kohdistuvalle säteilylle sekä altistumisrajojen perusteella laadittu turvallisuusluokitus. Tärkeätä standardien sisältöä ovat myös turvallisuusluokasta määräytyvät tekniset suojarusteet, käyttäjän turvallisuusohjeet, turvamerkinnot ja varoitukset sekä muu käyttäjälle annettava informaatio. Lisäksi on julkaistu alakohtaisia standardeja muun muassa lääkinnällisten lasereiden (IEC/TR 60825-8, IEC 60601-2-22), laservaioesitysten (IEC/TR 60825-3) ja optisten kuituyhteyksien (IEC 60825-2) säteilyturvallisuuden varmistamiseksi.

Uraa uurtavan esikuvan yleisille laserturvallisuusstandardeille julkaisi amerikkalainen standardisoiimisjärjestö ANSI (American National Stan-

Julkaisija	Nimi	Tunnus	Vuosi	Standardi/ suositus
SFS (Suomen Standardisoiimisliitto)	Safety of laser products- Part 1: Equipment classification and requirements	SFS-EN 60825-1	2008	Suomalainen SFS-standardi
CENELEC	Safety of laser products- Part 1: Equipment classification and requirements	EN 60825-1	2007	Eurooppalainen EN-standardi
IEC	Safety of laser products- Part 1: Equipment classification and requirements	IEC 60825-1	2007	Kansainvälinen standardi
	Safety of laser products- Part 14: A user's guide	IEC TR 60825-14	2004	Tekninen raportti (kansainvälinen suositus)
ANSI	American National Standard for Safe Use of Lasers	ANSI Z136.1	2007	Amerikkalainen standardi
ICNIRP	Guidelines on limits of exposure to laser radiation of wavelengths between 180 nm and 1 000 µm	ICNIRP Guidelines, Health Phys. 71(5): 804-819	1996	Kansainvälinen suositus
ICNIRP	Revision of guidelines on limits of exposure to laser radiation of wavelengths between 400 nm and 1,4 µm	ICNIRP Guidelines, Health Phys. 79(4): 431-440	2000	Kansainvälinen suositus

Taulukko 3.7 Keskeisimpiä laserturvallisuusstandardeja ja -suosituksia

dards Institute) vuonna 1973 (Safe Use of Lasers, ANSI Z136.1-1973). Maailmanlaajuisesti keskeisin standardi on nykyisin kansainvälisen sähköalan standardisoimisjärjestön IEC:n (International Electrotechnical Commission) standardi IEC 60825-1 (Safety of laser products- Part 1: Equipment classification, requirements and user's guide). Standardi sisältää myös altistumisrajat, jotka ovat käytännössä hyvin lähellä kansainvälisen ionisoimattoman järjestön ICNIRPin (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) ohjearvoja. Standardin osa, joka käsittelee ohjeita käyttäjälle (user's guide), on poistettu vuonna 2007 ja vastaavat suositukset löytyvät nykyään erillisestä IEC:n teknisestä raportista IEC TR 60825-14.

Euroopassa on omaksuttu käytäntö, jossa laserstandardisoinnin perustyö tehdään yleensä IEC:ssä ja eurooppalainen sähköalan standardisoimisjärjestö CENELEC ottaa vain standardit käyttöön antamalla niille EN-tunnuksen ja tekemällä mahdollisesti joitain yhteisiä muutoksia (common modifications). Suurin osa EN-standardeista vahvistetaan Suomessa luettelomalla, jolloin standardille annetaan SFS-EN-tunnus vain luettelomalla se suomalaiseksi standardiksi. Näin on tehty laserstandardinkin SFS-EN 60825-1 (englanninkielinen) osalta, jolloin se on teknisesti yhtäpitävä standardin EN 60825-1 ja siihen liittyvien muutos-/täydennysosien kanssa. Standardien noudattaminen ei sinällään ole EU:n alueella pakollista, mutta standardit ovat käytännöllinen ja useimmiten käytännössä ainoa tapa osoittaa, että laite täyttää pienjännitedirektiivissä (73/23/EEC) asetetut oleelliset turvallisuusvaatimukset. Nykyinen vanha direktiivi ei kata paristokäyttöisiä lasereita, mutta valmisteilla on uusi direktiivi, joka mahdollisesti kattaa myös paristolaitteiden säteilyn. Työntekijöiden suojelemiseksi on julkaistu Euroopan parlamentin ja neuvoston optista säteilyä koskeva direktiivi (2006/25/EY), jossa on muun muassa altistumisrajat lasersäteilylle. Direktiivin altistumisrajat, jotka noudattelevat kansainvälisen ionisoimattoman säteilyn komission ICNIRPin ohjearvoja, ovat hyvin lähellä myös IEC:n standardissa esitettyjä altistumisrajoja. Laserturvallisuudesta vallitsee maailmanlaajuisesti huomattavan suuri yksimielisyys, eikä turvallisuusstandardien välillä ole suuria eroja.

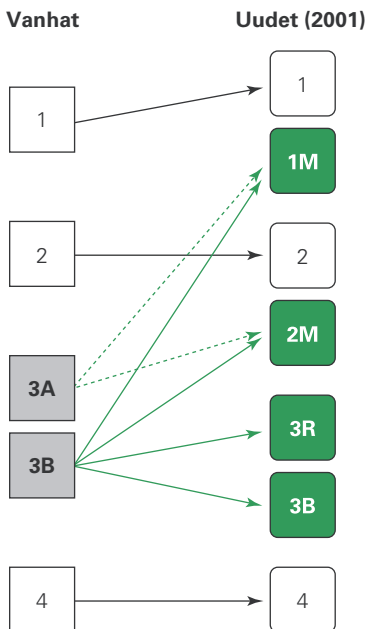
3.5 | Lasereiden turvallisuusluokitus

Laserlaitteet luokitellaan niiden aiheuttamien terveysriskien perusteella eri turvallisuusluokkiin, joille on määritelty emissiorajat aallonpituuden ja altistumisaikojen perusteella. Laserien turvallisuusluokkajakoa uudistettiin vuonna 2001 IEC:n teknisen komitean TC 76 ehdotuksen perusteella. Uudet turvallisuusluokat on määritelty kansainvälisessä laserturvallisuusstandar-

dissa IEC 60825-1 ja sitä vastaavassa eurooppalaisessa laserturvallisuusstandardissa EN-60825-1. Uudessa luokitusjärjestelmässä on seitsemän luokkaa, ja ne on numeroitu siten, että laitteen vaarallisuus kasvaa järjestysnumeron kasvaessa: 1, 1M, 2, 2M, 3R, 3B ja 4. Luokkaan 1 kuuluvat laserit ovat käytännössä vaarattomia ja luokkaan 4 kuuluvat laserit voivat aiheuttaa pahoja silmä- ja ihovammoja.

Kuvassa 3.12 on esitetty, mihin luokkiin vanhalla järjestelmällä luokitellut laserlaitteet sijoittuvat uudessa järjestelmässä. Luokat 1, 2 ja 4 ovat säilyneet lähes ennallaan. Luokan 3A laitteet jakaantuvat luokkiin 1M ja 2M. Luokan 3B laitteista osa menee luokkiin 1M, 2M ja 3R.

USA:ssa käytössä olevat standardit (ANSI Z136.1 ja CDRH 21 CFR 1040.10) poikkeavat jonkin verran IEC:n standardista. Faktalaatikossa 3.2 selvittää joidenkin ANSI:n (American National Standards Institute) ja CDRH:n (Center for Devices and Radiological Health) määrittelemien luokkien eroavuutta verrattuna IEC:ssä määriteltyihin luokkiin sekä esitellään IEC:n vanhan turvallisuusluokituksen erot nykyiseen järjestelmään. Ei ole kuitenkaan aina tarvetta tai vaatimusta siihen, että sellaiset laserlaitteet, jotka on luokiteltu ennen vuotta 2001 tai jotka on luokiteltu amerikkalaisien standardien (ANSI ja CDRH) mukaan pitäisi luokitella uudelleen, mutta vanhat tai amerikkalaiset luokkamerkinnot voivat aiheuttaa sekaannusta.



Kuva 3.12 Laserlaitteiden vanhat ja uudet turvallisuusluokat

Nykyiset IEC:n turvallisuusluokat

Luokka 1

Luokkaan 1 kuuluvat laserit ovat heikkotehoisia ja ne toimivat UV-säteilyn, näkyvän valon ja infrapunasäteilyn aallonpituuksilla. Luokan 1 laserin lähettämä säteily ei aiheuta vaaraa eikä suojaustoimenpiteitä tarvita normaalissa käyttötilanteessa edes pitkällä altistusajoilla. Luokan 1 teho- ja energiarajat saadaan suoraan altistumisrajoista kertomalla vastaava teho tai energiatiheysarvo kyseiselle aallonpituusalueelle määrätyn mittausaukon pinta-alalla. Näkyvän valon ja infrapunasäteilyn alueille mittausaukon halkaisija on sama kuin pupillin suurin halkaisija eli seitsemän millimetriä. Aallonpituusalueella 500–700 nm jatkuvatoimisen luokan 1 laserin suurin sallittu säteilyteho on 0,39 milliwattia. Lelut ovat tyyppillisiä luokan 1 laserilaitteita.

Luokkaan 1 kuuluu myös laitteita, joissa lasersäde kulkee laitteen sisällä pääsemättä ulos, kuten esimerkiksi lasertulostimissa ja CD- sekä DVD-soittimissa. Nämä niin sanotut suljetut laitteet voivat sisältää ylempään turvallisuusluokkaan kuuluvan laserin ja siksi niiden käyttöohjeissa on oltava varoitus, ettei suojakotelo tai sen osaa saa avata. Tällaisten suljetujen laitteiden ylläpito- tai huoltotoimenpiteet saattavat vaatia erityisiä suojaustoimenpiteitä. Tämän vuoksi laitteiden huolto ja korjaustoimia ei saa tehdä omatoimisesti, vaan laite tulee toimittaa huoltoliikkeeseen, jossa ammattihenkilö avaa kotelon.

Luokka 1M

Luokkaan 1M kuuluvat laserit toimivat UV-säteilyn, näkyvän valon ja infrapunasäteilyn aallonpituuksilla. Jatkuvatoimisen luokan 1M laserin suurin sallittu säteilyteho on 500 mW (0,5 W). Luokkaan 1M kuuluvan laserin kokonaisteho tai pulssienergia ylittää yleensä sen, mitä on sallittu luokan 1 laserille, mutta lasersäde ei ole kapea, vaan se on levinnyt eli lasersäde hajoaa voimakkaasti tai sitä on levitetty optisesti. Täten vain pieni osa koko lasersäteestä voi mennä silmään. Tällaisessa tapauksessa altistumisrajat suojaamattomalle silmälle tai iholle eivät ylitä. Luokkamerkinnässä oleva kirjain M tulee englanninkielisestä sanasta "magnification" (suurennus, suurennuskyky), joka viittaa siihen, että säteilyvaara on kuitenkin olemassa, jos sädettä katsotaan optisen apuvälineen, kuten kiikarin, kaukoputken tai suurennuslasien kautta. Mahdolliset vaaralliset optiset apuvälineet voidaan ilmoittaa laitteen varoitus-tekstissä tai laitteen valmistajan käyttö- ja turvallisuusohjeessa. Joissakin langattomissa tiedonsiirtojärjestelmissä käytetään luokkaan 1M kuuluvia lasereita.

Luokka 2

Luokkaan 2 kuuluvat laserit ovat pienitehoisia ja toimivat näkyvän valon aallonpituusalueella 400–700 nm. Jatkuvatoimisen luokan 2 laserin suurin sallittu säteilyteho on 1 mW. Silmän sulkeutumisrefleksin, jonka reagoimisaika on noin 0,25 sekuntia, katsotaan suojaavan silmää vaurioitumiselta. Silmän sulkeutumisrefleksin reagoimisaikana halkaisijaltaan seitsemän millimetrin aukon eli pupillin energiatiheys on $6,4 \text{ J/m}^2$, joka vastaa reagoimisajan altistusrajaa. Säteily voi aiheuttaa vaurion vain, jos säde suunnataan suoraan silmään ja katsomista säteeseen pitkitetään tietoisesti. Jotkut laserosoittimet ja viivakoodin lukijat ovat luokan 2 lasereita.

Luokka 2M

Luokkaan 2M kuuluvat laserit toimivat näkyvän valon aallonpituusalueella kuten luokan 2 laitteet. Jatkuvatoimisen luokan 2M laserin suurin sallittu säteilyteho on sama kuin luokalla 1M eli 500 mW. Luokan 2M laserien kokonaisteho tai pulssienergia ylittää yleensä sen, mitä on sallittu luokan 2 lasereille, mutta lasersäde ei ole kapea, vaan se on levinnyt kuten luokan 1M lasereilla. Luokan 2M laser voi siis aiheuttaa silmävaurion vain, jos säteeseen katsomista pitkitetään tietoisesti tai jos sädetä katsotaan säteilyä keräävän optisen apuvälineen kautta. Kuten luokan 1M tapauksessa mahdolliset vaaralliset optiset apuvälineet voidaan ilmoittaa laitteen varoitustekstissä tai laitteen valmistajan käyttö- ja turvallisuusohjeessa. Esimerkiksi rakennustoissa käytetään taso- ja suuntauslasereita, jotka kuuluvat luokkaan 2M.

Luokka 3R

Luokka 3R käsittää laserit, joiden säteily voi ylittää viisinkertaisesti luokan 1 (näkyvä säteily) ja luokan 2 (näkyvä valo) laserien emissiorajat. Näkyvän valon aallonpituusalueella toimivien luokan 3R laserien suurin sallittu säteilyteho on siis 5 mW. Vaikka suojaamattoman silmän altistuksen enimmäisarvot ylittyvät, sisältävät ne sellaisen turvamarginaalin, että vahinkoja ei käytännössä esiinny luokan 3R lasereilla. Kuitenkin periaatteessa suoraan silmään osuva säde tai säteen heijastuminen silmästä pinnasta voi aiheuttaa pysyvän vaurion silmässä. Jotkut laserosoittimet ja rakentamisen mittauksessa käytettävät laserit kuuluvat luokkaan 3R.

Luokka 3B

Luokka 3B käsittää laserit, joiden säteily ylittää luokan 3R emissiorajat. Jatkuvatoimisen luokan 3B laserin suurin sallittu säteilyteho on 500 mW. Luokkaan 3B kuuluvan laserin suora ja peiliheijastunut säde on aina vaarallinen silmille. Muun muassa yliopistoilla tehtävässä perustutkimuksessa käytetään usein luokan 3B lasereita.

Luokka 4

Luokka 4 käsittää laserit, joiden säteily ylittää luokan 3B emissiorajat. Luokan 4 lasereiden voimakkuudelle ei ole ylärajaa. Luokan 4 laserin säde on niin voimakas, että se voi polttaa iholle palovamman hetkessä. Silmä voi vaurioitua jopa hajaheijastuksesta. Suuritehoinen lasersäde voi sytyttää puun tai kankaan tuleen. Esimerkiksi laserkirurgiassa, metallin leikkauksessa ja yleisoesityksissä käytetään usein luokan 4 lasereita.

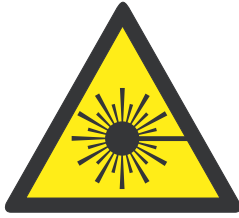
Turvallisuusluokkakohtaiset varoitusmerkinnät

Laserlaite on varustettava tekstikilvellä, josta ilmenee laserlaitteen turvallisuusluokka. Tekstikilven pitää olla pysyvästi kiinnitetty, helposti ymmärrettävä ja selvästi näkyvillä käyttöön, kunnossapitoon tai huoltoon liittyvän tarkoituksen mukaisesti. Tekstikilpi pitää sijoittaa siten, että se voidaan lukea ilman altistumista säteilylle, joka ylittää luokan 1 emissiorajat. Tekstikilpien pitää olla suomenkieliset ja tarvittaessa myös ruotsinkieliset. CENELEC-maiden varoitustekstit kansallisilla kielillä, Suomi mukaan luettuna, on esitetty teknisessä raportissa CLC/TR 50493.

Luokkaa 1 ylempiin turvallisuusluokkiin kuuluvien lasereiden tekstikilvissä tulee esittää myös standardin mukainen turvallisuusluokkakohtainen varoitusteksti (katso taulukko 3.8) ja säteilytiedot. Luokitukseen käytetty

Turvallisuusluokkakohtaiset varoitustekstit
LASERSÄTEILYÄ ÄLÄ KATSO OPTISELLA LAITTEELLA SUORAAN SÄTEESEEN LUOKAN 1M LASERLAITE
LASERSÄTEILYÄ ÄLÄ TUIJOTA SÄTEESEEN LUOKAN 2 LASERLAITE
LASERSÄTEILYÄ ÄLÄ TUIJOTA SÄTEESEEN TAI KATSO OPTISELLA LAITTEELLA SUORAAN SÄTEESEEN LUOKAN 2M LASERLAITE
LASERSÄTEILYÄ ÄLÄ KATSO SUORAAN SÄTEESEEN ¹⁾ LUOKAN 3R LASERLAITE
LASERSÄTEILYÄ VARO ALTISTUMISTA SÄTEELLE ²⁾ LUOKAN 3R LASERLAITE
LASERSÄTEILYÄ VARO ALTISTUMISTA SÄTEELLE LUOKAN 3B LASERLAITE
LASERSÄTEILYÄ VARO SILMIEN TAI IHON ALTISTUMISTA SUORALLE TAI HAJAHEIJASTUNEELLE SÄTEILYLLE LUOKAN 4 LASERLAITE
¹⁾ Aallonpituusalue 400–1 400 nm ²⁾ Aallonpituusalue < 400 nm ja > 1 400 nm

Taulukko 3.8 Turvallisuusluokkakohtaiset varoitustekstit



Kuva 3.13 Lasersäteilyn varoitusmerkki



Kuva 3.14 Esimerkkejä kilvistä, joissa on lasersäteilyn varoitusmerkki ja turvallisuusluokan mukainen varoitusteksti



Kuva 3.15 Esimerkkejä laseraukon kilvistä

standardi ja sen julkaisuajankohta tulee myös merkitä laitteeseen. Luokkaa 1 ylempiin turvallisuusluokkiin kuuluvat laserit on lisäksi varustettava lasersäteilyn varoitusmerkillä, jonka taustaväri on keltainen ja reunus sekä tunnus ovat mustat (kuva 3.13). Varoitusmerkki ja -teksti voidaan myös yhdistää samaan kilpeen (kuva 3.14). Säteilytiedot eli suurin mahdollinen säteilyteho, lasersäteilyn aallonpituus, laserpulssin kesto, laserväliaine, voidaan ilmoittaa erillisellä tekstikilvellä. Luokkien 3R, 3B ja 4 laitteisiin on merkittävä lasersäteilyn ulostuloaukot käyttäen joko ”Lasersäde” tai ”Varo altistumista - Tästä aukosta tulee lasersäteilyä” tekstiä. Lisäksi voidaan käyttää kilpiä, jotka osoittavat säteen lähtöaukon (kuva 3.15).

Luokkien 1 ja 1M laserlaitteiden säteilytiedot, turvallisuusluokitukseen käytetty standardi ja sen julkaisuajankohta voidaan esittää käyttäjälle tarjotetuissa käyttöohjeissa.

Laitteisiin, joissa on suojakotelo, on merkittävä varoitus suojakotelon avaamisesta. Nämä merkinnät koskevat laitteita, joiden säteily voi ylittää luokan 1 emissiorajat. Luokan 1M laitteissa merkintä voidaan esittää käyttäjälle tarjotetuissa ohjeissa. Merkinnät poikkeavat turvallisuusluokakohtaisista varoitusteksteistä (taulukko 3.8) siten, että altistuttaessa esimerkiksi luokan 2 lasersäteilylle silloin, kun laitteella on suojakotelo ilman suojalukitusta, teksti on seuraava:

VARO - AVATTAESSA OLET ALTTIINA LUOKAN 2 LASERSÄTEILYLLE
ÄLÄ TUIJOTA SÄTEESEEN

Altistuttaessa esimerkiksi luokan 2 lasersäteilylle silloin, kun laitteella on suojalukituksella varustettu suojakotelo, teksti on merkittävä seuraavasti:

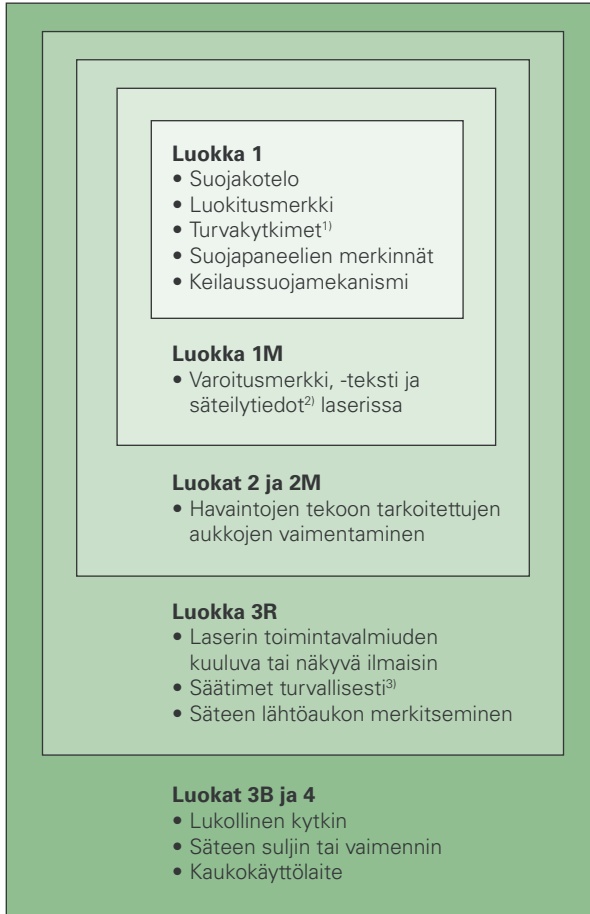
VARO - AVATTAESSA JA SUOJALUKITUS OHITETTAESSA
OLET ALTTIINA LUOKAN 2 LASERSÄTEILYLLE
ÄLÄ TUIJOTA SÄTEESEEN

Edellä mainitut esimerkkitekstit toimivat vastaavasti muillakin turvallisuusluokilla. Jos laser toimii näkyvän valon aallonpituusalueen 400–700 nm ulkopuolella, sana ”lasersäteilyä” tulee korvata tekstillä ”näkyvätöntä lasersäteilyä”. Jos laser toimii sekä näkyvällä että näkymättömällä aallonpituusalueella, sana ”lasersäteilyä” korvataan tekstillä ”näkyvää ja näkymätöntä lasersäteilyä”. Jos laser toimii vain näkyvän valon aallonpituusalueella, sana ”lasersäteilyä” voidaan vaihtoehtoisesti korvata tekstillä ”laservaloa”.

Kaikissa käyttäjille tarjotetuissa ohjeissa tulee olla seuraava maininta: ”Varoitus - laitteen käyttäminen muulla kuin tässä käyttöohjeessa mainitulla tavalla saattaa altistaa käyttäjän vaaralliselle lasersäteilylle”.

Turvallisuusluokakohtaiset varusteluvaatimukset

Yhteenveto keskeisistä varusteluvaatimuksista on esitetty kuvassa 3.16. Vaatimukset kasvavat, kun laitteen vaarallisuus kasvaa. Erityisesti luokkien 3B ja 4 laitteilla pitää olla lukollinen kytkin, joka estää laserin käytön ilman avainta, ja tämän lisäksi säteen suljin tai sen vaimennin sekä kaukokäyttölaite. Alemman luokan vaatimukset sisältyvät aina myös ylempään luokkaan.



¹⁾ Jos sisällä suurempitehoinen laser, jonka luokka vähintään 3R.

²⁾ Luokan 1M laitteissa säteilytiedot voidaan ilmoittaa myös käyttäjälle tarkoitettussa ohjeessa.

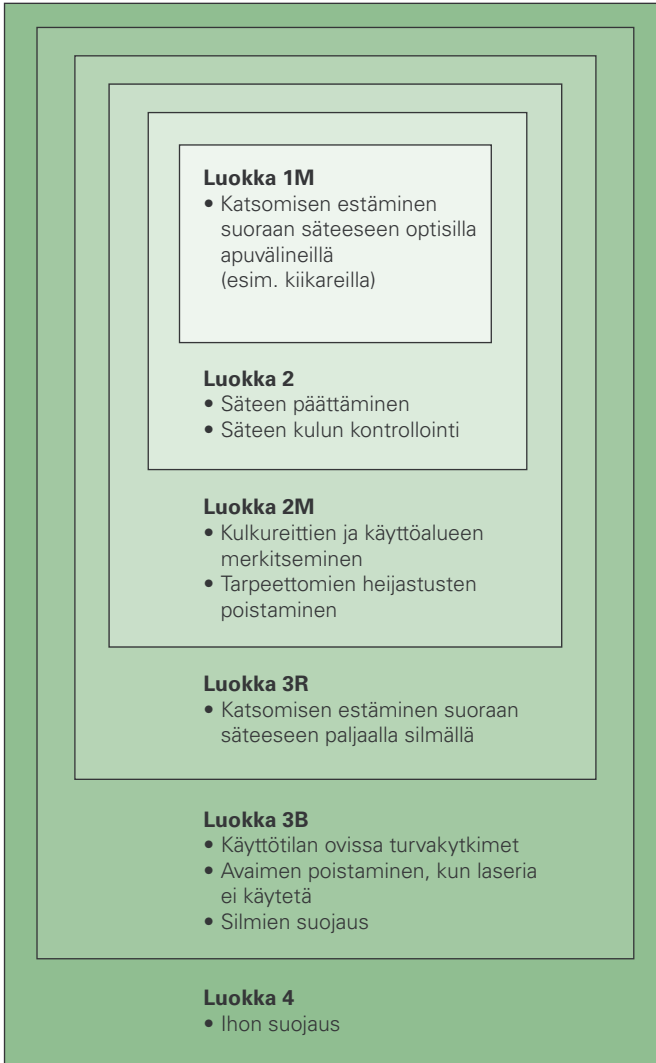
³⁾ Säädettäessä ei saa altistua yli luokkien 1 tai 2 säteilylle.

Kuva 3.16 Luokkakohtaiset varusteluvaatimukset

Kaikkia laserluokkia koskee lisäksi se, että laitteella pitää olla käyttöohjeet ja niiden pitää sisältää ohjeet laserin turvallisesta käytöstä. Lisäksi myynnin edistämiseen tarkoitettussa esitteessä pitää olla maininta laserin turvallisuusluokasta ja huolto-ohjeiden pitää sisältää turvallisuusinformaatiota.

Turvallisuusluokkakohtaiset varoitusositukset

On huomattava, että lasereiden käyttöön voi liittyä myös muita kuin säteilyturvallisuusongelmia, kuten esimerkiksi sähköiskun vaara suurilla jännit-



Kuva 3.17 Luokkakohtaiset varotoimisuositukset

teitä käytettäessä. Tässä kirjassa on rajoitettu käsittelemään kuitenkin vain säteilyturvallisuskysymyksiä.

Lasereita käytettäessä yleisiin varotoimiin kuuluu, että lasersädettä ei suunnata ihmistä kohti, lasereita käytetään valvotuissa olosuhteissa, laserit säilytetään asianmukaisesti ja laserit sekä säteilyn kulkuun vaikuttavat komponentit asennetaan tukevasti. Luokkakohtaisesti voidaan antaa vielä lisää suosituksia varotoimista. Eri turvallisuusluokkia koskevat erityisohjeet on annettu kuvassa 3.17, jossa alemman luokan suositukset sisältyvät myös ylemmän luokan suosituksiin.

Vanhat turvallisuusluokat ja amerikkalaiset turvallisuusluokat

Vanhalla IEC:n 3A-luokalla oli sama merkitys kuin uusilla luokilla 1M ja 2M. Myös luokkaan 3A kuuluvan laserin lähettämä säteily hajoaa yleensä voimakkaasti tai sädettä on levitetty optisesti kuten luokkien 1M ja 2M lasereilla. Paljaan silmän altistuminen on vielä suhteellisen turvallista, mutta näiden luokkien lasereilla potentiaalinen silmävaurion vaara on olemassa, jos sädettä katsotaan säteilyä keräävän optisen apuvälineen kautta. Luokka 3A määriteltiin siten, että jatkuvatoimisen, näkyvän valon aallonpituusalueella toimivan laserin suurin sallittu säteilyteho on 5 mW. Luokkien 1M ja 2M lasereilla maksimi ulostuloteho on kuitenkin nostettu 500 milliwattiin. Vanha luokka 3A oli todellakin uusien luokkien 1M, 2M ja 3R yhdistelmä.

Vuonna 2007 amerikkalainen ANSI otti käyttöön IEC:n mukaiset luokkamerkinnot. Myös amerikkalainen CDRH aikoo harmonisoida merkinnät IEC:n luokitusta vastaavaksi. Ekvivalenttisuus luokkien välillä ei ole kuitenkaan aivan täydellistä, sillä esimerkiksi ANSI:n ja CDRH:n määrittelemät mittausetäisyydet lasereita luokiteltaessa eroavat IEC:n mittausetäisyyksistä.

ANSI käytti aiemmin luokituksessa arabialaisia numeroita, kun taas CDRH:n käytössä ovat olleet roomalaiset numerot. CDRH määrittää luokan IIIA vain näkyvän valon aallonpituusalueella, kun taas ANSI määrittäi luokan 3a sekä näkyvällä että näkymättömällä aallonpituusalueella. Sekä ANSI:n luokka 3a että CDRH:n luokka IIIA poikkesivat IEC:n vanhasta luokasta 3A. Määrittäessään luokalle IIIA, että optisilla apuvälineillä ulostuloteho on pienempi kuin viisi milliwattia, CDRH vaatii varoituskilpeen tekstin, joka riippuu silmäaltistumisrajan ylitymisestä. Jos altistumisraja ylittyy, laite tulee varustaa ”DANGER”-kilvellä. Jos altistumisraja ei ylity, laite tulee varustaa vain ”CAUTION”-kilvellä. Käytännössä luokan IIIA merkintä ”DANGER” tarkoittaa IEC:n nykyistä luokkaa 3R näkyvällä aallonpituusalueella ja merkintä ”CAUTION” luokkaa 2M. Aiemmin ”DANGER”-merkintä olisi tarkoittanut IEC:n vanhaa 3B-luokkaa, tyypillisenä esimerkkinä voisi olla 3 mW:n laserisoitin, ja ”CAUTION”-merkintä olisi tarkoittanut 3A-luokkaa.

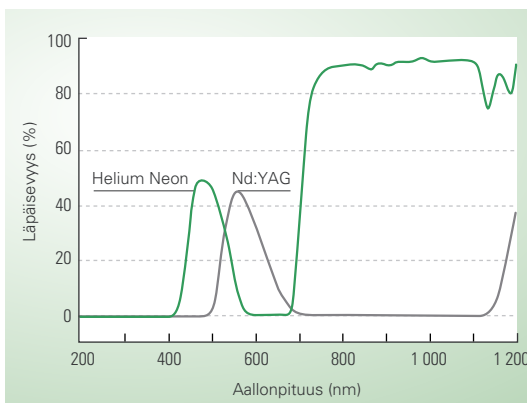
3.6 Lasereiden yleinen käyttöturvallisuus työpaikoilla

Lasersäteilyltä suojautuminen

Edellisessä luvussa kuvattujen turvallisuusluokkien perusteella määritellään lasersäteilyn käyttöön liittyvät turvallisuustoimenpiteet. Ensimmäisenä suojautumiskeinona laserlähde tulisi pyrkiä koteloidaan siten, että laite kuuluu turvallisuusluokkaan 1. Aina kun sovelluksen kannalta on mahdollista, tulee käyttää laserlähdettä, jonka teho on alle luokan 2 tai 3R emissiorajan. Käytännössä kaikkien luokan 3B tai 4 laserlähteiden täydellinen kotelointi ei ole mahdollista, jolloin laitteen käyttäjien silmät ja tarvittaessa iho tulee suojata. Erityisesti huoltotöiden aikana suojakotelon ollessa poistettuna huoltohenkilöstön lisäksi myös muiden työntekijöiden tulee suojautua lasersäteilyltä.

Lasersuojaimiksi tarkoitetut silmäsuojaimet ovat selektiivisiä suodattimia tai suodatinyhdistelmiä. Niiden tarkoitus on vaimentaa lasersäteen aallonpituutta päästämällä kuitenkin mahdollisimman paljon näkyvää valoa läpi. Silmiensuojainten valinnassa tulee ottaa huomioon laserlähteen aallonpituus, teho ja pulssitettujen lasereiden pulssipituus.

Suodatin on tarkoitettu tietylle aallonpituusalueelle, jolla suojain vaimentaa tai estää kokonaan lasersäteilyn pääsyn silmään. Suojainta valittaessa tulee huomioida, että sen tulee suojata kaikilta laserin lähettämiltä aallonpituuksilta. Suodattimen näkyvän valon läpäisy tulisi olla vähintään 20 prosenttia. Jos se jää tämän alle, tulee valmistajan ilmaista se selvästi. Huono näkyvän valon läpäisy vaatii yleisvalaistuksen lisäämistä. Lasersuojainten värinointo voi olla huono. Esimerkiksi helium-neon-laserin (HeNe) säteilyltä suojaavat suodattimet läpäisevät vain sinivihreät aallonpituudet (kuva 3.18).



Kuva 3.18 Esimerkki HeNe- ja Nd:YAG-lasereille tarkoitettujen lasersuodattimien (Laser-Gard®) läpäisevyydestä aallonpituuden funktiona

Lasersuodattimen vaimennus ilmoitetaan suodattimen optisen tiheyden D_λ avulla

$$D_\lambda = \log \frac{E_0}{E} = \log \tau_\lambda \quad (3.1)$$

missä E_0 on tulevan säteilyn tehotiheys, E suodattimen läpäissyt tehotiheys ja τ_λ suodattimen läpäisevyys laseraallonpituudella. Esimerkiksi suodattimen läpäisevyyttä 10^{-2} (= 1 %) vastaava optinen tiheys on 2, ja standardin mukainen lasersuojalasien merkintä on L2.

Lasersäteilyltä suojaavien silmiensuojainten läpäisyvaatimukset ja valintaohjeet on esitetty standardeissa SFS-EN 207 Suodattimet ja silmiensuojaimet lasersäteilyä vastaan ja SFS-EN 208 Silmiensuojaimet laserien ja laserjärjestelmien säätötyötä varten.

Sekundäärisäteilyltä suojautuminen

Hiilidioksidi(CO_2)-laserhitsauksessa syntyy niin voimakasta UV-säteilyä, että prosessi tulee mahdollisuuksien mukaan kokonaan eristää. Jollei prosessia voida eristää ympäristöstään, lähellä työskentelevien iho tulisi olla suojattu kattavasti ja käytettävä kasvojen suojauksessa hitsausmaskia. Nd:YAG-lasertyöstössä ja CO_2 -laserleikkauksessa voi syntyä kirkasta valoa, jonka pitkäaikainen katsominen lähietäisyydellä (< 50 cm) ilman tummennettuja suojalaseja on haitallista.

Suojalaseilla pienennetään kohteen visuaalista kirkkautta eli luminanssia L_v ja rajoitetaan verkkokalvovaurioita aiheuttavan säteilyn määrää. Silmälle miellyttäväksi luminanssin raja-arvoksi on arvioitu $10\,000 \text{ cd/m}^2$. Jotta sekundäärisäteilyn luminanssi ei kohoaisi yli miellyttäväksi todetun rajan, suojalaseihin tarvittava tummuusaste S_v voidaan laskea kaavasta:

$$S_v = 1 - \frac{7}{3} \log\left(\frac{10^4}{L_v}\right). \quad (3.2)$$

Lyhytaaltoisen valon aiheuttamien verkkokalvon fotokemiallisten vaurioiden estämiseksi "sinisen" valon painotettu radianssi L_{blue} ei saa pitkäaikaisesti (> 10^4 s) ylittää $10 \text{ mW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$. Tällöin suojalasien tummuusasteen tulee olla:

$$S_{blue} = 1 - \frac{7}{3} \log\left(\frac{10^{-2}}{L_{blue}}\right). \quad (3.3)$$

Sekundäärisäteilyn luminanssi L_v ja radianssi L_{blue} tulee määrittää erikseen kussakin työstötilanteessa sopivien silmiensuojainten valitsemiseksi.

Suojarakenteet

Suurtehoisen laserlaitteen ympärille tulee asentaa riittävät suojarakenteet. Lasersäteilyltä suojaavia rakenteita ovat erilaiset passiiviset ja aktiiviset esteet, jotka ilmaisevat esteen etupinnan altistumisen lasersäteilylle. Ilmaisen signaalin perusteella katkaistaan laserin tehonsyöttö niin nopeasti, ettei esteen takapinnalla lasersäteen tehotiheys nouse vaarallisen korkeaksi. Lasersäteilyltä suojaavia rakenteita koskevat vaatimukset on esitetty standardeissa SFS-EN 60825-4 ja SFS-EN 12254. Suojarakenteen tulee rajoittaa sen läpi tuleva lasersäteily luokan 1 laserlaitteen emissio- tasolle.

Passiivisia lasersuojarakenteita ovat:

- Materiaalin lämmönsiirto-ominaisuuksia hyödyntävä metallilevy, jota on tarvittaessa tehostettu ilma- tai vesijäähdytyksellä pitämään pinnan lämpötilan alle sen sulamispisteen normaaleissa olosuhteissa ja kohtuudella ennustettavissa olevissa vikatilanteissa.
- Muuten läpinäkyvä, mutta laserin aallonpituudella läpinäkymätön levy, johon vähäiset laseraltistumiset eivät vaikuta lasertyöstökoneen normaaleissa toimintatilanteissa.

Passiivinen lasersuoja tulee varustaa siten, että lasersäteen kohdistuminen suojaan on silmin havaittavissa, esimerkiksi pinnoittamalla lasersuojavälineen molemmat pinnat tarkoituksenmukaisella maalilla.

Aktiivisia lasersuojarakenteita ovat:

- Lasersuoja, johon on asennettu materiaalin ylikuumenemisen ilmaisevia antureita.
- Lasersuoja, joka vertaa kahden paineistettua nestettä tai kaasua sisältävän paneelin välistä paine-eroa. Kun lasersäteily puhkaisee paneelin pinnan, väliaineessa tapahtuva paineen aleneminen havaitaan toisessa paneelissa olevalla paineanturilla.

Jos aktiivisen lasersuojan toiminta vaatii ulkoista energiaa, sen syöttö tulee järjestää niin, ettei myöskään laserin toiminta ole mahdollista ilman kyseistä energiansyöttöä.

Suojarakenteen suurimman mahdollisen säteilyaltistuksen arviointi

Standardi SFS-EN 60825-4 sisältää ohjeita lasersuojarakenteiden suurimman mahdollisen säteilyaltistuksen arvioimiseen. Lasersuojavälineen suurinta mahdollista säteilyaltistusta arvioitaessa tulee eritellä seuraavat tiedot:

- Suurin tehotiheys lasersuojarakenteen etupinnalla joko kokonaistehona tai -energiana pinta-alaa kohden
- Sen alueen rajaaminen, jolla etupinta altistuu edellä mainitulle tehotiheydelle
- Altistuksen ajalliset ominaisuudet eli onko kyseessä jatkuvatoiminen vai pulssitettu laser
- Altistuksen kokonaiskesto
- Säteilyn aallonpituus
- Säteilyn tulokulma ja (jos tarkoituksenmukaista) polarisaatio
- Säteilyalueen pienimmät mitat
- Aktiiviselle lasersuojavälineelle suojausaika, jonka rakenne pystyy vaimentamaan sen läpäisevää säteilyä laserluokan I tasolle antamansa sammutussignaalin jälkeen.

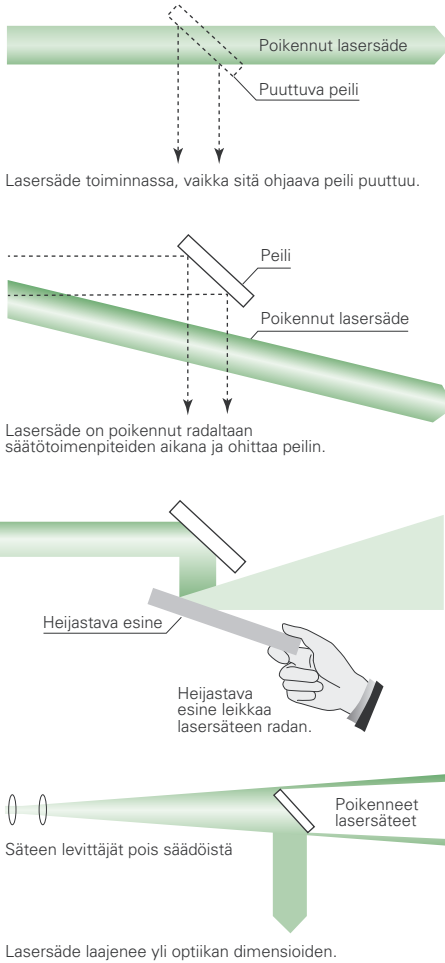
Lasersuojarakenteen suurin mahdollinen altistus tulee arvioida ennakoitavissa olevalla laserparametrien, työkappaleiden materiaalien, geometrian ja prosessien yhdistelmällä, joka voi toteutua laserlaitteen normaalin toiminnan aikana. Lisäksi tulee arvioida kuinka paljon ja kuinka kauan lasersuojarakenteet altistuvat lasersäteilylle vikatilanteiden aikana. Arviointiin tulee sisällyttää informaatio siitä, kuinka kauan altistuminen kestää ennen kuin se havaitaan tai laserlaitteen turvajärjestelmä sulkee laserin.

Kuvasarjassa 3.19 on esimerkkejä tilanteista, joissa radaltaan poikennut lasersäde voi kohdistua suojarakenteeseen laserlaitteen huollon yhteydessä.

Käyttöturvallisuusohjeita teollisuuslasereille

Yleisesti suositeltavia turvallisuusohjeita ja toimenpiteitä lasereita käytettäessä ovat:

- Luokkaan 3B ja 4 kuuluvissa lasereissa kaukokytkentä liitetään huoneen päävirtakytkimeen.
- Kun luokkaan 3B tai 4 kuuluva laser ei ole käytössä, se on lukittava.
- Sivullisten altistuminen yli luokkien 1M tai 2M kuuluvien laserien säteilylle on estettävä säteen vaimentimilla tai absorboivilla päätteillä.
- Lasereiden käyttöalueelle johtaville kulkureiteille on asennettava varoituskilvet.
- Lasersäde on säädettävä mahdollisuuksien mukaan silmien tason yläpuolelle tai suljettava kulkemaan putken sisällä.



Kuva 3.19 Laserlaitteen huollon yhteydessä radaltaan poikenneita lasersäteilytapauksia

- Peilimäisesti heijastavien materiaalien käyttöä on vältettävä luokkaan 3B tai 4 kuuluvien lasereiden lähellä; järjestelmään kuuluvia peilejä saa siirtää vain laserin toimiessa.
- Laserien käyttöalueella työskenteleviä on koulutettava tuntemaan laitteen ominaisuudet, turvatoimenpiteet, varoitusmerkit ja suojautumisen tarpeellisuus.
- Luokkaan 3B ja 4 kuuluvien lasereiden käyttäjille on tehtävä terveystarkastus; lääketieteellinen ja työhygieeninen tutkimus tehtävä välittömästi liian suureksi epäillyn altistumisen jälkeen.

- Erityisesti luokkaan 4 kuuluvien lasereiden sekä suorat että hajaheijastuneet säteet voivat aiheuttaa kudonvaurioita, joten seuraavia ohjeita tulee noudattaa:
- Laseria käytetään vain valvotulla alueella. Alue on merkittävä asianmukaisin varoituskilvin.
- Lasersäteen kulkutiet on mahdollisuuksien mukaan koteloitava. Laserin käyttöalueelle saa päästää ainoastaan asianmukaisia suojaamia käyttäviä ihmisiä.
- Laserin tulee mahdollisuuksien mukaan olla kaukokäytettävä, jotta tarpeetonta oleskelua lasersäteen ympäristössä voitaisiin välttää.
- Yleisvalaistuksen tulee olla hyvä laserin käyttöalueella ja seinäpintojen himmeän vaaleasävyisiä.
- Peiliheijastusmahdollisuudet on poistettava.
- Pitkäaaltoisen infrapunasäteily saattaa heijastua peilimäisesti karkealta hajaheijastavalta näyttävältä pinnalta. Erityistä huomiota tulee kiinnittää heijastusten estämiseen esimerkiksi käytettäessä CO₂-lasereita. Säde ja kohdealue tulisi ympäröidä laseraallonpituutta läpäisemättömällä materiaalilla.
- Luokan 4 laser voi aiheuttaa palovaaraa, lämmön aiheuttamia vääristymiä optisessa materiaalissa sekä kiinteän aineen sulamista ja höyrystymistä. Säde tulee päättää asianmukaiseen materiaaliin, mieluiten riittävästi jäähdytettyyn metalliin tai grafiittiin. Hyvin korkeat energiatilheydet voidaan päättää niin, että säteily absorboituu useaan kohteeseen, jotka osittain heijastaen jakavat laserenergian laajalle alalle.

KIRJALLISUUTTA

ANSI. American National Standard for Safe Use of Lasers. ANSI Z136.1. American National Standards Institute, 2007.

CDRH. Federal Performance Standard for Laser Products, 21 CFR 1040.10. Center for Devices and Radiological Health, Rockville, Maryland, 2006.

CENELEC. National wordings of laser warnings labels. CLC/TR 50493. CENELEC, 2007.

Henderson R, Schulmeister, K. Laser Safety. Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 2004.

ICNIRP. Guidelines on Limits of Exposure to Laser Radiation of Wavelengths between 180 nm and 1 mm. Health Physics, 71(5): 804–819, 1996.

ICNIRP. Revision of the Guidelines on Limits of Exposure to Laser Radiation of Wavelengths between 400nm and 1,4µm. Health Physics, 79(4): 431–440, 2000.

IEC. Safety of laser products – Part 1: Equipment classification, requirements and user's guide. IEC 60825-1: 2001-08. Edition 1.2. Geneva: IEC, 2001.

IEC. Safety of laser products – Part 14: A user's guide. IEC TR 60825-14:2004-02. First edition. Geneva: IEC, 2004.

IEC. Safety of laser products – Part 1: Equipment classification and requirements. IEC 60825-1: 2007-03. Second edition. Geneva: IEC, 2007.

ILO/IRPA/INIRC. The use of lasers in the workplace; A practical guide, International Labour Office (Occupational Safety and Health Series, No. 68). Geneva, 1993.

Sliney DH, Wolbarsht ML. Safety with lasers and other optical sources. A comprehensive handbook. Plenum Press, New York, 1980.

Sliney D, Aron-Rosa D, DeLori F, Fankhouser F, Landry R, Mainster M, Marshall J, Rasso B, Stuck B, Trokel S, West T, and Wolfe M. Adjustment of guidelines for exposure of the eye to optical radiation from ocular instruments: statement from a task group of the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Applied Optics, 44 (11): 2162–2176, 2005.