

Poistumisvalaistus ja turvallisuuskilvet

Kirjallisuuskatsaus tulevan asetuksen tueksi

Henry Weckman

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

Sisältö

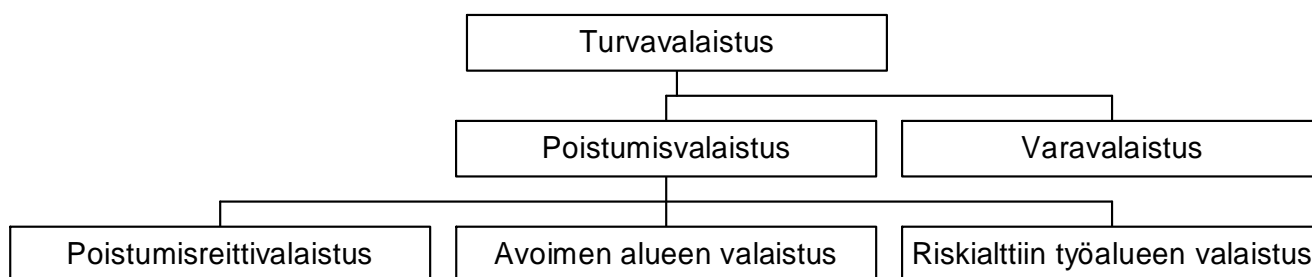
Terminologia	3
Näkyvyys ja liikkuminen savua sisältävässä tilassa	5
Poistumista edistävillä järjestelmillä tehtyjä vertailututkimuksia	5
Turvallisuuskilpien näkyvyyttä koskevia tutkimuksia	8
Kansainvälisen merenkulkujärjestön IMO:n määräyksiä LLL-merkinnöistä	9
Muita LLL-merkintöjä koskevia standardeja ja julkaisuja	10
PSPA Standard 002 Part 1	10
ISO/DIS 16069	10
Savun, palamiskaasujen ja lämmön vaikutusten arviointi ihmisten poistumismahdollisuuksiin	12
Savun muodostuminen ja savun vaikutukset	13
Myrkyllisten palamiskaasujen muodostuminen	14
Myrkyllisten kaasujen vaikutukset	16
Myrkyllisten kaasujen vaikutusten arviointi	17
Kuumuuden vaikutukset	19
Perusteluja standardin SFS-EN 1838 eri asiakohtiin	21
Kirjallisuutta	26

Poistumisvalaistus ja turvallisuuskilvet – Kirjallisuuskatsaus tulevan asetuksen tueksi

Tähän kirjoitukseen on koottu kirjallisuudesta poimittuja poistumisvalaistusta ja turvallisuuskilpiä koskevien tutkimusten tuloksia. Aluksi esitetään poistumisvalaistukseen liittyviä käsitteitä ja määritelmiä, jonka jälkeen käsitellään tutkimuksia, joissa on selvitetty näkyvyyttä ja henkilöiden liikkumista savua sisältävissä tiloissa. Kirjoitukseen sisältyy myös katsaus savun, palamiskaasujen ja lämmön vaikutuksesta ihmisten poistumismahdollisuuksiin. Lopuksi on esitetty kommentteja ja perusteluja standardin SFS-EN 1838, *Valaistussovellukset. Turvavalistus* [1999] eri asiakohtiin.

Terminologia

Selvytyden vuoksi toistetaan tässä standardissa SFS-EN 1838 [1999] käytettyjen termien määritelmät sekä eri valaistustyyppien hierarkia



Turvavalistus (emergency lighting): Normaalin valaistuksen virransyötön häiriintyessä käytettävä valaistus. [Aikaisemmin *varavalistus*.]

Poistumisreitti (escape route): Häätilanteessa poistumiseen tarkoitettu reitti.

Poistumisvalaistus (emergency escape lighting): Turvavalaisuksen osa, jonka tarkoituksena on varmistaa henkilöiden turvallisuus tilasta poistuttaessa tai turvata mahdollisesti vaaraa aiheuttavan prosessin lopettaminen ennen poistumista. [Aikaisemmin *poistumistievalaistus*.]

Poistumisreitivalaistus (escape route lighting): Poistumisvalaisuksen osa, jonka tarkoituksena on varmistaa, että tilassa olevat henkilöt voivat vaivatta tunnistaa poistumiskeinot ja käyttää niitä turvallisesti.

Avoimen alueen valaistus (open area lighting): (joissakin maissa paniikinehkäisyvalaistus): Poistumisvalaisuksen osa, jonka tarkoituksena on ehkäistä paniikkia ja varmistaa henkilöiden pääsy paikkaan, josta poistumisreitti voidaan havaita.

Riskialttiin työalueen valaistus (high risk task area lighting): Poistumisvalaisuksen osa, jonka tarkoituksena on varmistaa niiden henkilöiden turvallisuus, jotka ovat tekemisissä mahdollisesti vaarallisen prosessin tai tilanteen kanssa, ja se mahdollistaa toiminnan hallitun pysäyttämisen käyttäjän ja muiden tilassa olijoiden turvallisuutta vaarantamatta. [Aikaisemmin *turvavalistus*.]

Varavalistus (stand-by lighting): Turvavalaisuksen osa, jonka tarkoituksena on taata normaalin toiminnan jatkuminen oleellisesti muuttumattomana. [Aikaisemmin *toiminnan jatkamisvalaistus*.]

Uloskäytävä (emergency exit): Häätilanteessa poistumiseen käytettäväksi tarkoitettu uloskäynti.

Turvallisuuskilpi (safety sign): Kilpi, joka yhdessä väriin ja geometriseen muotoon perustuen viestii yleistä ja graafisella tekstisymbolilla täydennettynä erityistä turvallisuuteen liittyvää asiaa.

Ulkopuolisesti valaistu turvallisuuskilpi (*externally illuminated safety sign*): Kilpi, joka on valaistu sitä vaadittaessa merkin ulkopuolella olevalla valonlähteellä.

Sisäpuolisesti valaistu turvallisuuskilpi (*internally illuminated safety sign*): Kilpi, joka on valaistu sitä vaadittaessa merkin sisäpuolella olevalla valonlähteellä.

Huomattava osa paloalan turvavalaukustutkimuksista koskee näkyvyyden riippuvuutta savuntiheydestä, savun laadusta, valaistuksesta, kilpien koosta ym. Savuntiheys on hieman hankala käsite sen vuoksi, että kirjallisuudessa siitä esiintyy useita lähellä toisiaan olevia määritelmiä, jotka voivat helposti sekoittaa. Asiaa ei suinkaan helpota se, että aina eivät kirjoittajat edes ole ilmoittaneet minkä määritelmän mukaisesta savuntiheydestä kulloinkin on kysymys. Selvyyden vuoksi luetellaan tavallisimmat versiot tässä.

Kun valo kulkee savun läpi sen valovoima pienenee Beer-Lambertin lain mukaan:

$$I = I_0 e^{-kd}$$

missä I on savukerroksen läpi kulkeneen valonsäteen valovoima ja I_0 vastaavan savuttoman matkan kulkeneen valonsäteen valovoima. Savukerroksen paksuus on d . Savuntiheyttä kuvaava arvo, eli ns. vaimennuskertoimen (*extinction coefficient*) k on tämän mukaisesti siten:

$$k = \frac{1}{d} \ln \frac{I_0}{I}$$

Vaimennuskertoimen yksikkönä on m^{-1} .

Savuntiheys ilmoitetaan usein myös optisena tiheytenä (*optical density*) OD :

$$OD = \frac{1}{d} \log_{10} \frac{I_0}{I}$$

Optisen tiheyden OD yksikkönä on myös m^{-1} . Joissakin tapauksissa käytetään yksikkönä myös B/m (bel/m).

Kolmas tavallinen savuntiheyden määritelmä, jota myös kutsutaan optiseksi tiheydeksi on:

$$m = \frac{10}{d} \log_{10} \frac{I_0}{I}$$

Optisen tiheyden m yksikkönä käytetään yleisimmin dB/m. Tästä yksiköstä käytetään usein nimitystä *Ob* eli *obscura*.

Seuraavassa taulukossa on verrattu näitä savuntiheyksiä kokemusperäisesti todettuun näkyvyyteen, jonka mukaan savun optinen tiheys 1 dB/m vastaa noin 10 m näkyvyyttä.

k [m^{-1}]	OD [m^{-1}]	m [dB/m]	Vaimennus [%]	Näkyvyys [m]
0,23	0,1	1,0	20	10
1,0	0,43	4,3	57	2,3
2,3	1,0	10	90	1

Näkyvyys ja liikkuminen savua sisältävässä tilassa

Jin [1978, 1981, 1985] on klassisissa tutkimuksissaan havainnut, että näkyvyyden ja savuntiheyden (vaimennuskertoimen k) tulo on lähes vakio, riippuen mm. valaisevan kohteen tyypistä seuraavasti:

- valaiseva kohde (*light-emitting source*): $k \cdot V = 8$
- heijastava kohde (*reflecting light source*): $k \cdot V = 3$
- lattiat ja katot (yleinen näkyvyys): $k \cdot V = 2$

missä k on vaimennuskerroin [m^{-1}] ja V näkyvyys [m]. Havaintoa tukee myös edellä olevasta taulukosta laskettavissa oleva arvo (= 2,3), joka vastaa hyvin Jinin esittämää "yleistä näkyvyyttä" (= 2).

Jinin tutkimuksessa on myös selvitetty savua sisältävässä tilassa liikkuvien ihmisten kävelyvauhdin riippuvuutta näkyvyydestä ja savun laadusta (väri, ärsyttävyys, jne.). Näitä tuloksia on hyvin yleisesti käytetty uloskäytävien ja poistumisreittien toiminnallisessa mitoituksessa.

Frantzich ja Nilsson [2003] ovat äskettäin pyrkineet omissa tutkimuksissaan varmistamaan Jinin havainnot. Tutkimuksissa käytettiin selvästi sankempaa savua kuin Jinin kokeissa, joten tulosten täydellistä vastaavuutta ei voitu aikaansaada. Tulosten trendit olivat kuitenkin täysin samat.

Jin [2002] on edelleen esittänyt arvioita suurimmista savuntiheysarvoista, joissa poistuminen vielä on mahdollista (*maximum allowable smoke density*). Hänen arvionsa riippuvat siitä kuinka hyvin henkilöt tuntevat tilat, josta he poistuvat (V on näkyvyys):

- tunnettu tila: $k = 0,5 \text{ m}^{-1}$ ($m = 2,2 \text{ dB/m}$) $V = 4 \text{ m}$
- tuntematon tila: $k = 0,15 \text{ m}^{-1}$ ($m = 0,6 \text{ dB/m}$) $V = 13 \text{ m}$

Jensen [1993] arvioi, että vasta savuntiheyden olleessa pienempi kuin $m = 15 \text{ dB/m}$ ($k = 3,5 \text{ m}^{-1}$), mikä vastaa alle 1 m näkyvyyttä, ei poistuminen enää ole mahdollista (*survival limit*).

Poistumista edistävillä järjestelmillä tehtyjä vertailututkimuksia

Useat tutkijat ja tutkimusryhmät ovat tehneet poistumiskokeita, joissa on verrattu erilaisten valaistusolosuhteiden ja poistumista edistävien merkintöjen ja muiden järjestelmien vaikutusta poistumisen onnistumiseen. Seuraavassa esitetään yhteenvetohavainnot eräistä tällaisista tutkimuksista.

Proulx *et al.* [1999, 2000] ovat tehneet poistumisharjoituksen ennalta ilmoittamatta 13-kerroksisessa toimistorakennuksessa, jossa oli noin 150 henkilöä kussakin kerroksessa. Harjoitus rajoittui kolmeen kerrosta. Rakennuksessa oli neljä identtistä uloskäytävää (portaikkoa), jotka kaikki oli varustettu turvalaistuksella, jonka valaistusvoimakkuus oli 245 lx. Harjoitusta varten oli uloskäyntien valaistusta muutettu seuraavasti:

- Uloskäytävä A: Turvalaistuksen valaistusvoimakkuus alennettu arvoon 57 lx.
- Uloskäytävä B: Normaali turvalaistus 245 lx.
- Uloskäytävä C: Jälkivalaiseva materiaali ilman muuta valaistusta
- Uloskäytävä D: Jälkivalaiseva materiaali ja turvalaistus 74 lx valaistusvoimakkuudella.

Jälkivalaiseva materiaali oli asennettu *Photoluminescent Safety Products Associationin* standardin 002 Part 1 [1997] mukaisesti, jolloin portaikko oli ylhäältä alas asti varustettu kahdella 10 cm leveällä kais-

talla, joista toinen sijaitsi lattian tasossa ja toinen 1 m korkeudella lattiasta. Kukin porraskelma oli myös varustettu 2 cm + 10 cm leveillä kastoilla. Lisäksi uloskäytävään oli asennettu suuntanuolia. Normaali valaistus sammutettiin muutama minuutti ennen harjoituksen alkua.

Poistuvat runsaat 450 henkilöä jakaantuivat hieman epätasaisesti eri uloskäytävien välillä, mutta poistumisnopeudet eivät kuitenkaan poikenneet erityisen paljon toisistaan. Uloskäytävä C oli kuitenkin hitain, joskin siellä oli eniten poistuvia henkilöitä. Yhteenvetona tutkijat toteavat, että myös jälkivalaiseva materiaali esim. mainitun standardin mukaan asennettuna, on varteenotettava vaihtoehto turvavalaisuudesta suunniteltaessa.

Kaikissa jäljempänä selostetuissa tutkimuksissa henkilöt ovat poistuneet yksi kerrallaan.

Paulsen [1994] on tutkinut vuonna 1990 sattuneen *Scandinavian Star* -aluksen tulipaloa ja tehnyt siihen liittyen poistumiskokeita laboratorio-olosuhteissa. Kokeisiin osallistui 79 henkilöä, jotka liikkuivat laboratorioon rakennetussa aluksen olosuhteita jäljittelevässä 29 m pitkässä käytävässä. Kokeissa käytettiin savua siten, että näkyvyys oli noin 2,5 m. Tutkimusten kohteina olivat seuraavat turvavalaisuus- ja muut turvajärjestelyt:

- (1) Sisäpuolelta valaistuja turvallisuuskilpiä, keskimääräinen luminanssi 250 cd/m^2 . Kilvet (6 kpl) oli sijoitettu norjalaisten rakentamismääräysten mukaisesti.
- (2) Valkoisia ja vihreitä loisteputkia ($L = 80 \text{ cm}$), joiden luminanssit olivat 440 cd/m^2 ja 250 cd/m^2 . Putket oli asennettu 10 cm lattiapinnan yläpuolelle siten, että niiden väli oli enintään 3 m. Kulkusuunnan muutoskohdissa käytettiin vihreää valoa, muualla valkoista. Uloskäytävän oven yläpuolella oli sisäpuolelta valaistu turvallisuuskilpi.
- (3) Pykälän varustettuja kaiteita käytävän molemmin puolin ("*Safety Rail System*"). Kaiteen pykälät osoittivat poistumissuunnan. Uloskäytävän oven yläpuolella oli sisäpuolelta valaistu turvallisuuskilpi.
- (4) Jatkuva valaistus, joka muodostui pienistä muovikotelossa olevista hehkulamput, joiden luminanssi oli $5,5 \text{ cd/m}^2$. Hehkulamput oli asennettu lattian tasolle vierekkäin siten, että ne muodostivat näennäisesti jatkuvan valokuovan. Uloskäytävän oven yläpuolella oli sisäpuolelta valaistu turvallisuuskilpi.
- (5) Jälkivalaiseva materiaali, jonka luminanssi valaistuksen sammussa oli $0,3 \text{ cd/m}^2$. Kulkureitti oli varustettu kahdella kyseisestä materiaalista valmistetulla kaistalla, joista toinen sijaitsi kulkureitin keskiviivalla ja toinen 80 cm korkeudella käytävän toisella seinällä. Lisäksi jokainen porraskelma oli varustettu samalla materiaalilla. Uloskäytävän ovi oli varustettu jälkivalaisevasta materiaalista valmistetulla turvallisuuskilvellä.
- (6) Sisäpuolelta valaistujen turvallisuuskilpien ja pykälän varustettujen kaiteiden yhdistelmä.

Yhteenvetona todetaan, että tutkittujen järjestelmien tehokkuus riippuu savun tiheydestä, jossa poistuminen tapahtuu. Mikäli savu on hyvin tiheää ($OD > 1,5 \text{ m}^{-1}$) suositellaan pykälän varustettujen kaiteiden käyttöä. Erilaisia jatkuvia valaistusjärjestelmiä suositellaan, kun savuntiheys OD on $1,5\text{--}0,1 \text{ m}^{-1}$ ja perinteisiä turvallisuuskilpiä suositellaan vain, kun savuntiheys $OD < 0,1 \text{ m}^{-1}$.

Jensen [1998] on tehnyt vastaavanlaisia poistumistutkimuksia kuin Paulsen edellä. Hänellä oli käytössään 82 koehenkilöä ja 7 erilaista poistumista edistävää järjestelmää. Tutkimustensa perusteella hän jaa nämä järjestelmät, kahteen tai kolmeen luokkaan sen mukaan miten ne soveltuvat käytettäväksi savuntiheydeltään erilaisiin tiloihin.

Järjestelmän luokka	Savuntiheys OD (m^{-1})	Näkyvyys (m)		Järjestelmän tyyppi	Esimerkkejä tyypillisistä rakennuskohteista
		Sisäpuolinen valaistus	Ulkopuolinen valaistus		
I	$\geq 1,5$	$< 1,5$	$< 0,6$	Lovetut kaiteet, näkyvät kaiteet	Isot monimutkaiset julkiset rakennukset, isot teollisuusrakennukset, maanalaiset rakenteet, muut riskialttiit tilat ja rakenteet
II	0,1–1,5	1,5–25	0,6–10	Jatkuvat, matalalla sijaitsevat merkinnät	Julkiset rakennukset, toimistot, hotellit
Savuton tila	$< 0,1$	> 25	> 10	Erilliset valolähteet) perinteiset poistumisreitimerkinnot	Pienikokoiset, pienen riskin omaavat julkiset rakennukset Asunnot, työpaikat, koulut jne., jossa on tilat tuntevia henkilöitä

Jensen korostaa edelleen, että perinteiset erilliset valonlähteet eivät toimi tyydyttävästi savua sisältävässä ympäristössä. Eri maiden määräyksissä sallitaan niiden väliseksi etäisyyksiksi jopa 30 m, jolloin ne näkyvät vain, jos $OD < 0,1 m^{-1}$. Mikäli väli lyhennetään 7 m:ksi, ne toimivat vielä savuntiheyden ollessa $OD = 0,8-1 m^{-1}$.

Wright *et al.* [1998] ovat tehneet poistumiskokeita laboratoriotiloihin rakennetussa toimistoa jäljittelevässä tilassa. Kulkureittiin, jonka kokonaispituus oli 29 m sisältyi suoria käytäviä, käytävänmutkia ja portaita. Kokeisiin osallistui 18 henkilöä ja tutkittavia valaistusvaihtoehtoja oli 6 kpl.

Tutkitut valaistusvaihtoehdot olivat (1) yläpuolinen turvavalistus, jonka valaistusvoimakkuus kulkureitin keskiviivalla lattian tasossa oli 0,99–1,96 lx; (2) loisteputkilla toteutettu normaalivalaistus, 57,8–165 lx; (3) jälkivalaiseva materiaali, 24 mm leveä kaista asennettuna seinälle 1 m korkeudelle, varustettu suuntanuolilla, 0,50–0,62 lx; (4) LEDeillä tehty kaista, 35 mcd LEDejä 25 mm välein 200–240 korkeudella lattiatasosta 0,70–5,61 lx; (5) kuten edellinen, mutta lisäksi seinän viereen lattiaan asennettuja LEDejä 200 mm välein (140 mcd), 0,38–5,61 lx ja (6) pienillä 100 mcd hehkulampuilla 100 mm välein tehty kaista 180 mm lattiapinnan yläpuolella, 0,22–1,80 lx. Savuntiheys kulkureitissä oli 1,1–1,2 m^{-1} .

Tulokset osoittavat, että tavanomaisella yläpuolisella turvavalauksella poistumisvauhti oli pienempi, kuin muut turvavalauksenvaihtoehdot, vaikka niiden valaistusvoimakkuus lattian tasossa oli paljon pienempi. Suorassa käytävässä, jossa normaalivalauksuksen valaistusvoimakkuus lattian tasossa oli 116 lx oli alempi poistumisvauhti kuin turvavalauksjärjestelyillä, joiden valaistusvoimakkuus oli alle 1 lx. Molemmat LED-vaihtoehdot toimivat yhtä hyvin.

Frantzich ja Nilsson [2003] ovat tehneet poistumiskokeita savua täynnä olevassa tieliikennetunnelissa, jossa näkyvyys vaihteli välillä 0,5–2 m. Tunnelin yleisvalaistus oli toteutettu loisteputkin, joiden valaistusvoimakkuus uloskäytävien ovien kohdalla oli 2–21 lx, kun tunnelissa ei ollut savua. Valaistusvoimakkuus vaihteli välillä 0–8 lx vastaavissa kohdissa, kun tunnelissa oli savua. Uloskäytävien ovet oli merkitty sisäpuolelta valaistuilla turvakilvillä (38 cm × 13 cm). Ovien molemmin puolin oli lisäksi asennettu hehkulamput, jotka vilkkuivat taajuudella 1 s⁻¹. Näiden lisäksi tunnelissa oli kaksi erityyppistä jatkuvaa letkumaista valaisinta. Ovien edustat oli varustettu tunnelin poikki kulkevalla valkoisella lasikuitukangasmatolla. Kokeissa käytettiin eri yhdistelmiä edellä mainituista järjestelyistä. Parhaiten havaittiin vilkkuvien valoin ja turvallisuuskilvillä varustetut uloskäytävien ovet. Pelkästään vilkkuvalla valolla varustettua ovea ei käytetty poistumiseen yhtä usein. Kaikkein heikoimmin toimivat letkumaiset valaisimet.

Turvallisuuskilpien näkyvyyttä koskevia tutkimuksia

Nämä tutkimukset poikkeavat edellisestä siinä, että näissä tapauksissa henkilöt tarkkailevat turvallisuuskilpiä ja arvioivat niiden näkyvyyttä erilaisissa olosuhteissa. Edellisessä kohdassa henkilöt siirtyivät paikasta toiseen erilaisten turvallisuusjärjestelmien ohjaamina sekä arvioivat niiden toimintaa.

Ouellette [1988, 1993] on tutkimuksissaan todennut mm., että yleisvalaistus heikentää selvästi turvallisuuskilpien näkyvyyttä, esimerkkinä mainitaan jo 0,55 lx yleisvalaistuksen heikentävän kilpien näkyvyyttä. Ouellette suosittelee joko automaattista tai manuaalista järjestelmää, joka alentaisi yleisvalaistuksen valaistusvoimakkuutta, kun tilaan tulee savua. Yleisvalaistukseen kuuluvia valaisimia ei tulisi sijoittaa siten, että ne ovat kilpien ja katsojan välissä.

Ouellette on myös todennut, että hyvin kirkkaasti valaistut turvallisuuskilvet saattavat häiritsevästi häikäistä ihmisiä, kun tilassa ei ole savua. Tämän vuoksi on joidenkin maiden määräyksiin sisällytetty rajoituksia kilpien luminanssin maksimiarvon suhteen. Savua sisältävässä ympäristössä ei kuitenkaan esiinny häikäisyä ja tällöin ei ole syytä mitenkään rajoittaa luminanssin maksimiarvoja.

Webber *et al.* [2001] ovat tutkineet 20 henkilöllä kuuden erityyppisen turvallisuuskilven näkyvyyttä erilaisissa olosuhteissa. Kokeet tehtiin 13 m pitkässä käytävässä, jossa savun optinen tiheys oli 0,8–1,4 m⁻¹. Tutkimuksissa käytettiin kolmea eri valaistusolosuhdetta: täysin pimeä (lattiassa oli kuitenkin jälkivalaiseva kaista suunnistuksen helpottamiseksi), yläpuolinen turvavalistus, jonka valaistusvoimakkuus puhtaassa ilmassa lattian tasossa keskiviivan kohdalla oli 1–2 lx sekä normaali valaistus, jonka valaistusvoimakkuus vastaavasti oli 130–190 lx.

Tutkituista turvallisuuskilvistä yksi oli loisteputkella sisäpuolelta valaistu turvallisuuskilpi ja toinen jälkivalaisevasta materiaalista tehty kilpi. Molemmissa oli valkoinen kuvio vihreällä pohjalla. Kaksi muuta kilpeä oli tehty LEDeistä, joissa LEDit muodostivat kuvion. Näiden lisäksi tutkittiin kahta ovien merkittämiseen käytettyä materiaalikaistaa, joista toinen oli jälkivalaisevasta materiaalista ja toinen oli toteutettu LEDeillä. Sisäpuolelta valaistun kilven valkoisten osien luminanssi oli 1136 cd/m² ja vihreiden osien vastaavasti 29,3 cd/m². Jälkivalaisevan kilven vastaavat arvot olivat 45,2 cd/m² ja 2,4 cd/m². LEDeillä tehdyistä kilvistä toisessa kuvio koostui 140 mcd LEDeistä (111 kpl) ja toisessa 260 mcd LEDeistä (94 kpl). Ovikaistoista jälkivalaiseva materiaali koostui 1 m pituisesta ja 25 mm leveästä kaistasta, jonka luminanssi oli 22 cd/m², ja se sijaitsi oven sivulla sen keskikorkeudella. LEDeillä toteutettu ovimerkintä koostu 35 LEDistä, jotka oli asennettu 50 mm välein oven karmin ympäri.

Tuloksia tarkasteltiin varianssianalyysin avulla, jolloin todettiin mm.:

- Pimeässä ja turvavalaistuksella tehdyissä kokeissa saatiin kaikilla kilvillä samat tulokset, eli ei voitu osoittaa, että valaistusolosuhteet aiheuttaisivat tilastollisesti toisistaan poikkeavia tuloksia.
- Normaali valaistus heikensi tilastollisesti kaikkien kilpien näkyvyyttä 1–2 m.
- Sisäpuolelta valaistun kilven ja molempien LED-kilpien näkyvyydet eivät poikenneet tilastollisesti toisistaan. Jälkivalaisevasta materiaalista tehty kilpi näkyi heikommin. LEDeillä ja jälkivalaisevalla kaistalla merkittyjen ovien näkyvyydet eivät poikenneet tilastollisesti toisistaan.

Myös Collins *et al.* [1990] ovat tutkineet erityyppisten turvallisuuskilpien näkyvyyttä savua sisältävässä ympäristössä. Tulokset ovat samankaltaisia kuin edellä on esitetty, mm. kilven luminanssi on keskeinen tekijä arvioitaessa sen näkyvyyttä; yleisvalaistus heikentää turvallisuuskilpien näkyvyyttä; sisäpuolelta valaistut kilvet näkyvät yleensä paremmin kuin ulkopuolelta valaistut kilvet.

Heskestad ja Schmidt Pedersen [1998] ovat analysoineet uudelleen viiden aikaisemmin tehdyn evakuointitutkimuksen tuloksia ja pyrkineet määrittämään oikean kulkureitin valinnan todennäköisyydet käytettäessä eri tyyppisiä poistumisopasteita. Heidän mukaansa onnistumistodennäköisyys valaisimilla tai jälkivalaisevilla materiaaleilla toteutettu matalalla oleva opasteella on 0,7–0,9. Kylmäkatodivalaisimin toteutetun vastaavan opasteen todennäköisyys on yli 0,9 samoin kuin lovetuilla kaiteilla toteutettujen ratkaisujen todennäköisyydet. Onnistumistodennäköisyys saattaa jäädä varsin pieneksi monimutkaisissa kohteissa, joissa poistumisen aikana joudutaan tekemään useita reitinvalintoja.

Käsi- ja kirjotiedon [Mulholland 1995] mukaan kilven kontrastin C tulee olla vähintään -0.02 , jotta se olisi selvästi näkyvissä taustaansa vastaan (savuttomissa olosuhteissa):

$$C = \frac{B}{B_0} - 1$$

missä B on kilven ja B_0 taustan luminanssi.

Kansainvälisen merenkulkujärjestön IMO:n määräyksiä LLL-merkinnöistä

Vuonna 1993 on kansainvälinen merenkulkujärjestö IMO antanut päätöslauselman A.752 (18) [Anon 1993], jossa mm. edellytetään, että matkustaja-alusten kulkureitit on merkittävä jatkuvalla matalalla sijaitsevalla merkinnällä (normaalin turvavalaistuksen lisäksi). Merkinnän (LLL, *Low Location Lighting*) tulee sijaita joko laipion alareunassa enintään 300 mm korkeudella kannesta tai kannessa enintään 150 mm etäisyydellä laipiosta. Mikäli käytävän leveys on yli 2 m tulee käytävän molemmat reunat varustaa kyseisellä merkinnällä. Merkintä katkaistaan hytin ovien tai risteävien käytävien kohdalla. Umpikäytävissä on LLL-merkintään lisättävä kulkusuunta osoittava nuoli enintään 1 m välein. LLL-merkintä voidaan toteuttaa joko jälkivalaisevilla kaistoilla (luminanssi vähintään 15 mcd/m^2 10 min pimeyden jälkeen ja 2 mcd/m^2 60 min jälkeen) tai erilaisilla valaisimilla (luminanssi vaihtelee tyyppistä riippuen välillä $35 \text{ mcd/m}^2 - 10 \text{ cd/m}^2$). Luminanssiarvot on tarkistettava 5 vuoden välein.

IMO:n FSS-koodin [Anon 2001] kohdan 11.2.1 mukaan voidaan alusten LLL-merkinnät vaihtoehtoisesti toteuttaa myös noudattaen standardia ISO 15371 [2001]. Standardi on yksityiskohtaisempi ja sisältää enemmän ohjeita kuin IMO:n päätöslauselma A.752(18) [Haatainen 2004].

Muita LLL-merkintöjä koskevia standardeja ja julkaisuja

Edellä olevissa luvuissa on käsitelty poistumiskokeita, joissa mm. on käytetty jälkivalaisevilla materiaaleilla tai valaisimilla toteutettuja matalalla sijaitsevia poistumisreittien merkintöjä. Tällaisille merkintöille asetettuja vaatimuksia, niiden asentamista ja tarkastamista on käsitelty mm. järjestön *Photoluminescent Safety Products Association* (PSPA) standardissa PSPA Standard 002 Part 1 [1997] sekä standardeissa ISO/FDIS 16069 [2004] ja UL 1994 [2004].

PSPA Standard 002 Part 1

PSPA-järjestön standardi jakaa jälkivalaisevat materiaalit kolmeen luokkaan riippuen siitä kuinka nopeasti niiden luminanssi pienenee sen jälkeen, kun ympäristö pimenee.

Luokka	10 min	30 min	60 min	0,3 mcd/m ²
I	> 17,0 mcd/m ²	> 4,0 mcd/m ²	> 1,7 mcd/m ²	> 240 min
II	17,0–12,5 mcd/m ²	4,0–2,9 mcd/m ²	1,7–1,2 mcd/m ²	170–240 min
III	12–8,5 mcd/m ²	2,8–1,5 mcd/m ²	1,1–0,5 mcd/m ²	80–160 min

Tilat, joihin LLL-merkintöjä voidaan asentaa on jaettu kolmeen riskiryhmään. Riskiryhmään 1 kuuluvat tavanomaiset tilat, jotka ovat kunnolla valaistuja ja joihin tulee runsaasti luonnonvaloa ikkunoista ja kattoikkunoista. Riskiryhmän 2 tiloissa on myös kunnollinen valaistus, mutta niihin ei tule juurikaan luonnonvaloa. Riskiryhmän 3 tilat ovat heikommin valaistuja eikä niihin tule luonnonvaloa.

Riskiryhmän 1 tiloissa tehdään LLL-merkinnät joko luokan II tai I materiaaleista. Kaistat sijoitetaan joko lattiaan seinän viereen tai seinän pintaan enintään 400 mm korkeudelle lattiasta. Käytettäessä luokan II materiaalia tulee LLL-kaistan leveys käytävässä olla 40 mm käytävän leveyden ollessa enintään 1,5 m, 80 mm, kun leveys on 1,5–3,0 m ja 120 mm leveyden ollessa yli 3 m. Avoimissa tiloissa kulkureitti merkitään 40 mm leveillä kastoilla, jotka ovat enintään 2 m etäisyydellä toisistaan tai yhdellä 100 mm leveällä, keskellä ajateltua kulkureittiä sijaitsevalla kaistalla. Standardi sisältää myös yksityiskohtaisia ohjeita kuinka merkinnät sijoitetaan ovien, umpikäytävien ja portaiden kohdalla. Riskiryhmän 2 tiloissa em. kaistojen leveydet kasvatetaan vähintään 50 %. Riskiryhmän 3 tiloissa kaistoja kasvatetaan myös 50 %, mutta näissä tiloissa suositellaan käytettäväksi luokan I materiaaleja. Ryhmän 3 merkintöihin tulee myös lisätä poistumissuuntaa osoittavia suuntanuolia tai vastaavia enintään 5 m välein.

Asennuksille tulee tehdä perusteellinen tarkastus vuosittain standardissa kuvatun ohjelman mukaisesti. Lisäksi asennukset tarkastetaan ja huolletaan pintapuolisesti viikoittain.

ISO/DIS 16069

Standardiehdotus ISO/FDIS 16069 [2004] ei kirjoitushetkellä vielä ollut saatavilla. Alla oleva selostus perustuu sen vuoksi aikaisempaan ehdotukseen ISO/DIS 16069 [2002].

Tuleva kansainvälinen standardi koskee sekä turvallisuuskilpiä, että erilaisia poistumisreittien merkitsemiseen käytettyjä kaistamerkintöjä, joihin kuuluvat myös LLL-merkinnät. Standardi koskee sekä valaisimilla että jälkivalaisevilla materiaaleilla toteutettuja kilpiä ja merkintöjä. Seuraavassa käsitellään vain LLL-merkintöille asetettuja vaatimuksia ja suosituksia.

LLL-merkinnät voidaan toteuttaa käyttämällä

- pistemäisiä valolähteitä, joiden valaiseva pinta on enintään 100 mm² ja jotka on sijoitettu enintään 0,2 m etäisyydelle toisistaan; valolähteiden valovoiman tulee olla vähintään 30 mcd ja kirkkaasti valaistussa ympäristössä tai mikäli tilassa voi esiintyä savua, vähintään 100 mcd;
- erillisiä valaisimia, joiden valaiseva pinta on vähintään 50 mm × 100 mm ja joiden etäisyys toisistaan on enintään 4 m tai 2 m, mikäli tilassa voidaan olettaa olevan savua; valaisimien luminanssin tulee olla vähintään 20 cd/m², kirkkaassa ympäristössä kuitenkin vähintään 200 cd/m²; ja
- jälkivalaisevista materiaaleista tehtyjä jatkuvia kaistoja.

Standardiehdotuksen ISO/DIS 16069 tarkoittamien jälkivalaisevien materiaalien tulee täyttää seuraavat vähimmäisvaatimukset luminanssin suhteen sen jälkeen, kun valaistus on sammunut:

Aika valon sammumisesta [min]	Luminanssi [mcd/m ²]
10	20
60	2,8
340	0,3

Käytännön asennuksilta edellytetään, että luminanssi 10 min jälkeen valolähteen sammumisesta on vähintään 15 mcd/m² ja 60 min jälkeen vähintään 2 mcd/m².

LLL-kaistojen leveyden tulee yleensä olla vähintään 100 mm. Leveyttä voidaan kuitenkin pienentää, mikäli käytetään jälkivalaisevia materiaaleja, joiden luminanssi ylittää edellä olevassa taulukossa esitetyt raja-arvot. Luminanssin ja materiaalikaistan vähimmäisleveyden välillä on seuraava riippuvuus:

$$L' = L \left(\frac{100}{d'} \right)^2$$

missä L' on todellinen luminanssi, L on em. taulukon mukainen vähimmäisluminanssi ja d' on kaistan vähimmäisleveys kyseisellä jälkivalaisevalla materiaalilla.

LLL-merkinnät tulisi asentaa poistumisreitit molemmilla puolilla, joko lattian pintaan tai viereisellä seinällä enintään 0,4 m korkeudella lattian pinnasta. Mikäli poistumisreitit leveys on alle 2 m riittää vain toiselle puolelle sijoitettu merkintä. Portaiden ja poistumisreitissä olevien ovien merkitsemisestä on yksityiskohtaiset ohjeet.

Merkintöjen tarkastuksesta ja huollosta annetaan myös ohjeita. Valaisimilla toteutettujen merkintöjen osalta viitataan standardiin IEC 60364–5–56 [1980]. Jälkivalaisevat materiaalit tulee tarkastaa ja puhdistaa säännöllisesti. Tarkastuksessa tulee myös mitata kaistojen luminanssi, jota verrataan pimeässä säilytyksessä pidetyn vertailunäytteen luminanssiin.

Standardi sisältää laajan kuvallituksen, jossa esitetään turvallisuuskilpien ja muiden poistumisreittien sijoittamista erityyppisiin tiloihin.

Savun, palamiskaasujen ja lämmön vaikutusten arviointi ihmisten poistumismahdollisuuksiin

Poistumisen mitoitus perustuu yleisimmin rakentamismääräysten taulukoihin, joissa annetaan vaaditut uloskäytävien lukumäärät, leveydet ja kulkureittien enimmäispituudet. Nämä mitat riippuvat yleensä rakennuksessa olevien henkilöiden lukumäärästä, rakennuksen mitoista, käytetyistä rakennustarvikkeista sekä rakennuksen käyttötarkoituksesta. Menetelmä perustuu yleiseen, vuosikymmenien varrella kertyneeseen tietämykseen ja kokemukseen poistumisesta ja se johtaakin useimmissa tapauksissa täysin riittäviin ja turvalliseen poistumiseen.

Taulukkomenetelmien lisäksi on eräiden maiden rakentamissäädöksiin sisällytetty myös poistumisen analyttisiä mitoitusmenetelmiä. Näiden avulla on mahdollista suunnitella kuhunkin tilaan paremmin optimoituja kulkureittejä ja uloskäytäviä. Analyttisten menetelmien periaatteena on poistumiseen käytettävissä olevan ajan vertaaminen rakennuksen kustakin tilasta poistumiseen kuluvaan aikaan. Poistumiseen käytettävissä oleva aika voidaan määrittää palon kehittymistä kuvaavilla laskentamalleilla, jolloin tilassa vallitsevia olosuhteita – näkyvyyttä, lämpötilaa, lämpösäteilyä, myrkyllisten kaasujen pitoisuuksia jne. – verrataan vaaralliseksi tai haitalliseksi tunnettuihin arvoihin. Monien maiden säädöksissä luetellaan yksiselitteiset kriittisten olosuhteiden raja-arvot edellä mainittujen tekijöiden suhteen. Esimerkkinä tällaisista raja-arvoista voidaan mainita *Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL:n* julkaisemassa *Paloturvallisuussuunnitteluohjeessa* esitetyt kriittisten olosuhteiden raja-arvot henkilöturvallisuuden suhteen [Anon 2003].

Jensen [1998] esittää omassa tarkastelussaan seuraavat raja-arvot ihmisten "sietokyvyille" savukaasuja sisältävässä ympäristössä: Lämpötilaraja 150 °C, näkyvyys ilman erityisjärjestelyjä 5 m, hiilimonoksidiannos(kertymä) 30 000 ppm-min. Eri tekijöiden yhteisvaikutus, voi olla voimakkaampi kuin yksittäisten tekijöiden yhteenlaskettu vaikutus. Näkyvyyden aleneminen ja hiilimonoksidi ovat suurimmat vaaratekijät poistuttaessa savukaasuja sisältävän tilan kautta.

Jensen [1998] mainitsee edelleen, että savukaasuja sisältävän tilan kautta onnistuneesti poistuneet henkilöt ovat tilastojen perusteella liikkuneet savussa vain 9,1 m matkan. Ainoastaan 10 % liikkui vastaavassa tilanteessa yli 16 m. Tämä vastaa ajallisesti selvästi alle 1 min pituista altistusta savulle.

Seuraava lyhyt katsaus koskien savun, palamiskaasujen ja lämmön vaikutuksista poistumiseen perustuu VTT:n Rakentavaa Tietoa -julkaisusarjassa vuonna 1998 ilmestyneeseen kirjoitukseen, joka sisältää viitteet asianomaisiin lähdeoteisiin [Weckman 1998].

Kaikissa tulipaloissa muodostuu savua, erilaisia kaasumaisia palamistuotteita ja lämpöä. Ihmisen altistuessa palon ja siitä syntyvien kaasujen ja savun vaikutuksille voi niistä aiheutua sekä fysiologisia että psykologisia seurauksia, jotka merkittäväällä tavalla saattavat vaikuttaa ihmisten poistumisedellytyksiin.

Poistumisen onnistuminen riippuu suurelta osin siitä, kuinka henkilö on mieltänyt tilanteen, jossa hän kulloinkin on. Savun ja liekkien näkeminen, kuumuuden tunteminen, silmien ja ylempien hengityselinten ärsytys luovat yhdessä henkilölle käsityksen vallitsevasta tilanteesta, mikä edelleen vaikuttaa esimerkiksi poistumisreitintä valintaan vai ryhtyykö henkilö lainkaan poistumaan. Tässä mainittujen psykologisten tekijöiden vaikutusten arvioiminen on erittäin vaikeaa, eikä niitä yleensä pystytä mallintamaan kvantitatiivisesti.

Tulipalossa muodostuu lukuisia palamistuotteita, jotka myös vaikuttavat ihmisten poistumismahdollisuuksiin. Savusta johtuva näkyvyyden heikkeneminen vaikuttaa ihmisen kykyyn nähdä ja hahmottaa poistumisreitit. Tämä on myös voitu kokeellisesti osoittaa siten, että savun tiheyden lisääntyessä, ihmisten liikkumisnopeus alenee. Eri aistien ja ylempien hengityselinten ärsytys yleensä vielä pahentaa savun haittavaikutuksia, mikä edelleen alentaa liikkumisnopeutta, kykyä suoriutua fyysisiä ponnistuksia vaativista tehtävistä sekä kykyä hahmottaa poistumisreittejä. Tukahduttavat myrkylliset aineet vaikuttavat

keskushermostoon, mikä voi johtaa aistiharhoihin, sekavuuteen, fyysisten voimien heikkenemiseen, motoriikan häiriintymiseen, tajuttomuuteen ja ääritapauksissa kuolemaan. Kuumuus voi puolestaan aiheuttaa lämpöhalvauksen, hypertermiaa sekä palovammoja iholla tai hengitystiehyeissä. Yhteensä nämä tekijät voivat merkittävästi haitata tai jopa estää ihmisten poistumisen palokohteesta.

Savun muodostuminen ja savun vaikutukset

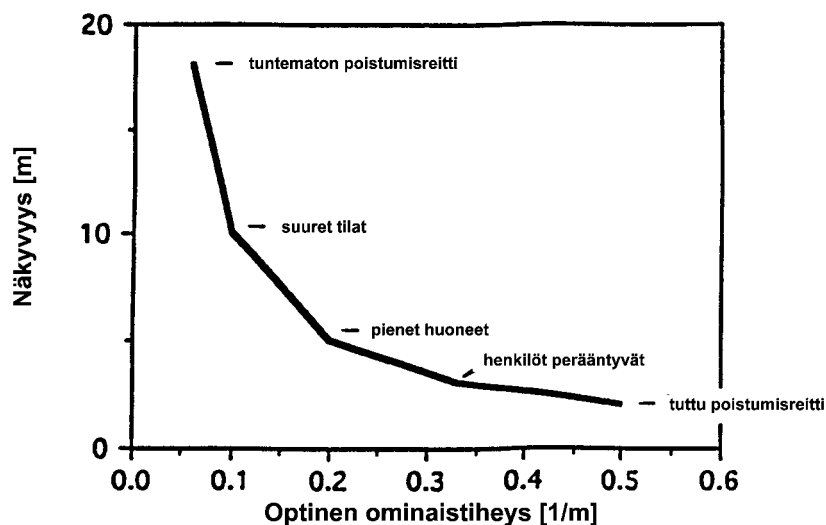
Tulipaloissa erilaisista palavista aineista, kuten esimerkiksi palavista rakenteista, eristeistä, pinnoitteista, asennuksista, sisusteista ja huonekaluista niiden palaessa kehittyvän savun määrä riippuu useista tekijöistä. Aineen *kemiallinen koostumus* on eräs tärkeä tekijä. Monet puhtaat aineet, kuten hiilimonoksidi, formaldehydi ja metanoli eivät kehitä lainkaan näkyvää savua jos ne palavat riittävässä ilmamäärässä. Toisista orgaanisista aineista kehittyä puolestaan runsaasti savua vastaavissa olosuhteissa. Happipitoiset orgaaniset nesteet, kuten esimerkiksi alkoholit kehittävät vähemmän savua kuin vastaavat puhtaat hiilivedyt. Tyydyttymättömien hiilivetyjen kehittämän savun määrä on suurempi kuin tyydyttyjen hiilivetyjen. Vastaava havainto pätee myös kiinteillä aineilla. Happipitoinen polttoaine, kuten puu kehittää palaessaan vähemmän savua kuin esimerkiksi hiilivety pohjainen polyeteeni. Aromaattisista yhdisteistä, esimerkiksi polystyreenistä, kehittyä erityisen runsaasti savua. Palosuoja-aineet kasvattavat usein tuotteista kehittyvän savun määrää verrattuna suojaamattomaan tuotteeseen. Toisaalta tuotteet palavat huommin, mikä osittain kompensoi lisääntyneen savun.

Myös *ympäristötekijöillä* on suuri vaikutus kehittyvän savun määrään. Kokeellisesti on voitu osoittaa, että esimerkiksi lämpösäteily, happipitoisuus, ilmanvaihto sekä palavan esineen geometria ja suunta vaikuttavat savunkehitykseen. Koska nämä tekijät riippuvat myös palon vaiheesta, on savun kehittyminen yleensä hyvinkin erilaista ennen lieskahdusta ja sen jälkeen. Savunkehittymistä arvioitaessa on lisäksi otettava huomioon palamisnopeus ja palavan alueen pinta-ala. Vaikka tuote kehittäisikin vain vähän savua pinta-alayksikköä kohti, saattaa savun määrä kuitenkin muodostua huomattavaksi palon levitessä laajan pinnan yli. Pienillä happipitoisuuksilla savun kehittyminen kasvaa usein merkittävästi.

Palamisprosessi vaikuttaa luonnollisesti myös savun kehittymiseen, koska savua muodostuu lähinnä epätäydellisen palamisen tuloksena. Kytevässä palamisessa vapautuu erilaisia haihtuvia aineita, jotka sekoittuessaan kylmän ilman kanssa tiivistyvät pallomaisiksi pisaroiksi, jotka näkyvät vaaleana savuaerosoloina. Liekehtivässä palamisessa kehittyä puolestaan mustaa, hyvin epäsäännöllisistä hiilipitoisista hiukkasista muodostuvaa savua. Savuhiukkaset muodostuvat kaasufaasissa alueissa, jossa happipitoisuus on riittävän pieni epätäydellistä palamista varten. Esimerkiksi selluloosapohjaisista aineista kehittyä kytevässä palossa selvästi enemmän savua kuin liekehtivässä palamisessa ja ilmanvaihdon rajoittaessa palamista kasvaa kehittyvän savun määrä merkittävästi. Ajan kuluessa savuhiukkasten koko kasvaa niiden törmätessä ja tarttuessa toisiinsa.

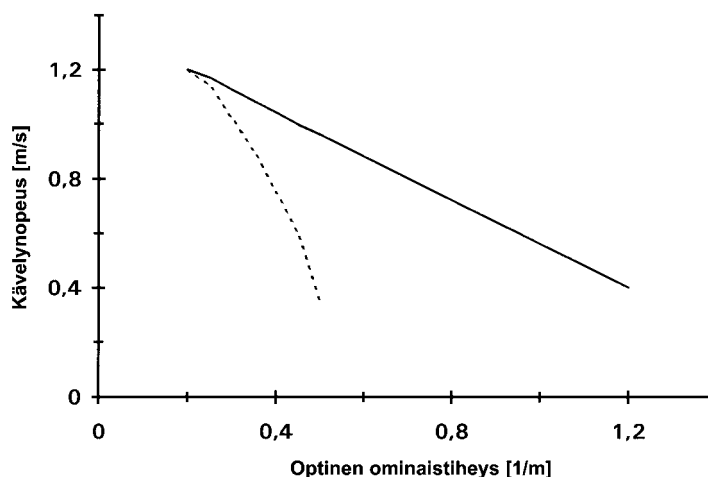
Savun aiheuttama näkyvyyden heikkeneminen johtuu valon absorptiosta savuhiukkasiin sekä valon siroamisesta hiukkasista. Käytännössä käytetään usein näkyvyyden mittana etäisyyttä, jolla tietty kohde ei enää ole näkyvissä. Tavallisimmat tekijät, joilla savuntiheyttä kuvataan ovat savun optinen ominaistiheys OD ja vaimennuskerroin k . Useimmat kirjallisuudessa ilmoitetut eri aineiden savunkehittymistä kuvaavat ominaisuudet on mitattu pienikokoisissa laboratoriotestilaitteissa. Valitettavasti ei näiden koetulosten ja todellisia tilanteita jäljittelevien täyden mittakaavan kokeiden tulosten välillä ole selkeää riippuvuutta.

Kokeellisesti on osoitettu, että savusta johtuva näkyvyyden heikkeneminen riippuu lähinnä vain savun pitoisuudesta, eikä esimerkiksi altistusajan pituudesta. Edelleen on havaittu, että näkyvyyden heikkeneminen on hyvin yksilöllistä. Poistumisen kannalta ovat kuitenkin tilan koko ja tilojen tunteminen monissa tapauksissa tärkeämpiä kuin pelkkä näkyvyysarvo. Kuvassa 1 on esitetty poistumisen kannalta näkyvyyden vähimmäisvaatimus sekä sitä vastaava optinen ominaistiheys tunnettavuudeltaan erilaisissa tiloissa.



Kuva 1. Näkyvyyden ja optisen ominaistiheyden välinen riippuvuus erityyppisissä poistumisreiteissä. Kriittinen savutiheys riippuu tilan koosta ja tunnettavuudesta.

Kuvassa 2 on esitetty ärsyttävän ja ei-ärsyttävän savun vaikutukset poistuvien henkilöiden kävelynopeuteen.



Kuva 2. Savutiheyden vaikutus henkilöiden poistumisnopeuteen (katkoviiva vastaa silmiä ärsyttävää savua ja yhtenäinen viiva savua, joka ei ärsytä silmiä).

Franzich [1994] mainitsee, että joistakin rakennustarvikkeista ja sisustusmateriaaleista palossa kehittyvän savun määrä (savupotentiaali) on pyritty selvittämään kokeellisilla tutkimuksilla. Kirjoittaja korostaa kuitenkin, että tätä alaa ei ole riittävästi tutkittu ja mittauksissa saadaankin usein toisistaan huomattavasti poikkeavia arvoja riippuen siitä kuinka mittaukset tehdään.

Myrkyllisten palamiskaasujen muodostuminen

Tulipaloissa syntyvien myrkyllisten kaasujen koostumus riippuu paitsi palavasta aineesta, myös palo-olosuhteista. Koska palaminen on luonteeltaan hapettumisprosessi, orgaaniset yhdisteet muuttuvat erilaisiksi hapettuneiksi yhdisteiksi riippuen ilmanvaihdosta tai hapensaannista. Orgaaniset yhdisteet hapettu-

vat aldehydeiksi, orgaanisiksi hapoiksi, hiilimonoksidiksi (CO) ja hiilidioksidiksi (CO₂). Palamiskaasujen hiilimonoksidi- ja hiilidioksidipitoisuuksien suhde, jota usein käytetään palon luonteen kuvaamiseen, riippuu enemmän ilmanvaihto-olosuhteista kuin palavien aineiden koostumuksesta.

Syaanivedyn (HCN) muodostuminen palossa riippuu palavasta materiaalista, koska sitä voi syntyä ainoastaan typpipitoisten aineiden palaessa. Tämän lisäksi, syaanivedyn muodostuminen riippuu palamislämpötilasta siten, että korkeammassa lämpötiloissa muodostuu enemmän syaanivetyä. Jos happea on riittävästi läsnä, voi myös muodostua pieniä määriä typen oksideja (NO_x).

Halogeenipitoisista eli fluori-, kloori- tai bromipitoisista muoveista kehittyä palaessa halogeenivetyhappoja (HF, HCl ja HBr). Nämä hapot muodostuvat palamisprosessin pyrolyysivaiheessa, eivätkä ne enää hapetu. Halogeenivetyjä muodostuu siten myös kytevässä paloissa.

Hiilimonoksidia (CO) eli hääkää muodostuu sekä kytevässä että liekehtivässä palossa. Sen muodostuminen kytevässä palossa on hyvin monimutkainen prosessi, eikä sitä kvantitatiivisesti vielä tunneta riittävästi hyvin. Hiilimonoksidin muodostuminen liekehtivässä palossa riippuu voimakkaasti hapen saannista. Hapensaantia voi rajoittaa joko tuloilman alentunut happipitoisuus tai alentunut tilavuusvirtaus. Hiilimonoksidin muodostumisen arvioimiseksi käytetään usein apuvälineenä palavan aineen ja ilman ekvivalenssisuhdetta ϕ :

$$\phi = \frac{(kg_{\text{palava_aine}} / kg_{\text{ilma}})}{(kg_{\text{palava_aine}} / kg_{\text{ilma}})_{\text{stök}}}$$

Tässä tarkoitetaan alaviitteellä "stök" ns. stökiometrinen suhde, jossa palavan aineen ja hapen välinen suhde on sellainen, että se riittää palavan aineen täydelliseen palamiseen ilman ylimääräistä happea. Siten, jos $\phi = 1$, vallitsee palavan aineen ja ilman välillä stökiometrinen suhde. Jos $\phi < 1$ tarkoittaa se, että palon ilmanvaihto on hyvä, kun taas, jos $\phi > 1$, palon ilmansaanti on rajoitettu. Jälkimmäiset olosuhteet edistävät hiilimonoksidin muodostumista.

Tutkimuksissa on todettu, että paloissa, joissa on runsas ilmanvaihto ($\phi \ll 1$) muodostuu hyvin vähän hiilimonoksidia. Määrät pysyvät pieninä, kunnes ϕ saavuttaa arvon noin 0,5. Tätä suuremmilla arvoilla muodostuvan hiilimonoksidin määrä kasvaa nopeasti ϕ :n kasvaessa ja vakiintuu useimmilla aineilla välille 0,1–0,2 kg_{CO}/kg_{palavaa_ainetta} ekvivalenssisuhteen ϕ ollessa hieman yli 1. Huonepalokokeissa on havaittu, että lieskahdus tapahtuu yleensä suunnilleen samoihin aikoihin, kun ϕ saavuttaa arvon 0,5, jota suuremmilla arvoilla hiilimonoksidin muodostuminen alkaa kasvaa merkittävästi. Lieskahduksen aikana hiilimonoksidin muodostuminen kasvaa huomattavasti myös koska se riippuu palamisnopeudesta, joka lieskahduksen tapahtuessa kasvaa olennaisesti. Havaittu hiilimonoksidin muodostumisen kasvaminen lieskahduksen tapahtuessa johtuu siten kahdesta syystä, palaminen muuttuu ilmanvaihtorajoitteiseksi ja palamisnopeus kasvaa merkittävästi.

Palamisen ekvivalenssisuhteen ϕ ollessa yli 1, hiilimonoksidin muodostuminen pysyy kohtalaisen vakaana, ja muodostumisnopeus riippuu siten lähinnä palamisnopeudesta. Hiilimonoksidin muodostumisnopeus voidaan arvioida seuraavalla yhtälöllä:

$$\dot{m}_{CO} = f_{CO} \dot{m}_{\text{palava-aine}}$$

missä f_{CO} on hiilimonoksidin muodostuminen, [kg_{CO}/kg_{palavaa_ainetta}]
 \dot{m}_{CO} on hiilimonoksidin muodostumisnopeus, [kg_{CO}/s]
 $\dot{m}_{\text{palava_aine}}$ on palavan aineen palamisnopeus, [kg_{palavaa_ainetta}/s]

Hiilimonoksidin muodostumisnopeus tilavuusyksikköinä on:

$$\dot{V}_{CO} = \dot{m}_{CO} / \rho$$

missä	\dot{V}_{CO}	on hiilimonoksidin muodostumisnopeus, [m ³ /s]
	\dot{m}_{CO}	on hiilimonoksidin muodostumisnopeus, [kg _{CO} /s]
	ρ	on hiilimonoksidin tiheys, 1,25 kg/m ³ (NTP)

Hiilidioksidi (CO₂). Paloissa, joissa on hyvä ilmanvaihto ($\phi \ll 1$), lähes kaikki palavan aineen sisältämä hiili hapettuu hiilidioksidiksi. Vaikkakin palaminen olisi ilmanvaihdon rajoittama, hiilestä hapettuu kuitenkin vielä 90–95 % hiilidioksidiksi, lopun ollessa hiilimonoksidia, nokea sekä palamatta jääneitä tuotteita.

Muodostuvan hiilidioksidin määrä voidaan laskea suoraan palamisen reaktioyhtälöstä kertomalla saatu maksimimäärä palamisen tehokkuusasteella (käytännössä 90–95 %). Mikäli palavan aineen kemiallinen bruttokaava on tunnettu on hiilidioksidin muodostuminen $f_{CO_2} = 44/(\text{aineen molekyylipaino})$. Hiilidioksidin muodostumisnopeus saadaan kertomalla f_{CO_2} palavan aineen palamisnopeudella $\dot{m}_{\text{palava_aine}}$ ja tilavuusyksiköissä ilmaistuna vastaavalla tavalla kuin edellä hiilimonoksidille.

Syaanivety (HCN). Palossa muodostuvan syaanivedyn maksimimäärä voidaan arvioida palavan aineen kemiallisen koostumuksen perusteella olettaen, että kaikki aineen sisältämä typpi muuttuu syaanivedyksi. Syaanivedyn määrä on siten $f_{HCN(max)} = 27/(\text{aineen molekyylipaino})$. Typen konversioastetta syaanivedyksi ei tunneta, eikä myöskään muodostumisen riippuvuutta muista palamista kuvaavista parametreista. Siten ainoastaan muodostumisen maksiminopeus on laskettavissa.

Halogeenivedyt (HF, HCl ja HBr). Näiden yhdisteiden palossa muodostuvat maksimimäärät voidaan arvioida vastaavalla tavalla kuin edellä. Halogeenien konversioasteet ovat todennäköisesti lähellä arvoa 1, joten määrät ovat laskettavissa suoraan palavan aineen kemiallisen koostumuksen perusteella vastaavalla tavalla kuin edellä. Lisäksi on huomattava, että halogeenivetyjen pitoisuus alenee yleensä varsin nopeasti niiden imeytyessä lähellä oleviin pintoihin tai liuetessa veteen. Käytännössä ei maksimimääriä siten yleensä tavata palojen yhteydessä.

Myrkyllisten kaasujen vaikutukset

Tulipaloissa vapautuvista myrkyllisistä aineista osa on tukahduttavia ja osa ärsyttäviä aineita. Tukahduttavat aineet aiheuttavat ihmiskehossa hapenpuutetta, joka vaikuttaa keskushermostoon, josta voi seurata tajuttomuutta ja ääritapauksissa kuolema. Näiden aineiden vaikutusten vakavuusaste riippuu ihmisen saamasta annoksesta, eli vaikutus riippuu sekä kaasun pitoisuudesta että altistusajasta. Vaikutukset tulevat vakavammiksi annoksen kasvaessa. Paloissa syntyvistä kaasumaisista tukahduttavista myrkyllisistä aineista on eniten tutkittu hiilimonoksidia ja syaanivetyä.

Hiilimonoksidin tukahduttava vaikutus perustuu sen kykyyn sitoutua veren hemoglobiiniin arvioilta 250 kertaa tehokkaammin kuin happi, jonka seurauksena se nopeasti syrjäyttää hapen verestä. Syaanivetyä pidetään puolestaan 25 kertaa myrkyllisempänä kuin hiilimonoksidi. Syaanivedyn vaikutus perustuu siihen, että vesiliukoinen syanidi-ioni leviää nopeasti kehon kaikkiin soluihin, jossa se reagoi erään hapensiirrosta keskeisen entsyymin kanssa. Lyhytaikainen altistus korkeille syaanivetypitoisuuksille on, toisin kuin hiilimonoksidilla, selvästi vaarallisempaa kuin pitkäaikainen altistus alemmille pitoisuuksille.

Toisin kuin välittömästi vaikuttavilla tukahduttavilla myrkyillä, ärsyttävillä kaasumaisilla palamistuotteilla on paljon monimutkaisemmat vaikutusmekanismit. Ärsyttävien kaasujen pitoisuuksien vaikutusten kvantitatiivinen arviointi ihmisten poistumismahdollisuuksien kannalta on usein vaikeaa. Useimmat ärsyttävät kaasumaiset aineet aiheuttavat aisteissa, ylemmissä hengityselimissä ja keuhkoissa havaittavia oireita

Aistien ja ylempien hengityselinten ärsytysvaikutukset näyttävät riippuvan lähinnä vain kaasun pitoisuudesta ja ne voivat vaihdella hyvin lievistä haitasta ankaraan kipuun. Tällaisia vaikutuksia ovat esimerkiksi kyynelehtiminen, refleksinomainen silmien räpyttely, kipu nenässä, kurkussa ja rinnassa, hengityksen pidättäminen, yskiminen, limaeritys ja kouristukset hengitystiehyeissä. Altistuksen vaikutusten ennustaminen on vaikeaa, koska ihmisillä tehtyjä kontrolloituja kokeita on hyvin vähän. Pääosa ihmisiä koskevista havainnoista on saatu teollisuudessa sattuneista onnettomuuksista, joissa kuitenkin monissa tapauksissa ei ole tarkkoja tietoja pitoisuuksista. Eläinkokeita on sitä vastoin tehty runsaasti, mutta on epävarmaa missä määrin näitä tietoja voi hyödyntää arvioitaessa niiden vaikutuksia ihmisten poistumisedellytyksiin. Eläimillä tehdyt kokeet ja yksi ihmisillä tehty koe viittaavat siihen, että aistien ja ylempien hengityselinten ärsytykset eivät juurikaan haittaisi poistumista. Altistuksen alkaessa erilaisia ongelmia esiintyy mutta näyttää siltä, että ihmisten tottuessa savuun, heidän toimintakykynsä taas paranee.

Riittävän suurina pitoisuuksina voivat useimmat ärsyttävät kaasut tunkeutua syvemmälle keuhkoihin, jossa ne voivat aikaansaada erilaisia reaktioita. Nämä vaikutukset riippuvat saadusta annoksesta eli niihin vaikuttavat sekä kaasupitoisuus että altistusaika. Reaktioilla ei yleensä ole välitöntä vaikutusta turvalliseen poistumiseen, mutta niistä saattaa aiheutua erilaisia jälkiseurauksia, jotka voivat ilmetä vasta muutaman tunnin tai päivän kuluttua altistuksen päättymisestä. Pahimmissa tapauksissa voi syntyä kuolemaan johtava keuhkopöhö. Eläinkokeissa on todettu, että limakalvot poistavat suuren osan vesiliukoisista ärsyttävistä aineista. Limakalvoilla on kuitenkin tietty maksimikapasiteetti, jota suuremmilla määrillä ne eivät enää kykene poistamaan tällaisia aineita.

Suurin osa kokeellisesta toksikologisesta aineistosta on saatu terveillä eläimillä tehdyissä tutkimuksissa. Ihmisten keskuudessa on kuitenkin ryhmiä, jotka saattavat olla herkempiä myrkkyyvaikutuksille kuin muut. Tällaisia ryhmiä ovat mm. lapset ja vanhuksat sekä astmaattiset henkilöt, joita arvioidaan olevan 15 % lapsista ja 5 % aikuisväestöstä. Lapset ovat herkempiä sen vuoksi, että heidän hengitystilavuutensa suhteessa painoon on suurempi kuin aikuisilla. Vanhemmat henkilöt ja erityisesti ne, joilla on verenkiertohäiriöitä, ovat myös erityisen herkkiä myrkyllisille kaasuille. Tällaiset henkilöryhmät on myös otettava huomioon suunniteltaessa turvallisia poistumisteitä. Turvallisina pidettävien altistusrajojen tulee siten olla selvästi alempia, kuin terveillä eläimillä tehdyissä laboratorioskokeissa todetut rajat.

Myrkyllisten kaasujen vaikutusten arviointi

Kaasumaisten palamistuotteiden myrkkyyvaikutusten arvioimiseksi on käytössä useita malleja, joista tässä käsitellään lähemmin ns. myrkyllisten kaasujen mallia (*Toxic Gas Model*).

Myrkyllisten kaasujen mallissa tarkastellaan erikseen tukahduttavien ja ärsyttävien kaasujen vaikutukset. Tukahduttavien kaasujen aiheuttaman vaaran arvioimiseksi on selvitettävä jokaisen myrkyllisen kaasun aiheuttaman altistuksen annos, eli määritettävä kyseisen kaasun pitoisuus-aika-käyrän alle jäävä altistusajan pituinen pinta-ala (pitoisuuskäyrän aikaintegraali). Kullekin tukahduttavalle kaasulle määritetään vaikuttava annossuhde (FED-arvo, *Fractional Effective Dose*) tarkasteluajankohtana. Kaikkien tukahduttavien kaasujen samana ajankohtana yhteenlaskettuja FED-arvoja verrataan annettuun kokonais-FED-raja-arvoon. Jos yhteenlaskettu FED-arvo on suurempi kuin FED-raja-arvo, ei kaasuille altistuneiden henkilöiden poistumista voida enää pitää turvallisena.

Ärsyttävien kaasujen aiheuttaman vaaran arvioimiseksi riittää, että selvitetään jokaisen kaasun pitoisuus. Vastaavalla tavalla kuin edellä, määritetään kullekin ärsyttävälle kaasulle vaikuttava pitoisuussuhde (FEC-arvo, *Fractional Effective Concentration*) tarkasteluajankohtana. Kaikkien ärsyttävien kaasujen vastaavana ajankohtana yhteenlaskettuja hetkellisiä FEC-arvoja verrataan annettuun kokonais-FEC-raja-arvoon. Jos yhteenlaskettu FEC-arvo on suurempi kuin FEC-raja-arvo, katsotaan kaasujen voivan merkittävästi vaikuttaa altistuneiden henkilöiden turvalliseen poistumiseen.

Asettaessa kriteerejä henkilöturvallisuuden ja henkilöiden poistumisedellytysten suhteen on otettava huomioon että eri ihmisten reaktiot tietylle kertyneelle FED-arvolle ja hetkelliselle FEC-arvolle ovat tilastollisesti jakautuneita. FED- ja FEC-arvojen raja-arvot valitaan siten, että kaasujen vaikutus ihmisten poistumisedellytyksiin on hyväksyttävän pieni.

Ihmisten reaktioiden tilastollisen jakautuman frekvenssikäyrän maksimi on määritelmän mukaan kohdassa, missä kokonais-FED- tai FEC-arvo saavuttaa arvon 1,0. Kokonais-FED- tai FEC-arvon ollessa 1,0 katsotaan, että palamiskaasuilla on poistumista vakavasti haittaavia vaikutuksia 50 %:lle altistuneille henkilöille.

Perinteinen tapa asettaessa turvallisia raja-arvoja kemiallisille aineille on pienentää kokeellisesti todettuja altistusannoksia tai pitoisuusarvoja siten, että ne paremmin ottaisivat huomioon ihmisten reaktioihin liittyvät tilastolliset vaihtelut. Toksikologiassa tämä on yleensä tehty kertomalla kokeellisesti määritetyt raja-arvot kahdesti luvun 10 kerrannaisilla. Näistä ensimmäisellä pyritään ottamaan huomioon virheet, jotka syntyvät ekstrapoloitaessa mittaustulokset eläimistä ihmisiin ja toisella otetaan puolestaan huomioon ihmispopulaation heterogeenisuus. Palamistuotteiden välittömien myrkyllisyysvaikutusten ja lyhytaikaisen altistuksen vuoksi, ja koska kriteerejä asettaessa käytetään sekä ihmis- että eläindataa, on perusteltua jättää ensimmäinen tekijä huomioon ottamatta. Pienillä laboratoriokoe-eläimillä on myös suurempi hengitystiheys kuin ihmisillä, joten sitä kautta saadaan myös pieni lisävarmuustekijä. Ihmispopulaatioiden vaihteluiden osalta on rajoitetuissa farmakokineettisissä kokeissa todettu, että populaatiotekijän 10-kertainen muutos vastaa 7–9 standardipoikkeamaa reaktioiden tilastollisessa jakautumassa normaalilla aikuisväestöllä. Tämä ottaa käytännössä huomioon kaikkein herkimmätkin henkilöryhmät.

FED- ja FEC-raja-arvoina käytetään yleensä arvoa 0,1, jolloin lähes kaikki palamiskaasuille altistetut henkilöt, mukaan lukien herkempiin aliryhmiin kuuluvat henkilöt, voivat poistua turvallisesti.

Myrkyllisten kaasujen malli – Tukahduttaville kaasuille käytetyn FED-mallin periaate selviää yksinkertaisimmassa muodossaan seuraavasta yhtälöstä:

$$FED = \sum_{i=1}^n \int_{t_1}^{t_2} \frac{C_i}{(Ct)_i} dt$$

missä	FED	on FED-arvo
	C_i	on kaasun "i" pitoisuus
	$(Ct)_i$	on kaasulle "i" ominainen lamaantumista aiheuttava altistus
	t	on aika

Kullekin tukahduttavalle kaasuille määritetään tarkasteluajankohtaa vastaava FED-arvo. Kaikkien kaasujen yhteenlaskettua arvoa verrataan annettuun kokonais-FED-raja-arvoon, jossa myös otetaan huomioon herkäät alaryhmät. Jos yhteenlaskettu FED-arvo ylittää raja-arvon (yleensä 0,1), ei kyseisistä tiloista ole mahdollista poistua turvallisesti.

Seuraavassa esitetään edellinen yhtälö laajennetussa muodossa:

$$FED = \int_{t_1}^{t_2} \frac{[CO]}{35000} dt + \int_{t_1}^{t_2} \frac{\exp([HCN]/43)}{220} dt$$

Yhtälössä käytetyt hiilimonoksidin ja syaanivedyn (Ct)-arvot on saatu eri apinalajeilla tehdyissä kokeissa. Syaanivedyn (Ct)-arvo on vakio vain rajoitetulla pitoisuusalueella. Laskelmissa ei yleensä tarvitse ottaa huomioon happipitoisuuden pienenemistä, ellei se alene pienemmäksi kuin 13 %. Yhtälö pätee vain lyhytaikaisissa altistuksissa, joissa ei esiinny suuria fyysisiä ponnistuksia edellyttävää toimintaa.

Jos hiilidioksidipitoisuus nousee suuremmaksi kuin 2 %, on edellä laskettu tukahduttavien kaasujen kokonais-FEC-arvo kerrottava empiirisellä tekijällä V_{CO_2} , joka ottaa huomioon kiihtyvää hengityksestä (eli hyperventilaatiosta) johtuvan kasvavan altistuksen:

$$V_{CO_2} = \exp\left[\frac{[\% CO_2]}{4}\right]$$

Aisteja, ylempiä hengityselimiä ja keuhkoja *ärsyttävien palamiskaasujen* ärsyttävä vaikutus arvioidaan vastaavasti FEC-arvojen avulla. Kokonais-FEC-arvoa verrataan asetettuun raja-arvoon (yleensä 0,1) ja mikäli se ylittyy, osoittaa se että olosuhteet todennäköisesti haittaavat tai estävät herkimpien poistuvien henkilöiden turvallisen poistumisen. Kokonais-FEC-arvo lasketaan seuraavalla yhtälöllä, jossa pitoisuusyksikkönä on [ppm]:

$$FEC = \frac{[HCl]}{1000} + \frac{[HBr]}{1000} + \frac{[HF]}{500} + \frac{[SO_2]}{150} + \frac{[NO_2]}{250} + \frac{[akroleiini]}{30} + \frac{[CH_2O]}{250} + \sum \frac{[\text{ärsyttävä_aine}]_i}{[raja\text{pitoisuus}]_i}$$

Paloissa muodostuu useita muitakin ärsyttäviä kaasuja kuin mitä yhtälöön sisältyy, esimerkiksi isosyanaatteja, aldehydejä, alkoholeja, ketoneja, nitrilejä jne. Puutteellisten analyttisten menetelmien ja aineiden riittämättömien myrkyllisyystietojen vuoksi niitä ei kuitenkaan ole voitu sisällyttää yhtälöön.

Kuten edellä esitettiin, lasketaan *FEC*-arvo erikseen kaikille ärsyttävälle kaasukomponentille tarkasteluajankohtana. Yhteenlaskettua *FEC*-arvoa verrataan kokonais-FEC-raja-arvoon, joka on yleensä 0,1. Jos yhteenlaskettu arvo ylittää raja-arvon, muodostavat kaasut huomattavan vaaran, joka vaikuttaa epäsuotuisasti henkilöiden turvalliseen poistumiseen.

Kuumuuden vaikutukset

Tulipalossa syntyvä kuumuus voi aiheuttaa altistuneille henkilöille terveydellisiä haittoja kolmella eri tavalla. Liiallisesta kuumuudesta voi seurata lämpöhalvaus (hypertermia) sekä ihon tai hengitystiehyeiden eriaisteisia palovammoja. Hengitystiehyeihin ei yleensä synny palovammoja hengitettäessä kuumaa ilmaa, jonka kosteuspitoisuus on pienempi kuin 10 %. Toisaalta, hengitystiehyeihin saattaa muodostua vammoja jo 60 °C lämpötilassa, jos ilman kosteuspitoisuus on 100 %. Tällainen tilanne voi syntyä helposti käytettäessä vettä tulipalon sammuttamiseen.

Säteilylämpö. Ihmisten ihon sietorajana lämpösäteilyä vastaan pidetään arvoa 2,5 kW/m². Tätä pienempiä arvoja paljas iho sietää useita minuutteja, mutta suurempia arvoja vain joitakin sekunteja. Ihmisen ihon sieto-aika lämpösäteilyn intensiteeteille voidaan arvioida seuraavalla yhtälöllä:

$$t_{rad} = \frac{80}{q^{1,33}}$$

missä t_{rad} on lamaanumiseen kuluva aika [min]
 q on lämpösäteilyn intensiteetti [kW/m²]

Konvektiolämpö. Kokeellisissa tutkimuksissa on todettu, että suojaamaton iho sietää kuivassa ilmassa noin 120 °C lämpötiloja. Tätä korkeammat lämpötilat aiheuttavat ankaraa kipua sekä palovammoja muutamassa minuutissa. Hypertermia voi kuitenkin syntyä tätä alemmissa lämpötiloissa riippuen altistuksen pituudesta. Aika, joka kuluu ihmisen lamaanumiseen konvektion kautta kuivasta ilmasta (alle 10 % kosteutta) siirtyvästä lämmöstä lasketaan seuraavan yhtälön avulla:

$$t_{I_{conv}} = 180 \exp(-T / 36)$$

missä $t_{I_{conv}}$ on lamaanumiseen kuluva aika [min]
 q on ilman lämpötila [°C]

Lämpöaltistus. Vastaavalla tavalla kuin edellä tukahduttavien myrkyllisten kaasujen osalta, voidaan myös lämpöaltistusta tarkastella "annoksena", jonka vakavuuden arvioimiseksi voidaan käyttää *FED*-mallin muunnosta. Lämpöaltistuksen liittyvä *FED*-arvo lasketaan seuraavalla yhtälöllä, joka pätee palolämpötilan ollessa suhteellisen vakaa tai lämpötilan noustessa:

$$FED = \int_{t_1}^{t_2} \left[\frac{1}{t_{I_{rad}}} + \frac{1}{t_{I_{conv}}} \right] dt$$

Perusteluja standardin SFS-EN 1838 eri asiakohtiin

Alla olevat kommentit ja perustelut on esittänyt VTT Tuotteet ja tuotannon erikoistutkija Veikko Ahponen, joka aikanaan on osallistunut EN 1838 -standardia laatineen CEN-komitean työhön. Yleiskommenttina Ahponen toteaa, että tehdyt valinnat perustuvat a) kompromisseihin eri maiden kansallisten vaatimusten välillä; b) laitteiden asettamiin teknisiin rajoituksiin; sekä c) silmän fysiologiaan. Monissa tapauksissa standardiin sisältyvät vaatimukset ovat varsin lieviä ja ne voisivat Ahposen mielestä olla hieman tiukempia.

Seuraavassa on esitetty ensin standardin vaatimukset 10 pisteen Arial-kirjasinlajilla ja sen jälkeen kyseiseen kohtaan liittyvät kommentit ja muita perusteluja 12 pisteen Times New Roman -kirjasinlajilla.

4 Poistumisvalaistus

4.1 Yleistä

Poistumisvalaistus vaaditaan, jotta varmistetaan näkyvyys kun tilaa tyhjennetään turvallisuussyistä. Valaisimet suositellaan asennettavaksi vähintään 2 m korkeudelle lattiasta. Jokaisen hätäpoistumiseen tarkoitetun uloskäytävän kohdalla ja pitkin kulkureittejä on oltava valaistut poistumisopasteet, jotka osoittavat selvästi poistumisreitin turvalliseen paikkaan.

Valaisimien vähimmäisasennuskorkeus 2 m perustuu kompromissiratkaisuun eri maiden kansallisten vaatimusten välillä. Valaisimet on katsottu tarkoituksenmukaisesti asentaa korkealle kolhiintumisvaaran vuoksi.

Ellei uloskäytävän opaste ole suoraan näkyvässä, on käytettävä valaistua suuntanuolta (tai useita suuntanuolia) osoittamaan etenemissuunnan uloskäytävälle.

Standardin EN 60598-2-22 mukainen valaisin on sijoitettava jokaisen uloskäytävän oven läheisyyteen sekä mahdollisten vaarallisten paikkojen tai turvavälineiden kohdalle antamaan sopiva tarvittava valaistusvoimakkuus.

Seuraavat paikat kuuluvat korostettavien joukkoon:

- a) jokainen hätäpoistumiseen tarkoitettu uloskäytävän ovi,
- b) portaiden lähialue (ks. huomautus) niin, että jokainen porrastasanne saa suoraa valoa,
- c) lähialue (ks. huomautus) jokaisessa muussa korkeustason muutoskohdassa,
- d) pakolliset uloskäytävät ja turvallisuuskilvet,
- e) kulkusuunnan jokainen muutospaikka,
- f) käytävien jokainen risteys,
- g) jokaisen lopullisen uloskäynnin lähistö ja uloskäynti,
- h) jokaisen ensiapupisteen lähialue (ks. huomautus),
- i) jokaisen palosammutuskaluston sijoituspaikan ja palohälytyspisteen lähialue (ks. huomautus).

Kohteet on valittu käytännön kokemuksen perusteella. Tarkoitus on korostaa poistumisen ja pelastamisen kannalta tärkeitä kohteita sekä kohteita, joissa kulkureiteissä tapahtuu muutoksia ja joissa on mahdollisuus kulkea harhaan.

Kohdissa h) tai i) mainituissa paikoissa, mikäli ne eivät ole poistumisreitillä tai "avointa aluetta", on valaistusvoimakkuuden lattialla oltava vähintään 5 lx.

HUOM. Tässä kohdassa "lähialue" tarkoittaa normaalisti 2 m sisällä vaakasuunnassa.

4.2 Poistumisreittivalaistus

4.2.1 Enintään 2 m leveillä poistumisreiteillä vaakasuoran valaistusvoimakkuuden lattian tasossa poistumistien keskilinjalla on oltava vähintään 1 lx, ja keskivyöhykkeellä, jonka leveys on vähintään puolet poistumisreitien leveydestä, valaistusvoimakkuuden on oltava vähintään 50 % keskilinjalla kohdalla olevasta valaistusvoimakkuudesta.

HUOM. 1 Yli 2 m leveitä poistumisreittejä voidaan käsitellä 2 m levyisinä kaistoina tai ne voidaan valaista avoimen alueen paniikinehkäisyvalaistusvaatimuksen mukaisesti.

HUOM. 2 Liitteessä B on esitetty maat, joissa valaistustasot poikkeavat tässä esitetystä.

Valaistusvoimakkuuden vähimmäisvaatimus 1 lx perustuu kompromissiratkaisuun eri maiden kansallisten vaatimusten välillä. (Arvo 1 lx vastaa suunnilleen täydenkuun valaistusvoimakkuutta.)

Kävelyvauhti pienenee merkittävästi, kun valaistusvoimakkuus lattian tasossa on pienempi kuin 1 lx [Webber & Hallman 1988]. Poistumisaika ei merkittävästi kasva, kun valaistusvoimakkuus on 5 lx. Jos poistuvien henkilöiden joukossa on runsaasti iäkkäämpää väkeä, tulisi valaistusvoimakkuuden olla vähintään 4 lx [Paulsen 1991, Jaschinski 1982].

4.2.2 Poistumisreitien keskilinjalla suurimman valaistusvoimakkuuden suhde pienimpään valaistusvoimakkuuteen ei saa olla suurempi kuin 40:1.

Valaistusvoimakkuuden tasaisuutta koskeva vaatimus johtuu silmän toiminnasta (silmän sopeutumisen hitaus).

4.2.3 Estohäikäisy on pidettävä pienenä rajoittamalla valaisimien valovoimaa näkökentässä.

Vaakatasossa olevilla poistumisreiteillä valaisimien valovoima ei saa ylittää taulukossa 1 esitettyjä arvoja pystysuorasta alhaalta päin lukien 60...90 kulmassa (kuva 2).

Kaikilla muilla poistumisreiteillä ja alueilla raja-arvot eivät saa ylittyä missään kulmassa (kuva 3).

Estohäikäisyä koskeva vaatimus johtuu silmän toiminnasta (häikäisy heikentää näkyvyyttä). Valitut kulmat perustuvat käytännön kokemuksiin.

HUOM. Valaisimen ja sen taustan välinen suuri kontrasti voi aiheuttaa häikäisyä. Poistumisreittivalaistuksessa pääongelma on estohäikäisy, jossa valaisimien suuri luminanssi voi häiritä ja estää esteiden ja merkkien näkymisen.

4.2.4 Turvallisuusvärien tunnistamisen takia valaisimessa käytetyn lampun yleisen värintoistoindeksin R_a on oltava vähintään 40. Valaisimen rakenne ei saa merkittävästi pienentää sitä.

Värintoistovaatimus 40 perustuu käytännön kokemukseen. (Arvo 100 vastaa tilannetta, jossa kaikki värit toistuvat oikein. Kaikki valaisimet, lukuun ottamatta korkeapainenaatriumvalaisimia ja joitakin teollisuuden käyttämiä erikoisvalaisimia, täyttävät värintoistovaatimuksen 40.)

4.2.5 Hätäpoistumiseen tarkoitetun poistumisvalaistuksen on toimittava vähintään 1 h ajan.

Poistumisvalaistuksen vähimmäistoiminta-aika 1 h perustuu kompromissiratkaisuun eri maiden kansallisten vaatimusten välillä. (Suomessa vaatimus on aikaisemmin ollut 30 min, useimmissa muissa maissa on vaatimuksena ollut 1–3 h. Toiminta-aikaa rajoittaa akuston toiminta.)

4.2.6 Poistumisreittivalaistuksen on saavutettava 50 % vaaditusta valaistusvoimakkuudesta 5 s sisällä ja täysi valaistusvoimakkuus 60 s sisällä.

Nämä vaatimukset johtuvat valaisimien teknisistä ominaisuuksista, joihin päästään nykytekniikalla. (Esim. loistevalaisimet saavuttavat täyden valaistusvoimakkuuden vasta lämmettyään. Mikäli energialähteenä käytetään aggregaattia, ei nämä vaatimukset mahdollisesti edes täyty.)

Kohtien 4.2.1...4.2.4 ja 4.2.6 vaatimusten täytyminen voidaan tarkistaa mittaamalla tai laitetoimittajan antamista luotettavista tiedoista.

4.3 Avoimen alueen valaistus

4.3.1 Vaakasuoran valaistusvoimakkuuden lattialla on oltava vähintään 0,5 lx koko tilassa lukuunottamatta 0,5 m levyistä tilan reunavyöhykettä.

Valaistusvoimakkuuden vähimmäisvaatimus 0,5 lx perustuu kompromissiratkaisuun eri maiden kansallisten vaatimusten välillä.

4.3.2 Suurimman valaistusvoimakkuuden suhde pienimpään valaistusvoimakkuuteen ei saa olla suurempi kuin 40:1.

Valaistusvoimakkuuden tasaisuutta koskeva vaatimus johtuu silmän toiminnasta (silmän sopeutumisen hitaus).

4.3.3 Estohäikäisy on pidettävä pienenä rajoittamalla valaisimien valovoimaa näkökentässä. Valaisimien valovoima ei saa ylittää taulukossa 1 esitettyjä arvoja pystysuorasta alhaalta päin lukien 60° ... 90° kulmassa (kuva 2).

Estohäikäisyä koskeva vaatimus johtuu silmän toiminnasta (häikäisy heikentää näkyvyyttä). Valitut kulmat perustuvat käytännön kokemuksiin.

4.3.4 Turvallisuusvärien tunnistamisen takia valaisimessa käytetyn lampun yleisen värinointoindexin R_a on oltava vähintään 40. Valaisimen rakenne ei saa merkittävästi pienentää sitä.

Värinointovaatimus 40 perustuu käytännön kokemukseen.

4.3.5 Hätäpoistumiseen tarkoitetun avoimen alueen valaistuksen on toimittava vähintään 1 h ajan.

Poistumisvalaistuksen vähimmäistoiminta-aika 1 h perustuu kompromissiratkaisuun eri maiden kansallisten vaatimusten välillä.

4.3.6 Avoimen alueen paniikinestovalaistuksen on saavutettava 50 % vaaditusta valaistusvoimakkuudesta 5 s sisällä ja täysi valaistusvoimakkuus 60 s sisällä. Kohtien 4.3.1...4.3.4 ja 4.3.6 vaatimusten täytyminen (mukaisuus) voidaan tarkistaa mittaamalla tai laitetoimittajan antamista luotettavista (auktorisoiduista) tiedoista.

Nämä vaatimukset johtuvat valaisimien teknisistä ominaisuuksista, joihin päästään nykytekniikalla.

4.4 Riskialttiin työalueen valaistus

4.4.1 Riskialtteilla työalueilla valaistusvoimakkuuden referenssisitasolla on oltava vähintään 10 % työhön vaadittavasta valaistusvoimakkuudesta, kuitenkin vähintään 15 lx. Haitallista stroboskoopiefektiä ei saa esiintyä.

Valaistusvoimakkuuden vähimmäisvaatimukset perustuvat kompromissiratkaisuun eri maiden kansallisten vaatimusten välillä.

4.4.2 Valaistusvoimakkuuden tasaisuuden riskialtiilla työalueella on oltava vähintään 0,1.

Valaistusvoimakkuuden tasaisuutta koskeva vaatimus johtuu silmän toiminnasta (silmän sopeutumisen hitaus).

4.4.3 Estohäikäisy on pidettävä pienenä rajoittamalla valaisimien valovoimaa näkökentässä. Valaisimien valovoima ei saa ylittää taulukossa 1 esitettyjä arvoja pystysuorasta alhaalta päin lukien 60...90° kulmassa (kuva 2).

Estohäikäisyä koskeva vaatimus johtuu silmän toiminnasta (häikäisy heikentää näkyvyyttä). Valitut kulmat perustuvat käytännön kokemuksiin.

4.4.4 Turvallisuusvärien tunnistamisen takia valaisimessa käytetyn lampun yleisen värintoistoindeksin R_a on oltava vähintään 40. Valaisimen rakenne ei saa merkittävästi pienentää sitä.

Värintoistovaatimus 40 perustuu käytännön kokemukseen.

4.4.5 Riskialttiin alueen valaistuksen on toimittava vähintään niin kauan kuin vaaraa on ihmisille.

4.4.6 Normaali-valaistuksen häiriytyessä riskialttiin alueen valaistuksen on annettava täysi valaistusvoimakkuus keskeytyksettä tai 0,5 s sisällä sovelluksesta riippuen.

Nämä vaatimukset johtuvat valaisimien teknisistä ominaisuuksista, joihin päästään nykytekniikalla.

Kohtien 4.4.1...4.4.4 ja 4.4.6 vaatimusten täyttyminen voidaan tarkistaa mittaamalla tai laitetoimittajan antamista luotettavista tiedoista.

4.5 Varavalaistus

Jos varavalaistusta käytetään poistumisvalaistustarkoitukseen, sen on täytettävä tämän standardin asiaan kuuluvat vaatimukset.

Jos varavalaistus on tasoltaan alhaisempi kuin työhön vaadittava pienin valaistusvoimakkuus, valaistusta on käytettävä vain prosessien alasajoon tai lopettamiseen.

5 Turvallisuuskilvet

Hätäpoistumis- ja ensiapuhjekilpien on täytettävä seuraavat vaatimukset:

HUOM. Poistumisopasteiden kuvatunnusten on oltava työssä käytettäviä turvallisuus- ja/tai terveystervekkeitä koskevista vähimmäisvaatimuksista 24 päivänä kesäkuuta 1992 annetun neuvoston direktiivin 92/58/ETY mukaisia. (Fi Huom.: ks. myös liite ZX kohta ZX2.)

5.1 Turvallisuuskilpien on saavutettava 50 % vaaditusta luminanssista 5 s sisällä ja täysi luminanssi 60 s sisällä.

Nämä vaatimukset johtuvat edellä mainituista valaisimien teknisistä ominaisuuksista, joihin päästään nykytekniikalla.

5.2 Värien on oltava standardin ISO 3864 Safety colours and safety signs mukaisia.

5.3 Turvallisuuskilpien luminanssin on turvallisuusvärillä merkityssä kohdassa oltava vähintään 2 cd/m² kaikissa kyseeseen tulevissa katselukulmissa (ks. liite A).

Luminanssia koskeva vähimmäisvaatimus johtuu silmän toiminnasta (häikäisy heikentää näkyvyyttä). (Arvo 2 cd/m^2 vastaa suunnilleen hyvin valaistua kadun pintaa.)

Collins *et al.* [1990] esittävät, että savua sisältävässä ympäristössä kilpien luminanssin tulisi olla ainakin 10 cd/m^2 . Lyhyillä etäisyyksillä riittää myös $2\text{--}5 \text{ cd/m}^2$, erityisesti matalalla olevilla kilvillä. Sisäpuolelta valaistu kilpi näkyy paremmin kuin ulkopuolelta valaistut kilvet, vaikka niiden luminanssi olisi sama.

5.4 Suurimman ja pienimmän luminanssin suhde joko valkoisella tai turvallisuusvärillä merkityllä alueella ei saa olla suurempi kuin 10:1.

HUOM. Suurta vaihtelua viereisten pisteiden välillä olisi vältettävä.

Tämä on lähinnä laatuvaatimus.

5.5 Valkoisella merkityn alueen luminanssin $L_{\text{valkoinen}}$ suhde turvallisuusvärillä merkityn alueen luminanssiin $L_{\text{väri}}$ ei saa olla pienempi kuin 5:1 ja suurempi kuin 15:1 (ks. liite A).

Luminanssisuhdetta koskeva vaatimus johtuu silmän toiminnasta (kontrastivaatimus).

5.6 Koska sisäpuolelta valaistu kilpi näkyy etäämmältä kuin samankokoinen ulkopuolelta valaistu kilpi, määritetään suurin katseluetäisyys (ks. kuva 4) seuraavan yhtälön avulla:

$$d = s \times p \quad (1)$$

jossa

d on katseluetäisyys,

s on kilven kuvion korkeus ja

p on vakio, jonka arvo on 100 ulkopuolelta valaistuilla kilvillä ja 200 sisäpuolelta valaistuilla kilvillä.

Katseluetäisyyden ja kuvion korkeuden välinen riippuvuus perustuu kokeellisiin havaintoihin.

Kirjallisuutta

Anon. 1993. Guidelines for evaluation, testing and application of low-location lighting on passenger ships. London, GB: International Maritime Organization. (Resolution A.752 (18))

Anon. 2001. International Code for Fire Safety Systems (FSS Code). London, GB: International Maritime Organization. (Resolution MSC.98 (73))

Anon. 2003. Paloturvallisuussuunnittelu – Oletettuun palonkehitykseen perustuva suunnittelu ja ratkaisuesimerkit. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL. 138 s. (RIL 221–2003)

Collins, B. L., Dahir, M. S. & Madrzykowski, D. 1990. Evaluation of exit signs in clear and smoke conditions. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology. 71 s. (Report NISTIR 4399)

Frantzich, H. 1994. En modell för dimensionering av förbindelser för utrymning utifrån funktionsbaserade krav. Lund, SE: Brandteknik, Lunds tekniska högskola. 75 s. (Rapport 1011)

Frantzich, H. & Nilsson, D. 2003. Utrymning genom tät rök: Beteende och förflyttning. Lund, SE: Brandteknik, Lunds tekniska högskola. 83 s. (Rapport 3126)

Haatainen, Pertti. VS: Viela LLL-asiasta [sähköpostiviesti]. Vastaanottaja Henry Weckman. Lähetetty 1.3.2004. [viitattu 13.4.2004].

Heskestad, A. W. & Schmidt Pedersen, K. 1998. Escape through smoke: Assessment of human behaviour and performance of wayguidance systems. Teoksessa: Shields, J. (toim.). Proceedings of the First International Symposium on Human Behaviour in Fire, Belfast, Northern Ireland, GB: 31 August – 2 September 1998. S. 631–638.

IEC 60364–5–56. 1980. Electrical installations of buildings – Part 5: Selection and erection of electrical equipment – Chapter 56: Safety services. Genève, CH: International Electrotechnical Commission.

ISO 15370. 2001. Ships and marine technology – Low-location lighting on passenger ships – Arrangement. Genève, CH: International Organization for Standardization. 17 s.

ISO/DIS 16069. 2002. Graphical symbols – Safety signs – Safety way guidance systems (SWGS). Genève, CH: International Organization for Standardization. 51 s.

ISO/FDIS 16069. 2004. Graphical symbols – Safety signs – Safety way guidance systems (SWGS). Genève, CH: International Organization for Standardization.

Jaschinski, W. 1982. Conditions of emergency lighting. *Ergonomics*, Vol. 25, s. 363–372.

Jensen, G. 1993. Evacuating in smoke. Trondheim, NO: IGP A/S. 41 s.

Jensen, G. 1998. Wayfinding in heavy smoke: Decisive factors and safety products – Findings related to full scale tests. *Fire Safety '98, Fire Protection in Nuclear Installations*. Mumbai, IN, April 1998. 10 s.

Jin, T. 1978. Visibility through fire smoke. *Journal of Fire and Flammability*, Vol. 9, s. 135–155.

Jin, T. 1981. Studies of emotional instability in smoke from fires. *Journal of Fire and Flammability*, Vol. 12, s. 130–142.

Jin, T. & Yamada, T. 1985. Irritating effects of fire smoke on visibility. *Fire Science and Technology*, Vol. 5, No. 1, s. 79–90.

- Jin, T. 2002. Visibility and human behavior in fire smoke. Teoksessa: DiNenno, P. J. *et al.* (eds.). SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 3rd Ed. Quincy, MA: National Fire Protection Association. S. 2-42–2-53.
- Mulholland, G. W. 1995. Smoke production and properties. Teoksessa: DiNenno, P. J. *et al.* (eds.). SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 2nd Ed. Quincy, MA: National Fire Protection Association. S. 2-217–2-227.
- Ouellette, M. J. 1988. Exit signs in smoke: Design parameters for greater visibility. *Lighting Research & Technology*, Vol. 20, No. 4, s. 139–153.
- Ouellette, M. J. 1993. Visibility of exit signs. *Progressive Architect*, July 1993, s. 39–42.
- Paulsen, T. 1991. Menneskelig atferd i brann: En litteraturstudie. Trondheim, NO: SINTEF. (Rapport A91034).
- Paulsen, T. 1994. The effect of escape route information on mobility and way finding under smoke logged conditions. Teoksessa: Kashiwagi, T. (toim.). *Fire Safety Science – Proceedings of the Fourth International Symposium on Fire Safety Science*, Ottawa, ON, CA. Gaithersburg, MD: International Association for Fire Safety Science. S. 693–704.
- Proulx, G., Tiller, D. K., Kyle, B. & Creak, J. 1999. Assessment of photoluminescent material during office evacuation. Ottawa, ON: National Research Council of Canada. 38 s. + liitt. 6 s. (Report IRC–IR–774)
- Proulx, G., Kyle, B. & Creak, J. 2000. Effectiveness of a photoluminescent wayguidance system. *Fire Technology*, Vol. 36, s. 236–248.
- PSPA Standard 002 Part 1. 1997. Emergency wayfinding guidance systems. Photoluminescent Standards Association. [Viitattu 24.2.2004].
 Saatavissa: <http://www.pspa.org.uk/standard/standard1/index.html> .
- SFS–EN 1838. 1999. Valaistusovellukset. Turvavalistus. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto. 20 s.
- UL 1994. 2004. Standard for low level path marking and lighting systems. Underwriters Laboratories.
- Webber, G. & Hallman P. 1988. Movement under various escape route lighting conditions. Teoksessa: Sime, J. (toim.). *Safety in the built environment*. London, GB: E. & F. N. Spon.
- Webber, G.M.B., Cook, G. K. & Wright, M. S. 2001. Visibility of four exit signs and two exit door markings in smoke as gauged by twenty people. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Human Behaviour in Fire*, Cambridge, Boston, MA, 26–28 March 2001. S. 147–158.
- Weckman, H. 1998. Palamistuotteiden vaikutusten arviointi paloturvallisuussuunnittelussa. Espoo: VTT Rakennustekniikka. 8 s. (Rakentavaa Tietoa 22/10.98)
- Wright, M. S., Cook, G. K. & Webber, G.M.B. 1998. The effects of smoke on people’s walking speeds using overhead lighting and wayguidance provision. *Proceedings of the CIBSE National Lighting Conference*, Lancaster, GB. S. 367-370.