

# SISÄTILAN VALAISTUKSEN SIMULOINTI VIZ-OHJELMALLA

Case: Aidon sisätilan 3d-malli

LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU  
Mediatekniikan koulutusohjelma  
Tekninen visualisointi  
Opinnäytetyö  
14.5.2007  
Ari Kuningas

Lahden ammattikorkeakoulu  
Mediatekniikan koulutusohjelma

KUNINGAS, ARI: Sisätilan valaistuksen simulointi VIZ-ohjelmalla  
Case: Aidon sisätilan 3d-malli

Teknisen visualisoinnin opinnäytetyö, 65 sivua, 13 liitesivua

Kevät 2007

## TIIVISTELMÄ

---

Tämä opinnäytetyö käsittelee valaistussimulaation tekemistä Autodesk® VIZ 2007 -ohjelman avulla. VIZ on 3d-mallinnusohjelma, jossa geometrian, pintamateriaalien ja valonlähteiden ominaisuudet voidaan määritellä fysikaalisilla arvoilla. Näiden fysikaalisten arvojen perusteella VIZ-ohjelman radiositeetilaskenta simuloi epäsuoraa valaistusta.

Työn yhteydessä tutkittiin aidon valon ominaisuuksia ja käyttäytymistä eri tilanteissa. Tutkittuja aidon valon ominaisuuksia verrattiin VIZ-ohjelman fotometristen valojen ominaisuuksiin. Aidon valon käyttäytymistä aineiden rajapinnoissa verrattiin VIZ-ohjelman arkkitehtuuri-materiaalien tapaan heijastaa ja taittaa valoa. Radiositeetilaskennan ominaisuuksia tutkimalla selvitettiin VIZ-ohjelman keinoja epäsuoran valaistuksen laskemiseen.

Tutkittujen ominaisuuksien vertailussa selvisi, että VIZ-ohjelman fotometristen valojen ja arkkitehtuuri-materiaalien valaistussimulaatioon vaikuttavat ominaisuudet perustuivat oikeisiin fysikaalisiin arvoihin. Radiositeetilaskennan paikansapitävyyttä selvitettiin kokeellisesti case-osiossa.

Case-osiossa aitoa valaistusta ja VIZ-ohjelmalla simuloitua valaistusta vertailtiin kokeellisesti. Koetta varten mallinnettiin erittäin tarkka 3d-malli aidosta huoneesta. Mallissa käytettiin arkkitehtuuri-materiaaleja ja fotometrisiä valoja, joiden ominaisuudet säädettiin aidon huoneen vastaavien ominaisuuksien mukaan. Valaistussimulaatio tehtiin radiositeetilaskennan avulla. Laskennan jälkeen 3d-mallin valaistusvoimakkuus mitattiin eri kohdista lighting analysis -työkalun avulla. Aidossa huoneessa tehtiin samat mittaukset luksimittarin avulla. Tämän lisäksi aitoa huonetta ja sen 3d-mallia vertailtiin keskenään visuaalisesti valokuvien ja renderöintien perusteella.

Simulaatiolla laskettujen ja aidosta tilasta mitattujen valaistusvoimakkuuksien välillä oli vaihtelevan suuruisia eroja riippuen siitä mitä valaisimia käytettiin. Erojen perusteella voitiin päätellä, että arkkitehtuuri-materiaalien ominaisuudet oli todennäköisesti määritelty väärin. Luotettavampaan valaistussimulaation testaamiseen olisi tarvittu spektrofotometriä, jonka avulla pintojen heijastus- ja läpäisy-suhteet olisi voitu mitata tarkemmin.

Avainsanat: 3d-mallinnus, radiositeetilaskenta, valaistus, VIZ

Lahti University of Applied Sciences  
Faculty of Technology

KUNINGAS, ARI: Interior lighting simulation with Autodesk VIZ  
Case: 3D model of a real interior space

Bachelor's Thesis in Visualization Engineering, 65 pages, 13 appendices

Spring 2007

## ABSTRACT

---

This thesis deals with lighting simulation using Autodesk® VIZ 2007 software. VIZ is a 3D modeling software in which the properties of geometry, materials and lights can be determined using real physical values. These physical values are used in the radiosity calculations of VIZ to simulate indirect lighting.

The properties and behavior of real light in various situations were examined. These real light properties were compared with the properties of the photometric lights of the VIZ software. The behavior of real light on the boundary surface of materials was compared with the way the architectural materials of VIZ reflect and refract light. VIZ software's ways of calculating indirect lighting were examined by studying the properties of radiosity.

The comparisons showed that the properties used for the lighting simulation for both the photometric lights and the architectural materials of the VIZ software were based on real physical values. The accuracy of the radiosity solution was tested in the case part of the thesis.

In the case part, real lighting and simulated lighting were compared experimentally. A highly detailed 3D model of a real room was constructed for the experiment. The model was built using architectural materials and photometric lights whose properties were set up using the corresponding properties of the real room. The lighting simulation was done with radiosity. After the simulation the illuminance of the 3D model was measured from various positions using the lighting analysis tool. The same positions were measured in the real room using a lux meter. In addition, the real room and its 3D model were compared visually based on their photographs and renderings.

Simulated and real illumination values differed from each other depending on what lamps were used in the lighting. Based on the differences, it seems that the properties of the architectural materials had been set up incorrectly. A more reliable lighting simulation test would require the use of a spectrophotometer, which measures the reflectance and transmittance values of the surfaces more accurately.

Key words: 3D modelling, lighting, radiosity, VIZ

## SISÄLLYS

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | <b>JOHDANTO</b> .....                    | 1  |
| 2     | <b>AIDON VALON OMINAISUUDET</b> .....    | 2  |
| 2.1   | <b>Valo-oppi</b> .....                   | 2  |
| 2.2   | <b>Geometrinen optiikka</b> .....        | 2  |
| 2.2.1 | <b>Aksioomat</b> .....                   | 2  |
| 2.2.2 | <b>Valon suoraviivainen kulku</b> .....  | 3  |
| 2.2.3 | <b>Heijastumlaki</b> .....               | 4  |
| 2.2.4 | <b>Taittumislaki</b> .....               | 5  |
| 2.3   | <b>Valon vaimentuminen ja väri</b> ..... | 7  |
| 2.4   | <b>Fotometria</b> .....                  | 8  |
| 2.4.1 | <b>Määritelmä</b> .....                  | 8  |
| 2.4.2 | <b>Valaistussuureet</b> .....            | 9  |
| 2.4.3 | <b>Valovoima</b> .....                   | 10 |
| 2.4.4 | <b>Valovirta</b> .....                   | 10 |
| 2.4.5 | <b>Valaistusvoimakkuus</b> .....         | 11 |
| 2.4.6 | <b>Valoeksistanssi</b> .....             | 13 |
| 2.4.7 | <b>Luminanssi</b> .....                  | 13 |
| 3     | <b>VALAISTUKSEN SIMULOINTI</b> .....     | 15 |
| 3.1   | <b>Autodesk VIZ -ohjelma</b> .....       | 15 |
| 3.2   | <b>Fotometriset valot</b> .....          | 15 |
| 3.2.1 | <b>Lähtökohdat</b> .....                 | 15 |
| 3.2.2 | <b>Valonlähteiden tyypit</b> .....       | 16 |
| 3.2.3 | <b>Valon levitys</b> .....               | 17 |
| 3.2.4 | <b>Valon väri ja kirkkaus</b> .....      | 20 |
| 3.2.5 | <b>Varjojen asetukset</b> .....          | 22 |
| 3.3   | <b>Arkkitehtuuri-materiaalit</b> .....   | 25 |
| 3.3.1 | <b>Heijastus- ja läpäisysuhde</b> .....  | 25 |
| 3.3.2 | <b>Mallipohjat</b> .....                 | 26 |
| 3.3.3 | <b>Fysikaaliset ominaisuudet</b> .....   | 27 |
| 3.3.4 | <b>Erikoistehosteet</b> .....            | 31 |
| 3.3.5 | <b>Materiaali valonlähteenä</b> .....    | 32 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.4   | <b>Radiositeetilaskenta</b> .....                  | 33 |
| 3.4.1 | <b>Toimintaperiaate</b> .....                      | 33 |
| 3.4.2 | <b>Radiositeettiverkon jakaminen</b> .....         | 34 |
| 3.4.3 | <b>Laskentaprosessi</b> .....                      | 39 |
| 3.4.4 | <b>Renderöinti</b> .....                           | 41 |
| 3.5   | <b>Valaistuksen analysointi ja muokkaus</b> .....  | 43 |
| 3.5.1 | <b>Lighting analysis -työkalu</b> .....            | 43 |
| 3.5.2 | <b>Exposure control -toiminto</b> .....            | 44 |
| 4     | <b>CASE: AIDON SISÄTILAN 3D-MALLI</b> .....        | 47 |
| 4.1   | <b>Johdanto</b> .....                              | 47 |
| 4.2   | <b>Tilan mallintaminen VIZ-ohjelmalla</b> .....    | 48 |
| 4.3   | <b>Arkkitehtuuri-materiaalien luominen</b> .....   | 49 |
| 4.3.1 | <b>Materiaalikartat</b> .....                      | 49 |
| 4.3.2 | <b>Kuvan muokkaaminen materiaalikartaksi</b> ..... | 50 |
| 4.3.3 | <b>Heijastus- ja läpäisysuhde</b> .....            | 54 |
| 4.2   | <b>Fotometrinen valojen luominen</b> .....         | 57 |
| 4.3   | <b>Valaistussimulaatio</b> .....                   | 58 |
| 4.3.1 | <b>Aidon tilan valaistusmittaukset</b> .....       | 58 |
| 4.3.2 | <b>Radiositeetilaskennat</b> .....                 | 60 |
| 5     | <b>YHTEENVETO</b> .....                            | 62 |
|       | <b>LÄHTEET</b> .....                               | 65 |
|       | <b>LITTEET</b> .....                               | 66 |

## TERMISTÖ

COLOR BLEEDING - valaistusilmiö, jossa värikkästä pinnasta heijastuva valo ”siirtää” väriä toiseen pintaan

MUOKKAAJA - Autodesk VIZ -ohjelman modifier list -valikon toiminto (esim. EditPoly-muokkaaja)

RADIOSITEETILASKENTA - Autodesk VIZ -ohjelman käyttämä epäsuoran valaistuksen laskentamenetelmä (eng. radiosity)

RAY TRACING - Autodesk VIZ -ohjelman vakiona käyttämä suoran valaistuksen laskentamenetelmä

RENDERÖINTI - menetelmä, jonka avulla 3-ulotteisesta mallista luodaan 2-ulotteinen kuva

SCANLINE - Autodesk VIZ -ohjelman vakiona käyttämä renderöintimenetelmä

# 1 JOHDANTO

Arkkitehtuurissa eli rakennustaiteessa visuaalisuus ja käytännöllisyys yhdistyvät ja muodostavat yhdessä toimivan kokonaisuuden. Arkkitehdit käyttävät visuaalisen ilmeen suunnittelussa ja käytännön ongelmien ratkaisemisessa hyödyksi useita eri tekniikoita. Työn visuaaliset osa-alueet, kuten rakennusten pinnanmuodot ja pintamateriaalit, voidaan suunnitella ja havainnollistaa esimerkiksi piirustusten ja pienoismallien avulla. Käytännön ongelmat, kuten erilaisten rakennuselementtien kestävyudet ja rakennushankkeen kokonaishinta, voidaan ratkaista fysiikan ja matematiikan kaavoja käyttämällä.

Yksi oleellinen suunnittelun osa-alue sekä visuaalisuuden että käytännöllisyyden kannalta on rakennuksen valaistus. Valaistuksen on sovittava yhteen rakennuksen visuaalisen ilmeen kanssa ja samaan aikaan sen on oltava sopivan voimakasta eri käytännön tarkoituksia varten. Piirustusten avulla voi suunnitella haluamansa valaistuksen, mutta on vaikeaa päätellä onko kyseinen valaistus mahdollista toteuttaa käytännössä. Fysiikan kaavojen avulla voi laskea tietyn valonlähteen luoman valaistusvoimakkuuden eri pinnoille, mutta on mahdotonta kuvitella miltä valmis rakennus näyttäisi kyseisen valon valaisemana. Pienois mallien avulla saa kohtalaisen käsityksen siitä, miten valaistus vaikuttaa rakennukseen, mutta pienestä koostaan johtuen ne eivät kuitenkaan sovellu sisätilan valaistuksen tarkkaan suunnitteluun. Valaistuksen visuaalisuuden ja käytännöllisyyden tutkimista varten on fysiikan kaavojen avulla laskettu valaistusvoimakkuus simuloitava näkyvään muotoon. Tämänlaisia valaistussimulaatioita varten on kehitetty monia eri tietokoneohjelmia. Yksi niistä on Autodesk VIZ.

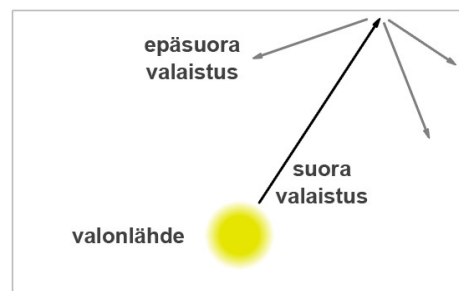
Tämän opinnäytetyö tutkii Autodesk VIZ -ohjelman avulla simuloitua sisätilan valaistusta. Työssä selvitetään aidon valon ominaisuuksien lisäksi valaistussimulaatioon tarvittavia VIZ-ohjelman ominaisuuksia. Simuloitua ja todellista valaistusta verrataan keskenään case-osiossa.

Kaikkia VIZ-ohjelman valaistusominaisuuksia ei käsitellä tämän työn yhteydessä. Lähinnä pyritään keskittymään valaistuksen realistisuuden kannalta oleellisiin ominaisuuksiin.

## 2 AIDON VALON OMINAISUUDET

### 2.1 Valo-oppi

Ennen kuin ryhdytään selvittämään VIZ-ohjelman keinoja valaistuksen simuloimiseen, on ensin perehdyttävä simuloinnin kohteeseen eli todellisen valon ominaisuuksiin. Optiikka eli valo-oppi on yksi klassisen fysiikan haaroista, joka käsittelee valon ominaisuuksia, käyttäytymistä ja vuorovaikutusta eri aineiden kanssa (Tiainen & Mäkelä 1993, 270). Optiikan avulla pystytään selittämään näköaistilla todellisessa maailmassa havaittavia asioita. Näitä asioita voidaan myöhemmin verrata VIZ-ohjelman erilaisiin suoran ja epäsuoran valaistuksen simulointitekniikoihin. Suoralla valaistuksella tarkoitetaan suoraan valonlähteestä pintaan tulevaa valoa. Epäsuora valaistus taas tarkoittaa valonlähteestä peräisin olevaa muiden pintojen kautta heijastuvaa tai taittuvaa valoa.



Kuvio 1. Suora ja epäsuora valaistus

### 2.2 Geometrinen optiikka

#### 2.2.1 Aksioomat

Tieteellinen optiikan tutkimus voidaan jakaa geometriseen ja fysikaaliseen osaan, joista jälkimmäinen käsittelee valon aaltoluonnetta ja siihen liittyviä ilmiöitä, kuten polarisaatiota interferenssiä (Tiainen & Mäkelä 1993, 747). Valon aaltoluonne ei kuitenkaan ole tämän työn kannalta oleellista, sillä VIZ-ohjelmassa valaistuksen simuloiminen perustuu valon hiukkasluonteeseen, jota geometrinen optiikka käsittelee. Valo siis käsitetään aaltoliikkeen sijasta suoraviivaisesti liikkuviksi säteiksi, joita VIZ-ohjelmassa kutsutaan fotoneiksi. Geometrisen optiikan eli sädeoptiikan perustana ovat seuraavat neljä kokemuksen varmistamaa tosiasiaa eli aksioomaa.



1. *Valon suoraviivainen kulku. Valo etenee suoraviivaisesti optisesti homogeenisessä väliaineessa.*

2. *Heijastumislaki. Tuleva ja heijastunut säde sekä pinnan normaali ovat samassa tasossa. Tuleva ja heijastunut säde muodostavat pinnan normaalin kanssa yhtä suuret kulmat.*

$$\text{tulokulma } \alpha = \text{heijastuskulma } \beta$$

3. *Taittumislaki. Tuleva ja taittunut säde sekä pinnan normaali ovat samassa tasossa. Tulokulman  $\alpha_1$  ja taitekulman  $\alpha_2$  keskinäisen riippuvuuden ilmoittaa yhtälö*

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

*missä  $n_1$  ja  $n_2$  ovat aineiden 1 ja 2 taitekertoimet.*

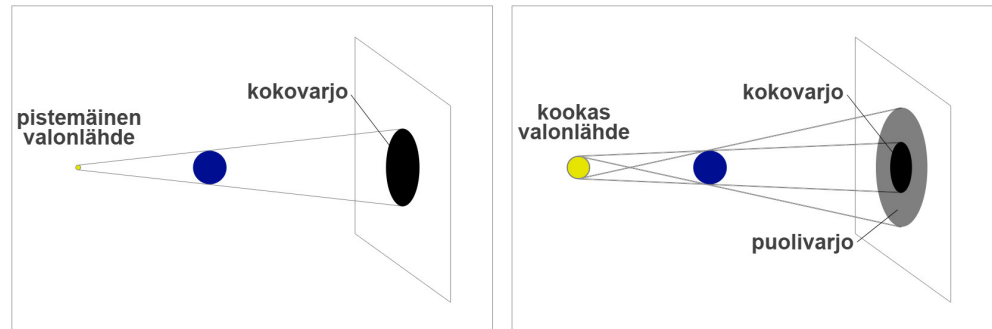
4. *Valonsäteen käänteinen kulku. Jos valonsäde kulkee A:sta C:n kautta B:hen, niin B:stä suuntaan BC lähetetty säde kulkee A:han.*

*(Lehto & Luoma 1995, 182 -184.)*

Edellä mainituista kolme ensimmäistä aksioomaa selittävät oleellisesti VIZ-ohjelman tapaa simuloida valaistusta.

### 2.2.2 Valon suoraviivainen kulku

Käytännössä sädeoptiikan ensimmäinen aksiooma tarkoittaa yksinkertaisesti sitä, että valonsäteet etenevät suoraa linjaa pitkin kulkiessaan ”puhtaassa” aineessa, kuten ilmassa tai kirkkaassa vedessä. Seurauksena tästä ovat mm. valonlähteen eri kappaleille luomat varjot. Varjojen laatu riippuu valonlähteen koosta. Esimerkiksi pistemäinen valonlähde ei päästä ollenkaan valoa kappaleen taakse ja antaa sille aina kokovarjon. Suurempi valonlähde taas päästää osan valostaan kappaleen taakse antaen sille kokovarjon lisäksi myös sitä kirkkaamman puolivarjon.



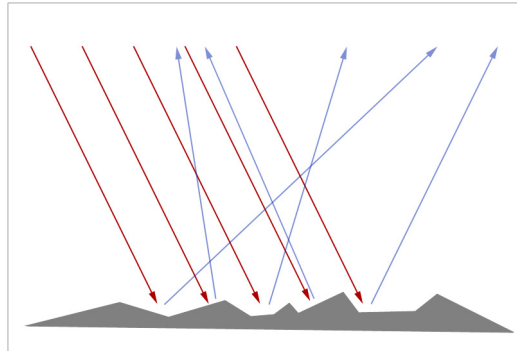
Kuvio 2. Valonlähteen koon vaikutus sen luomaan varjoon

Tällaisia varjoja esiintyy yleensä vain teoriassa. Käytännössä kappaleen varjoon vaikuttaa myös muista kappaleista heijastuva epäsuora valaistus, joka muokkaa kappaleen alkuperäistä varjoa huomattavasti. On kuitenkin tärkeää tietää, että tällainen suoran valaistuksen luoma varjo muodostuu jokaiselle kappaleelle, vaikka se himmeneekin nopeasti epäsuoran valaistuksen vaikutuksesta. VIZ-ohjelma nimittäin simuloi suoraa valaistusta ja sen luomia varjoja juuri edellä mainitun esimerkin tavoin. Toisin sanoen valon suoraviivainen kulku on VIZ-ohjelmassa suoran valaistuksen simuloinnin perusta.

### 2.2.3 Heijastumislaki

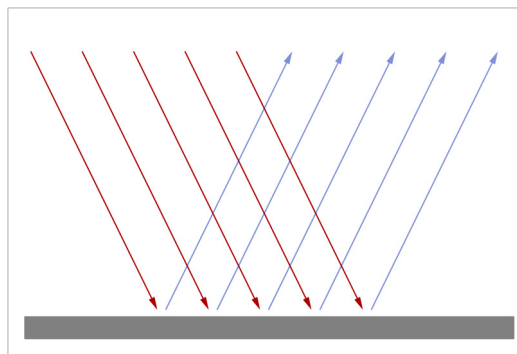
Sädeoptiikan toinen aksiooma tarkoittaa käytännössä sitä, että valon osuessa tiettyyn pintaan osa siitä heijastuu pois tulo- ja heijastuskulman ollessa yhtä suuria. Pinnasta riippuen valolle tapahtuu joko hajaheijastus tai peiliheijastus.

Vaikka jokin pinta saattaa silmämääräisesti katsottuna näyttää tasaiselta, se voi sisältää mikroskooppisen pieniä epätasaisuuksia. Kun valo osuu tällaiseen pintaan, pinnasta pois heijastunut valo hajaantuu epätasaisuuksien vaikutuksesta eri suuntiin. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että pinnasta ei voi nähdä peilikuvaa.



Kuvio 3. Hajaheijastus epätasaisesta pinnasta

Peilikuvan näkemiseen vaaditaan nimensä mukaisesti peiliheijastava pinta. Peiliheijastus tapahtuu, jos pinta on mikroskooppisesti tarkasteltuna tasaisen sileä. Silloin kaikki samasta suunnasta tulevat valonsäteet osuvat pintaan samassa tulokulmassa ja jatkavat matkaa samansuuntaisina myös heijastuksen jälkeen.



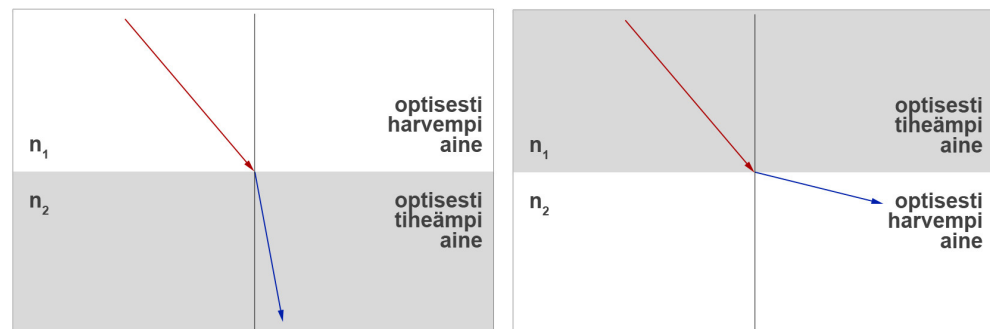
Kuvio 4. Peiliheijastus tasaisesta pinnasta

Käytännössä pinnat heijastavat valoa sekä haja- että peiliheijastusmenetelmällä (Halonen & Lehtovaara 1992, 70). Esimerkiksi monista metalleista ja muoveista voi hahmottaa himmeän peilikuvan, joka ei kuitenkaan vastaa tavallisen peilin luomaa heijastusta. VIZ-ohjelma pystyy simuloimaan sekä peili- että hajaheijastusta. Pintojen heijastuksen laatua ja voimakkuutta muokataan materiaalieditorin avulla.

#### 2.2.4 Taittumislaki

Jokaisella aineella on oma taitekertoimensa, joka tässä yhteydessä kertoo kyseisen aineen optisesta tiheydestä. Suurempi taitekerroin tarkoittaa suurempaa optista tiheyttä. Kun valonsäde saapuu kahden läpinäkyvän aineen

rajapintaan, se taittuu sädeoptiikan kolmannen aksiooman kaavan määräämällä tavalla. Aineiden taitekertoimet,  $n_1$  ja  $n_2$ , ratkaisevat taittumisen suunnan. Kulkiessaan optisesti harvemmasta aineesta optisesti tiheämpään aineeseen valonsäde taittuu rajapinnan normaaliin päin. Vastaavasti toiseen suuntaan kulkiessaan valo taittuu rajapinnan normaalista poispäin. Käytännössä optisesti harvempi aine on hyvin usein ilma, jonka taitekerroin on 1,00. Tällöin ilmasta toiseen aineeseen kulkeva valonsäde taittuu kohti rajapinnan normaalia. Vastaavasti toisesta aineesta ilmaan kulkeva valonsäde taittuu rajapinnan normaalista poispäin.



Kuvio 5. Valon taittuminen rajapinnoissa

Taittumisen lisäksi osa valosta heijastuu yleensä takaisin, vaikka aine olisi-kin läpinäkyvää. Valonsäteiden tulokulma vaikuttaa siihen, kuinka suuri osa valosta taittuu ja kuinka paljon heijastuu takaisin. VIZ-ohjelma käyttää hyödyksi aineiden taitekertoimia ja taittumislakia simuloidessaan valosäteiden taittumista.

Tähän asti valon taittumisen yhteydessä on puhuttu läpinäkyvyydestä. Läpinäkyvyydellä tarkoitetaan tasaisen pinnan kykyä päästää valo lävitseen. Tällaisen pinnan läpi katsottaessa muodostuu selkeä kuva pinnan toisella puolella olevista asioista. Vaihtoehtoisesti myös epätasainen pinta voi päästää valoa lävitseen. Tällaisen pinnan läpi katsottaessa ei saa selkeää kuvaa pinnan toisella puolella olevista asioista. Pinta ei ole silloin läpinäkyvä vaan läpikuultava. Pintojen läpinäkyvyyden ja läpikuultavuuden voimakkuutta muokataan VIZ-ohjelmassa materiaalieditorin avulla.

Pinnan tasaisuus mikroskooppisesti tarkasteltuna ratkaisee sen, miten valo heijastuu tai taittuu siitä. Tämä vaikuttaa huomattavasti pinnan ulkonäköön ja sen tapaan valaista muita pintoja.

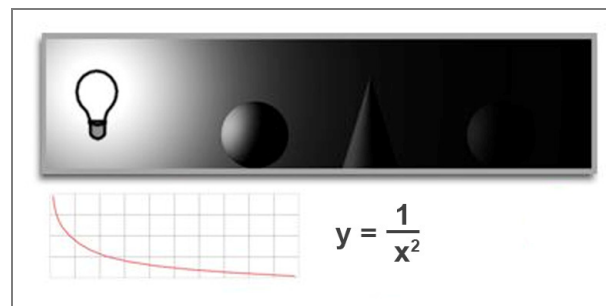
Taulukko 1. Pinnan ominaisuuksien vaikutus pinnan ulkonäköön

|               | TASAINEN              | EPÄTASAINEN          |
|---------------|-----------------------|----------------------|
| LÄPINÄKYMÄTÖN | Peiliheijastava pinta | Hajaheijastava pinta |
| LÄPINÄKYVÄ    | Läpinäkyvä pinta      | Läpikuultava pinta   |

### 2.3 Valon vaimentuminen ja väri

Todellisuudessa samasta pisteestä lähtenyt valo vaimentuu kulkiessaan eteenpäin. Kaukana valonlähteestä olevat kohteet näyttävät tummemmilta kuin lähellä valonlähdettä olevat kohteet. Vaimentuminen johtuu siitä, että matkan kasvaessa sama määrä valoa joutuu valaisemaan koko ajan laajemman ja laajemman alueen. Vaikka valo kokonaisuutena vaimentuu, yksittäisen valonsäteen kirkkaus pysyy samana, ellei se luovuta kirkkauttaan jollekin pinnalle.

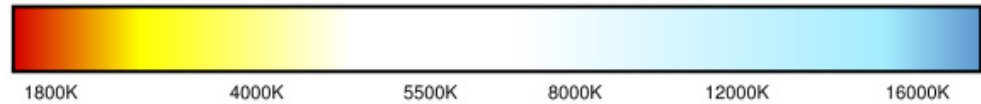
Aito valo vaimentuu käänteisen neliön vauhtia eli valon vaimentuminen hidastuu kuljetun matkan kasvaessa. VIZ-ohjelmassa fotometrinen valojen vaimentuminen lasketaan aina käänteisen neliön kaavalla. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Properties of Light.)



Kuvio 6. Valon vaimentuminen (Autodesk VIZ 2007 User Reference)

Luonnollisen valon väri riippuu osittain prosessista jossa valo syntyy. Esimerkiksi volframi lamppu luo oranssin-keltaista valoa, mutta elohopeahöyrylamppu luo vaaleansinistä valoa. Tämän lisäksi valon väri muuttuu, kun se kulkee värillisen väliaineen kuten vihreän lasin läpi. VIZ-ohjelmassa fotometrinen valojen väri määritellään värilämpötilan avulla. Värilämpöti-

lan yksikkö on kelvin [K]. Valon väri on mahdollisimman lähellä mustan kappaleen väriä kyseisessä lämpötilassa. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Properties of Light.)



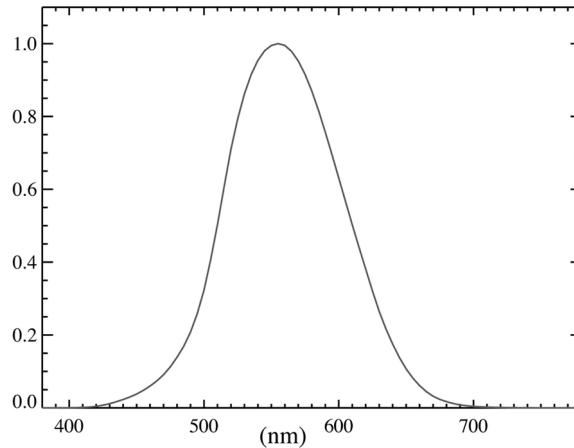
Kuvio 7. Väriämpötila-asteikko ([http://en.wikipedia.org/wiki/Color\\_temperature](http://en.wikipedia.org/wiki/Color_temperature))

## 2.4 Fotometria

### 2.4.1 Määritelmä

Edellä käsitelty geometrinen optiikka kuuluu tieteelliseen optiikan tutkimukseen. Sovellettua tieteellistä optiikkaa kutsutaan optiseksi tekniikaksi. Kun sovellukset liittyvät pääasiassa valaistukseen, puhutaan valaistustekniikasta. Valaistustekniikassa valon mittaaminen tapahtuu fotometrian avulla.

Fotometria on näköaistin havaintoihin perustuva valon mittausta käsittelevä tiede. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että fotometria mittaa valon kirkkautta ottamalla samalla huomioon ihmissilmän erilaiset herkkyysasteet valon eri aallonpituuksille. Esimerkiksi hyvässä valaistuksessa ihmissilmä aistii herkinten keltavihreää valoa, jonka aallonpituus on noin 555 nanometriä. Aallonpituuden pienentyessä tai kasvaessa silmän näköherkkyys laskee kunnes se katoaa kokonaan. Tästä johtuen ihmissilmä ei pysty aistimaan ultra-violetti- tai infrapunasäteitä. (Halonen & Lehtovaara 1992, 36.)



Kuvio 8. Ihmissilmän suhteellinen näköherkkyys valon eri aallonpituuksilla päivänvalossa (<http://en.wikipedia.org/wiki/Photopic>)

Asian tarkempi käsittely on monimutkaista ja aikaa vievää. Tämän työn yhteydessä on oleellista tietää vain, että fotometriassa on määritelty kaikille yhteiset menetelmät ja SI-järjestelmän suureet joiden avulla valaistusta mitataan.

#### 2.4.2 Valaistussuureet

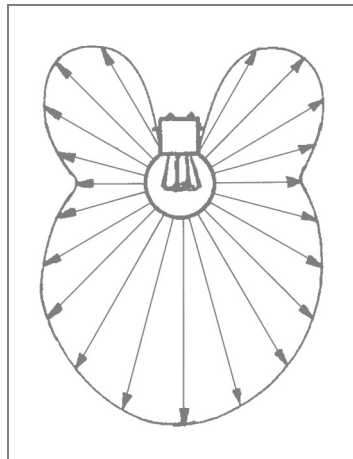
Suure on ilmiön tai kappaleen mitattavissa oleva ominaisuus. Fysiikassa käytetään tiettyjä, toisistaan riippumattomia perussuureita, joista muut suureet on johdettu. Jokaisella fysiikan osa-alueella tarvitaan kolmen yhteisen perussuureen lisäksi yhtä yksilöllistä perussuuretta. Kaikille osa-alueille yhteiset perussuureet ovat massa, pituus ja aika. Valaistustekniikassa käytetty yksilöllinen perussuure on valovoima. (Halonen & Lehtovaara 1992, 34.) VIZ-ohjelman valaistussimulaatio käyttää valovoiman lisäksi kolmea muuta fotometrian suuretta. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Photometry.)

Taulukko 2. Valaistussuureet ja yksiköt

| SUURE               | SYMBOLI | YKSIKKÖ   |
|---------------------|---------|---|
| valovoima           | I       | kandela [cd]  |
| valovirta           | $\Phi$  | lumen [lm]  |
| valaistusvoimakkuus | E       | lumen/neliometri [lm/m <sup>2</sup> ] tai luksit [lx] |
| valoeksistanssi     | M       | lumen/neliometri [lm/m <sup>2</sup> ]                 |
| luminanssi          | L       | kandela/neliometri [cd/m <sup>2</sup> ]               |

### 2.4.3 Valovoima

Valonlähteen pinta ja muoto sekä mahdolliset peilit vaikuttavat siihen, millä voimakkuudella valo suuntautuu valonlähteestä ympäristöön. Valovoima kuvaa valonlähteestä tiettyyn suuntaan säteilevän valon voimakkuutta. Valovoima on fotometrian perussuure ja sen yksikkö on kandela [cd]. Kaikki muut valaistustekniikan suureet voidaan johtaa valovoimasta. (Halonen & Lehtovaara 1992, 34.)



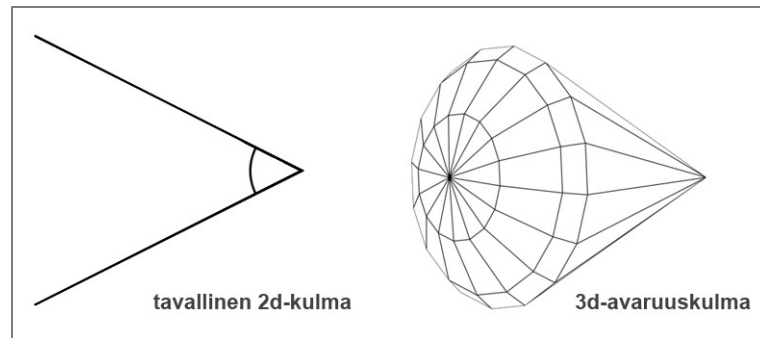
Kuvio 9. Hehkulampun valovoima eri suunnissa

VIZ-ohjelmassa valon kirkkaus on säädettävissä valovoiman avulla. Koska valonlähteen valovoima yleensä vaihtelee tarkastelusuunnan mukaan, annetaan valovoima sen suunnan perusteella, missä se on voimakkainta (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Intensity/Color/Distribution Rollout). Sen jälkeen VIZ-ohjelma laskee muiden suuntien valovoimat valonlähteen levityksen asetusten perusteella. Isotrooppinen eli suunnasta riippumaton levitys jakaa valovoiman tasaisesti kaikkiin suuntiin (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Isotropic Light Distribution (Photometric Lights)).

### 2.4.4 Valovirta

Avaruuskulma on kolmiulotteinen kulma, jonka suuruutta mitataan SI-järjestelmässä steradiaaneina [sr]. Täysi avaruuskulma on  $4\pi$  sr.





Kuvio 10. Kaksiulotteinen ja kolmiulotteinen kulma

Edellä käsitelty valovoima kuvaa valonlähteestä tiettyyn yksittäiseen suuntaan säteilevän valon voimakkuutta. Tämän ”tietyn yksittäisen suunnan” voi käsittää myös erittäin pienenä avaruuskulmana. Jos valonlähteen säteilyä halutaan mitata laajemmassa kulmassa, puhutaan mittauksissa valovoiman sijaan valovirrasta. Valovirta kuvaa kuinka voimakkaasti valonlähde säteilee tietyn suuruiseen avaruuskulmaan. Valovirran yksikkö on lumen [lm].

Valovoiman ja valovirran suhde selviää kaavasta  $\Phi = I\omega$ , jossa  $\omega$  on valovirran avaruuskulman suuruus. Kaavaa voidaan soveltaa vain jos valonlähde säteilee valoa tasaisella voimakkuudella. Jos valonlähde säteilee valoa tasaisella isotrooppisella voimakkuudella täyteen avaruuskulmaan eli kaikkiin suuntiin, saadaan kaavan perusteella valovoiman ja valovirran suhteeksi:

$$1 \text{ kandela} = 4\pi \text{ lumen} \approx 12,57 \text{ lumen}$$

Muissa tapauksissa suhteen laskeminen on monimutkaisempaa, mutta VIZ-ohjelma tekee sen automaattisesti. Jos valon kirkkaus säädetään valovirran avulla, arvoksi annetaan valonlähteen luoman valovirran kokonaismäärä (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Intensity/Color/Distribution Rollout). Valonlähteen levitys asetukset vaikuttavat tässäkin tapauksessa valaistuksen lopputulokseen.

#### 2.4.5 Valaistusvoimakkuus

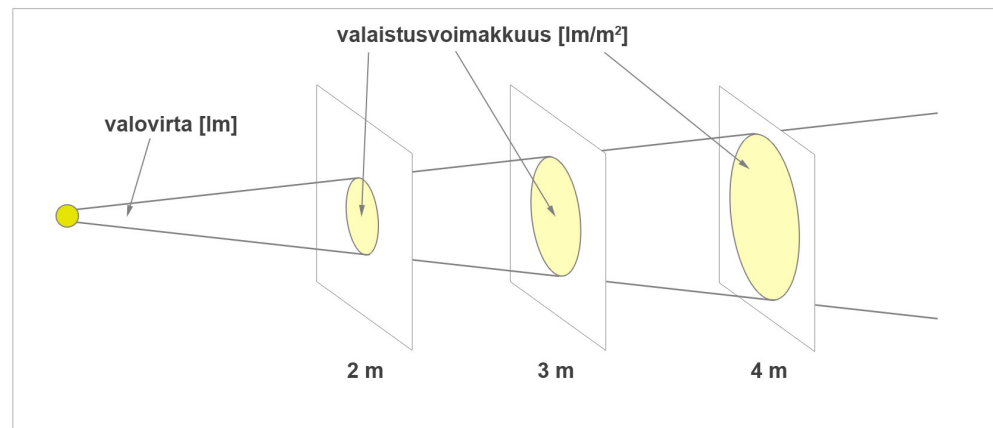
Kulkiessaan poispäin valonlähteestä valovirta osuu lopulta johonkin pintaan. Silloin se heijastuu, taittuu tai imeytyy pintaan. Pinta näyttää sitä valoisaammalta, mitä suurempi valovirta pinnalle tulee (Lehto & Luoma 1995, 221). Valaistusvoimakkuus kuvaa tietyn kokoiselle pinnalle saapuvan valo-

virran määrää ennen heijastumista, taittumista tai imeytymistä. Valaistusvoimakkuuden yksikkö on lumen per neliometri [ $\text{lm}/\text{m}^2$ ] eli luksi [ $\text{lx}$ ]. (Halonen & Lehtovaara 1992, 36.) Valaistusvoimakkuudelle ( $E$ ) voidaan kirjoittaa yhtälö:

$$E = \frac{\Phi}{A}$$

jossa  $\Phi$  on pinnalle tuleva valovirta ja  $A$  on pinnan ala.

Valonlähteestä tiettyyn avaruuskulmaan lähtevä valovirta osuu sitä laajemmalle pinta-alalle, mitä pidemmän matkan se on kulkenut. Jotta valaistusvoimakkuutta voidaan verrata suhteessa valovirtaan, täytyy valaistusvoimakkuuden arvon yhteydessä ilmoittaa myös mittausetäisyys valonlähteestä. VIZ-ohjelmassa valon kirkkauden voi säätää valaistusvoimakkuuden avulla antamalla mitatun luksin lisäksi myös mittausetäisyyden (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Intensity/Color/Distribution Rollout).



Kuvio 11. Valonlähteen etäisyyden vaikutus valaistusvoimakkuuteen

Käytännössä valaistusvoimakkuutta käytetään kuvaamaan, miten hyvät valaistusolosuhteet jossakin tilassa on. Useille eri työtiloille on määritelty omat suositusvalaistusvoimakkuudet. VIZ-ohjelmassa eri pintojen valaistusvoimakkuuden arvoja voi mitata valaistuksen analysointi -työkalun avulla.

#### 2.4.6 Valoeksistanssi

Kun valovirta on kohdannut jonkin pinnan ja jatkanut matkaa heijastumisen tai taittumisen vaikutuksesta, osa valovirrasta on todennäköisesti imeytynyt pintaan. Pinnasta lähtevä valovirta on siis pienempi kuin pintaan saapunut valovirta. Valoeksistanssi kuvaa tietyn kokoiselta pinnalta lähtevän valovirran määrää heijastumisen tai taittumisen jälkeen. Valoeksistanssin yksikkö on lumen per neliometri [ $\text{lm}/\text{m}^2$ ]. (Halonen & Lehtovaara 1992, 37.)

Valoeksistanssi ei ole valonlähteen kirkkauden määrittämisen kannalta oleellinen suure, eikä VIZ-ohjelmassa sitä edes käytetä. Yhdessä valaistusvoimakkuuden kanssa sitä voidaan kuitenkin käyttää heijastus- ja läpäisysuhteen laskemiseen. Pinnan heijastussuhde kertoo, kuinka suuri osa valosta heijastuu siitä takaisin. Läpäisysuhde kertoo vastaavasti, kuinka suuri osa valosta läpäisee pinnan. Sekä heijastus- että läpäisysuhde lasketaan jakamalla pinnan valoeksistanssi pinnan valaistusvoimakkuudella. VIZ-ohjelma käyttää heijastus- ja läpäisysuhdetta pintamateriaalien yhteydessä.

$$\text{heijastussuhde} = \frac{\text{valoeksistanssi}}{\text{valaistusvoimakkuus}}$$

#### 2.4.7 Luminanssi

Käytännössä valoeksistanssi kuvaa tietyn kokoiselta pinnalta lähtevän valon määrää. Se kertoo, kuinka paljon pinnalta lähtee valoa kaikkiin suuntiin. Se ei kuitenkaan kerro, miten kirkkaalta pinta näyttää, sillä se riippuu tarkastelusuunnasta. Esimerkiksi valoa heijastava kuution muotoinen kappale saattaa tietystä suunnasta katsottuna näyttää enemmänkin vinokulmiolta kuin kuutiolta.

Luminanssi kuvaa pinnalta lähtevän valon voimakkuutta tietystä suunnasta tarkasteltuna. Luminanssin yksikkö on kandela per neliometri [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ]. Luminanssin yhteydessä käytetään valovoimaa valovirran sijasta, koska juuri valovoima kuvaa tiettyyn suuntaan säteilevän valon voimakkuutta. (Halonen & Lehtovaara 1992, 37.)

VIZ-ohjelmassa eri pintojen luminanssi arvoja voi mitata valaistuksen analysointi -työkalun avulla. Tärkeintä on kuitenkin tietää, että juuri luminanssi on se suure, jonka VIZ-ohjelma muuntaa väreiksi luodessaan realistisia renderöintejä 3d-mallista (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Photometry).

### 3 VALAISTUKSEN SIMULOINTI

#### 3.1 Autodesk VIZ -ohjelma

Todellista valoa ja valaistusta voi simuloida useilla eri tietokoneohjelmilla. Tämä opinnäytetyö tutkii valaistuksen simulointia Autodesk® VIZ 2007 -ohjelman avulla. VIZ on Autodeskin luoma 3d-mallinnus ja renderöinti ohjelma, joka muistuttaa käyttöliittymänsä ja ominaisuuksiensa puolesta huomattavan paljon saman yrityksen luomaa 3ds max -ohjelmaa.

Realistisen valaistuksen simulointi VIZ-ohjelmalla on kohtalaisen helppoa fotometrisia valoja käyttämällä. Valojen ominaisuudet säädetään fysikaalisten suureiden avulla, joten riittää, että valot asetetaan oikeille paikoilleen 3d-mallissa. Radiositeetilaskenta huolehtii lopullisesta valaistussimulaatiosta. Aidoimman lopputuloksen saamiseksi 3d-mallin pinnat pitää vielä päällystää arkkitehtuuri-materiaaleilla. Ennen lopullista renderöintiä kuvan kirkkautta voidaan säätää exposure control -toiminnon avulla. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Lighting.)

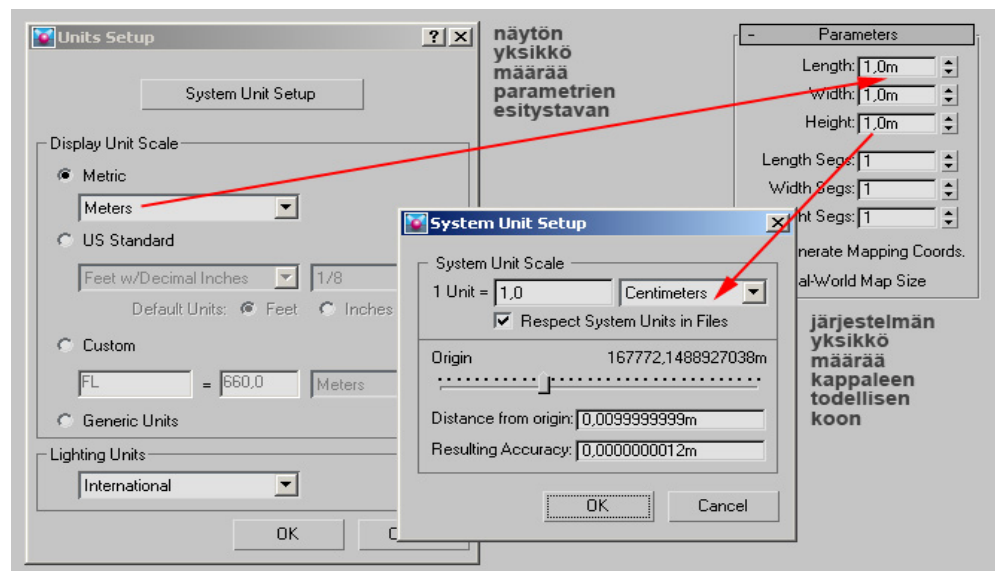
#### 3.2 Fotometriset valot

##### 3.2.1 Lähtökohdat

VIZ-ohjelmassa perusvalojen kirkkautta muokataan kirkkauskertoimen avulla, valon väri valitaan värikartasta ja valon kirkkauden vaimentuminen säädetään oman mielen mukaan. Fotometrisillä valoilla vastaavat säädöt perustuvat aidon valon fysikaalisiin ominaisuuksiin; voimakkuus annetaan lumen-, kandela- tai luksiarvona, väri ilmoitetaan värilämpötilana kelvineissä, ja valon kirkkauden vaimentuminen lasketaan aina käänteisen neliön avulla. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Photometric Lights.)

Koska fotometrinen valojen ominaisuudet määritellään aitojen fysikaalisten suureiden avulla, on niiden toiminnan kannalta oleellista, että myös 3d-malli on mallinnettu oikeiden fysikaalisten mittojen mukaan. VIZ-ohjelman käyt-

tämät mittayksiköt saa muutettua units setup -ikkunassa. Muunnosta tehtäessä on erittäin tärkeää huomioida ero näytön ja järjestelmän mittayksikön välillä. Näytön mittayksikkö on vain visuaalinen apuväline, joka ei vaikuta ohjelman tekemiin laskutoimituksiin millään tavalla. Jos esimerkiksi haluaa syöttää kappaleiden mitat senttimetreinä, kannattaa näytön mittayksiköksi asettaa senttimetrit. Järjestelmän mittayksikön perusteella ohjelma määrittää eri kappaleiden koot, joita myöhemmin käytetään fotometrisissa laskutoimituksissa. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Radiosity Workflows.) Jotta sekaannuksilta vältyttäisiin, on kaikkein loogisinta asettaa sekä näytölle että järjestelmälle sama mittayksikkö. On myös suotavaa asettaa järjestelmän mittayksikkö ennen piirtämisen aloittamista, sillä mittayksikön muuttaminen kesken työnteon muokkaa jo piirrettyjen kappaleiden kokoa (Autodesk VIZ 2007 User Reference: System Unit Setup Dialog).



Kuvio 12. Näytön ja järjestelmän mittayksiköiden merkitys

### 3.2.2 Valonlähteiden tyypit

VIZ-ohjelman normaalikäytössä olevat fotometriset valot voidaan jakaa kolmeen eri tyyppiin valonlähteen säteilyalueen koon perusteella. Yleisin niistä on point light -valonlähde, joka säteilee valoa yhdestä pisteestä käsin. Tavallinen hehkulamppu tai kynttilä voidaan käsittää point light -valonlähteeksi. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Free Point Light (Photometric).)

Linear light -valonlähde säteilee valoa eri suuntiin tietyn pituisen janan määräämältä yksiulotteiselta alueelta. Loisteputket voidaan ajatella linear light -valonlähteinä, vaikka oikea loisteputki säteileekin valoa kolmiulotteiselta, lieriön muotoiselta, alueelta. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Free Linear Light (Photometric).)

Area light -valonlähde säteilee valoa suorakulmion muotoiselta kaksiulotteiselta alueelta (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Free Area Light (Photometric)). Area light -valonlähdettä voidaan käyttää simuloimaan esimerkiksi suorakaiteen muotoista loistevaloa tai ikkunasta sisään tulevaa päivänvaloa. Realistisemmin päivänvalon simulointi onnistuu siihen erityisesti tarkoitetuilla IES sunlight ja IES skylight -valonlähteillä. Tässä työssä käsitellään kuitenkin vain sisätilan valaistukseen käytettäviä valoja. Voitaisiin toki tutkia, miten ikkunasta sisään tuleva päivänvalo valaisee huonetta. Aidon tilan ulkopuolella olevat rakennukset ja puut vaikuttavat kuitenkin päivänvalon voimakkuuteen niin paljon, että realistisen tutkimuksen tekeminen ei olisi mahdollista.



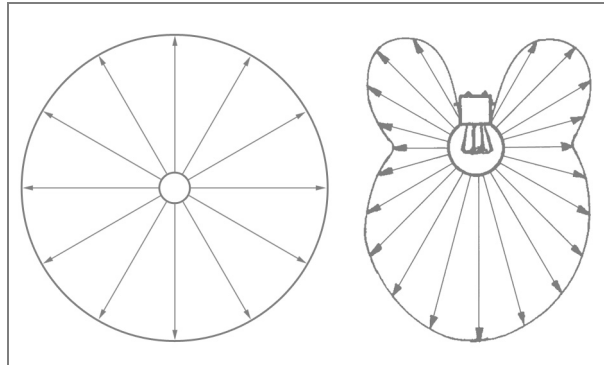
Kuvio 13. VIZ-ohjelman fotometriset valonlähteet

Kaikki kolme edellä esiteltyä valonlähdettä voidaan luoda joko vapaina tai tähtäimen kanssa. Tähtäimen avulla valonlähteen pää säteilysuuntaa saa helpommin vaihdettua. Pää säteilysuunnalla on väliä vain silloin, kun valonlähde ei levitä valoa tasaisesti kaikkiin suuntiin.

### 3.2.3 Valon levitys

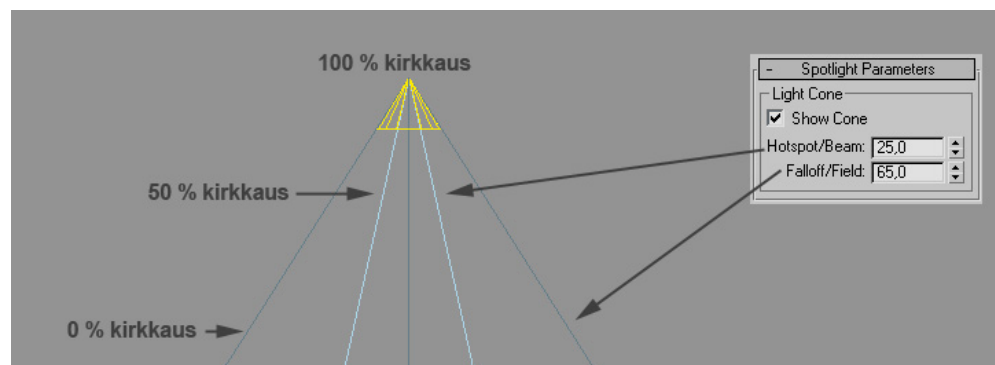
VIZ-ohjelman fotometriset valot voivat levittää valoa neljällä eri tavalla: yleisin tapa on suunnasta riippumaton isotropic-levitys, joka onnistuu vain point light -valonlähteellä. Point light -valonlähde isotropic-levityksellä säteilee valoa samalla voimakkuudella kaikkiin suuntiin (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Isotropic Light Distribution (Photometric Lights)). Tämä

on kohtalaisen nopea tapa simuloida useimpien hehkulamppujen tai kynttilän luomaa valoa. Äärimmäistä realismia haettaessa täytyy kuitenkin muistaa, ettei aito hehkulamppu säteile valoa samalla voimakkuudella kaikkiin suuntiin.



Kuvio 14. Isotropic-levitys ja oikean hehkulamppun levitys

Toinen ainoastaan point light -valonlähteelle luotu valon levitystapa on spotlight-levitys. Point light -valonlähde spotlight-levityksellä säteilee valoa tietyn suuruiseen avaruuskulmaan, jonka suuruutta säädellään field-muuttujan avulla. Lisäksi on olemassa beam-muuttuja, jonka avulla valon kirkkauden vaimentumista voi säädellä tarkemmin. Beam-muuttujan avulla säädetyssä avaruuskulmassa valon kirkkaus on vaimentunut puoleen alkupeiräisestä. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Spotlight Distribution (Photometric Lights).) Spotlight-levitys on kohtalaisen hyvä tapa simuloida esimerkiksi taskulamppun, auton ajovalojen tai tavallisen kohdevaloherkkulamppun valoa.

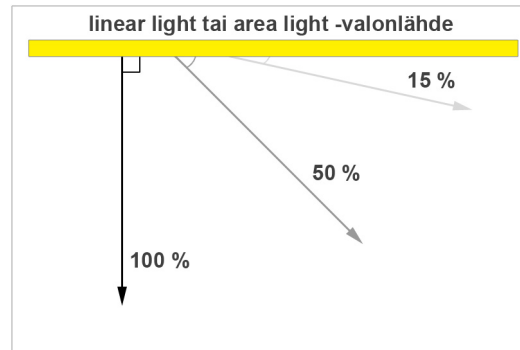


Kuvio 15. Spotlight-levityksen vaimentuminen

Linear light ja area light -valonlähteet levittävät valoa yleensä diffuse-levityksellä. Diffuse-levityksessä valonsäteet lähetetään joltakin pistettä suuremmalta alueelta. Kirkkaimmat valonsäteet lähtevät alueen pinnasta

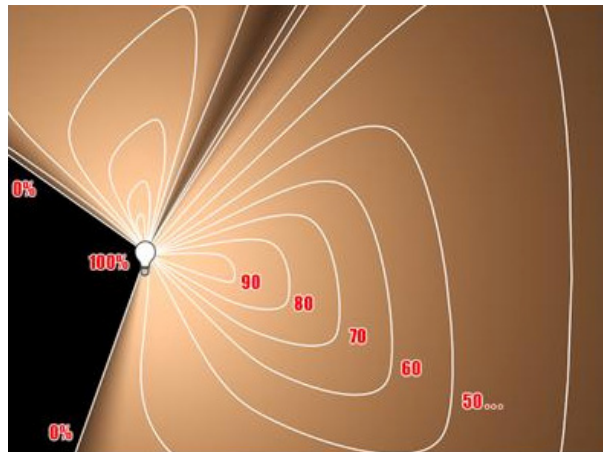


suorassa kulmassa. Mitä vinommassa kulmassa valonsäde lähtee alueen pinnasta, sitä vaimeampi sen kirkkaus on. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Diffuse Distribution (Photometric Lights).)



Kuvio 16: Diffuse-levityksen vaimentuminen

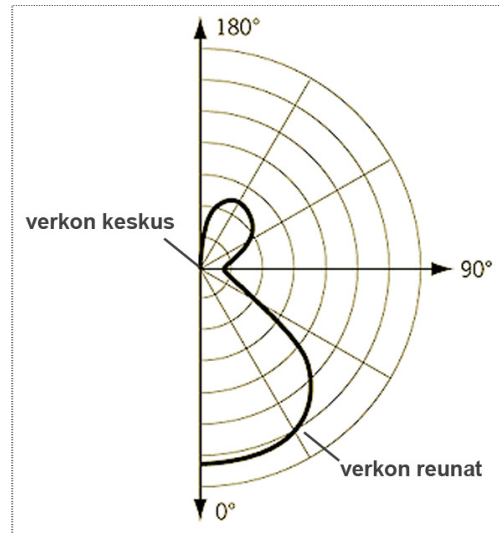
Kun halutaan simuloida aitojen valaisimien lähettämää valoa mahdollisimman realistisesti, on fotometrisissa valoissa käytettävä web-levitystä. Web-levitystä on mahdollista käyttää kaikissa kolmessa perusvalotyypissä. Web-levityksellä varustettu valonlähde säteilee valoa fotometrisen verkon määrittelemällä voimakkuudella.



Kuvio 17. Esimerkki web-levityksestä (Autodesk VIZ 2007 User Reference)

Fotometrinen verkko on kolmiulotteinen esitys valolähteestä lähtevän valovoiman suuruuden vaihteluista eri suunnissa. Fotometrisen verkon kuvan voi esittää kolmiulotteisena kulmadiagrammina. Jos fotometrinen verkko on yhden akselin suhteen symmetrinen, voi sen kuvan esittää myös kaksiulotteisena kulmadiagrammina. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Web Distribution (Photometric Lights); Photometric Webs.)

Fotometrinen verkko sisällä on fotometrinen keskus, joka määrittää myös valonlähteen keskuksen. Jos fotometrisestä keskuksista vedetään suora viiva johonkin fotometrisen verkon reunaan, on tämän viivan pituus suoraan verrannollinen viivan suuntaisen valonsäteen valovoiman suuruuteen. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Photometric Webs.)



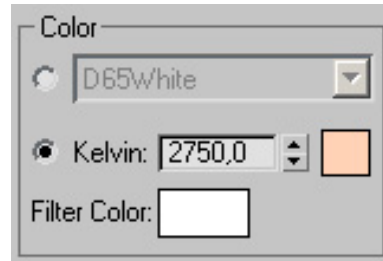
Kuvio 18. Kaksiulotteinen kulmadiagrammi fotometrisestä verkosta (Autodesk VIZ 2007 User Reference)

Valonlähteen web-levityksen tiedot ladataan fotometrisestä tiedostosta. Yleisin fotometrinen tiedostoformaatti on IES, mutta VIZ-ohjelma tunnistaa myös LTLI- ja CIBSE-formaatit. IES-formaattiin perustuvia tiedostoja saa ladattua internetistä esimerkiksi joidenkin valonvalmistajien kotisivuilta. IES-formaatissa fotometrinen data on tallennettu hyvin pienikokoiseen ies-pääätteiseen ASCII-tiedostoon, jonka saa avattua esimerkiksi Windowsin Muistio -ohjelmalla. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Photometric Webs; IES Standard File Format.)

### 3.2.4 Valon väri ja kirkkaus

VIZ-ohjelma määrittää fotometrinen valojen värit värilämpötilan perusteella. Värilämpötila tarkoittaa mustan kappaleen väriä kyseisessä lämpötilassa kelvineinä ilmoitettuna. Valittavissa on 15 erityyppisille valoille valmiiksi määritettyä värilämpötilaa. Halutessaan värilämpötilan voi myös määrittää itse antamalla sille kelvin arvon välillä 1000K-20000K. Joidenkin valonvalmistajien www-sivuilla on ilmoitettu eri lamppujen värilämpötiloja.

Valonlähteen edessä olevaa värillistä suodatinta voi simuloida muokkaamalla valon suodatinväriä. Suodatinvärin voi valita RGB-värikartasta. Täysin valkoinen suodatinväri ei muokkaa alkuperäistä valon väriä.



Kuvio 19: Valonlähteen värilämpötilan ja värisuodattimen säätövalikko

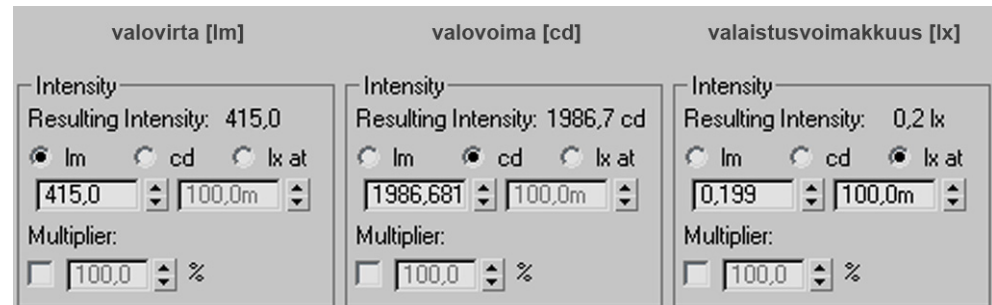
Levitystavan ja värin lisäksi valaistukseen vaikuttaa huomattavasti myös valon kirkkaus. Oikeastaan tässä yhteydessä pitäisi puhua valon voimakkuudesta tai intensiteetistä, koska valon kirkkaus on enemmän riippuvainen katsojan silmästä kuin itse valosta. Puhutaan kuitenkin valon kirkkaudesta, koska se on arkipäiväinen ja helposti ymmärrettävä termi.

Fotometrinen valojen kirkkaus voidaan VIZ-ohjelmassa määrittää kolmen eri suureen perusteella. Valovirrasta puhuttaessa valon kirkkaus määritellään lumenarvona. Lumenarvoksi annetaan valonlähteen valovirran kokonaismäärä (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Intensity/Color/Distribution Rollout). Levitystavan perusteella ohjelma laskee eri suuntiin lähtevän valon kirkkauden. Oikeiden valojen valovirran kokonaismäärä ilmoitetaan usein valojen pakkauksissa tai valonvalmistajien www-sivuilla.

Valon kirkkaus voidaan määrittellä myös valovoiman perusteella. Yleensä valovoima vaihtelee valon säteilysuunnan mukana. Siksi kandela-arvoksi asetetaan aina kyseisen valonlähteen suurin valovoima (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Intensity/Color/Distribution Rollout). Oikeiden valojen kandela-arvoja ei yleensä löydy valojen pakkauksista tai valonvalmistajien www-sivuilta.

Jos valonlähteen kirkkaus määritellään valaistusvoimakkuuden avulla, ilmoitetaan luksiarvon lisäksi matka, jonka päästä kyseinen arvo on mitattu. VIZ-ohjelman ohjeista ei selviä pitäisikö luksiarvo ilmoittaa siitä suunnasta mitattuna, minne valonlähde säteilee kirkkaimmin. Näin voisi kuitenkin

olettaa, koska valovoima ilmoitetaan juuri tällä tavalla. Oikeiden valojen valaistusvoimakkuudet voidaan mitata luksimittarin avulla. Valaistusvoimakkuutta mitattaessa täytyy luksimittarin mittauspää osoittaa suoraan kohti valonlähdetä tarkimman tuloksen saamiseksi.



Kuvio 20. Valonlähteen kirkkaus eri suureilla ilmoitettuna

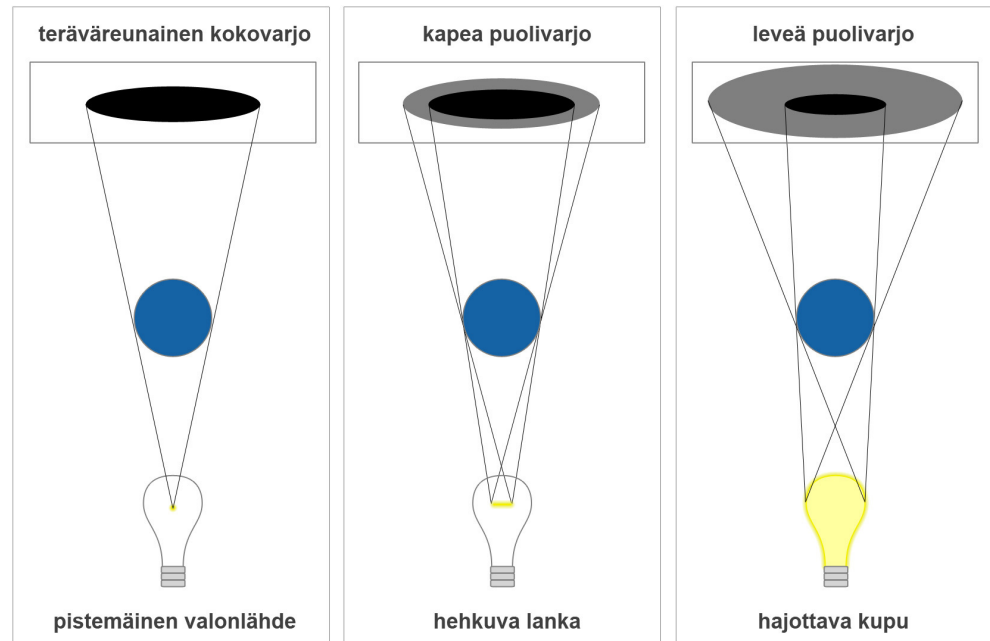
Oikeiden valojen luomaa valaistusta simuloitaessa parhaaseen tulokseen päästään määrittämällä fotometrinen valojen kirkkaus valonvalmistajilta saatujen lumen arvojen perusteella. Aitojen valojen maksimikandela-arvoja ei tunnu olevan saatavilla mistään, ja maksimi luksiarvon mittaaminen aidosta valosta on hankalaa, koska myös mittausetäisyys on mitattava jälkikäteen mittanauhan avulla. Tämän lisäksi muista pinnoista heijastuva epäsuora valaistus saattaa kasvattaa mitattua luksiarvoa.

### 3.2.5 Varjojen asetukset

Valaistuksen simuloinnissa täytyy valojen kirkkauden ja värin lisäksi ottaa huomioon myös niiden luomat varjot. Erityisesti varjon reunan tarkkuus on realismin kannalta oleellista. Kuten luvussa 2.2.2 mainittiin, varjon laatu riippuu valonlähteen koosta. Pistemäinen valonlähde luo aina teräväreunaiset kokovarjot, mutta kaikki sitä suuremmat valonlähteet muodostavat varjojen reunoille sumean puolivarjo alueen.

VIZ-ohjelman fotometriset valot voivat luoda varjoja viidellä eri tekniikalla. Realistisin lopputulos saavutetaan käyttämällä valon suoraviivaiseen kulkuun perustuvaa ray tracing -laskentaa olettaen, että valonlähteen koko on säädetty oikein. Esimerkiksi aidon hehkulampun valonlähde on yleensä noin kahden senttimetrin pituinen kierteinen metallilanka. Hehkulamppu ei siis ole point light -valonlähde vaan linear light -valonlähde, jonka luomat varjot

ovat reunoiltaan hieman pehmeitä. Sitäkin pehmeämpiä varjoja luo hehkulamppu, jonka kupu on valmistettu jostain valonsäteitä hajottavasta läpikuultavasta materiaalista, koska kyseinen lamppu on käytännössä kupunsa muotoinen kolmiulotteinen valonlähde.



Kuvio 21. Hehkulampun kolme eri säteilytapaa

Ray tracing -laskentaa käytetään kolmessa eri varjonluontitekniikassa: ray-traced shadows, advanced ray-traced shadows ja area shadows (Omura, Onstott & McFarland 2006, 354).

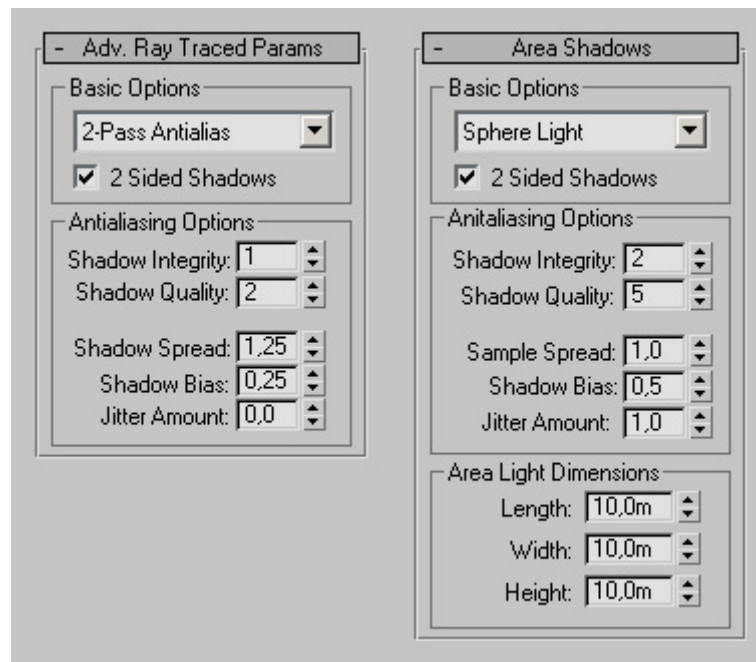
Ray-traced shadows -tekniikka luo aina yksinkertaisia teräväreunaisia varjoja, joiden renderöintiin ei kulu hirveän paljon aikaa. Tämä on paras tekniikka, jos simuloidaan pistemäistä valonlähdettä, joka ei luo puolivarjoja.

Advanced ray-traced shadows -tekniikka toimii periaatteessa samalla tavalla kuin ray-traced shadows -tekniikka, mutta sallii varjoille enemmän muokattavuutta. Valonlähteen koko otetaan huomioon varjoja renderöitäessä, joten linear light ja area light -valonlähteet luovat automaattisesti puolivarjoja. Point light -valonlähteet luovat taas automaattisesti teräväreunaisia varjoja, mutta reunoja voi pehmentää shadow spread -arvoa nostamalla.

Area shadows -tekniikan avulla luodut varjot eivät perustu fotometrisen valonlähteen tyyppiin. Sen sijaan varjojen luontiin käytetään ”virtuaalista” va-

lonlähdettä, jonka koko ja muoto määräävät puolivarjon suuruuden. Muodoksi voidaan valita esimerkiksi suorakulmio, kuusikulmio tai pallo. On tärkeää muistaa, että virtuaalivalonlähteen koko vaikuttaa vain varjoihin. Valon kirkkaus ja levitys määräytyvät aina valonlähteen tyyppin perusteella. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Area Shadows Rollout.)

Periaatteessa area shadows ja advanced ray traced shadows -tekniikoiden ominaisuudet eivät juuri eroa toisistaan. Molemmissa tekniikoissa puolivarjon laatua säädetään kahdella säätimellä. Shadow integrity -säätimen avulla määritetään kuinka paljon varjon piirtämiseen käytetään säteitä. Shadow quality -säätimen avulla määritetään kuinka paljon säteitä käytetään puolivarjon laadun parantamiseen. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Advanced Ray-Traced Parameters Rollout; Area Shadows Rollout.)



Kuvio 22. Advanced ray traced ja area shadows -tekniikoiden säätövalikot

Syvällisempi perehtyminen kaikkien kolmen eri varjonluontitekniikan ominaisuuksiin ei ole tämän työn yhteydessä tarpeellista. Kyse on kuitenkin pelkän suoran valaistuksen luomista varjoista. Myöhemmin käsiteltävä epäsuora valaistus vaikuttaa valaistussimulaation lopputulokseen huomattavasti suoraa valaistusta enemmän.

Hehkulampun simulointiin on parasta käyttää point light- valonlähdettä ja ray-traced shadows -tekniikkaa, jos kyseisen lampun luomat varjot eivät näy

kuvan etualalla. Jos varjot kuitenkin näyttävät liian teräväreunaisilta, voi niiden luontiin käyttää area shadows -tekniikan pallonmuotoista virtuaalivaloa. Noin viiden senttimetrin kokoinen sphere light -virtuaalivalo simuloi hyvin perushehkulampun kupua. Kynttilänvaloa kannattaa simuloida samalla tekniikalla.

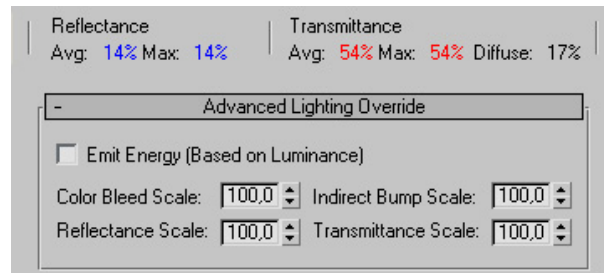
Loisteputken simulointiin kannattaa käyttää linear light -valonlädettä ja advanced ray-traced shadows -tekniikkaa. Kun linear light -valonlähteen pituudeksi asetetaan oikean loisteputken pituus, luo advanced ray-traced shadows -tekniikka automaattisesti oikean kokoiset puolivarjot.

### 3.3 Arkkitehtuuri-materiaalit

#### 3.3.1 Heijastus- ja läpäisysuhde

VIZ-ohjelman fotometrinen valojen tavoin myös arkkitehtuuri-materiaalien säädöt perustuvat fysikaalisiin ominaisuuksiin. Sen takia arkkitehtuuri-materiaaleja suositellaan käytettäväksi yhdessä fotometrinen valojen ja radiositeettilaskennan kanssa realististen valaistussimulaatioiden luontiin (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Architectural Material).

Realistisen valaistussimulaation kannalta on erittäin tärkeää kiinnittää huomiota arkkitehtuuri-materiaalien heijastus- ja läpäisysuhteeseen. Heijastussuhde kertoo, kuinka suuri osa materiaalin pinnalle tulevasta valosta heijastuu takaisin. Läpäisysuhde kertoo vastaavasti, kuinka suuri osa valosta menee pinnan läpi. Juuri nämä suhdeluvut otetaan huomioon, kun epäsuoraa valaistusta simuloidaan radiositeettilaskennan avulla. Materiaalin heijastus- ja läpäisysuhteet muuttuvat automaattisesti materiaalin muita fysikaalisia ominaisuuksia, kuten väriä, läpinäkyvyyttä ja läpikuultavuutta säädettäessä. Lisäksi suhdelukuja pystyy suoraan säätämään advanced lighting override -valikosta käsin. Heijastus- ja läpäisysuhde eivät ole pelkästään arkkitehtuuri-materiaalien ominaisuuksia, vaan ne lasketaan myös perusmateriaaleille.



Kuvio 23. Arkkitehtuuri-materiaalin heijastus- ja läpäisysuhde arvot (Reflectance ja Transmittance) sekä niiden säätimet

Suhdelukuja säädettäessä täytyy ottaa huomioon erilaisten pintamateriaalien ominaisuudet. Esimerkiksi puun heijastussuhde on yleensä huomattavasti pienempi kuin muovin tai metallin. Luksimittarin avulla voidaan mitata aйдolle pinnalle saapuvan valon (valaistusvoimakkuus) ja pinnalta lähtevän valon (valoeksistanssi) arvot. Kuten luvussa 2.4.6 mainittiin, pintamateriaalin heijastus- tai läpäisysuhde saadaan laskettua jakamalla valoeksistanssi valaistusvoimakkuudella.

### 3.3.2 Mallipohjat

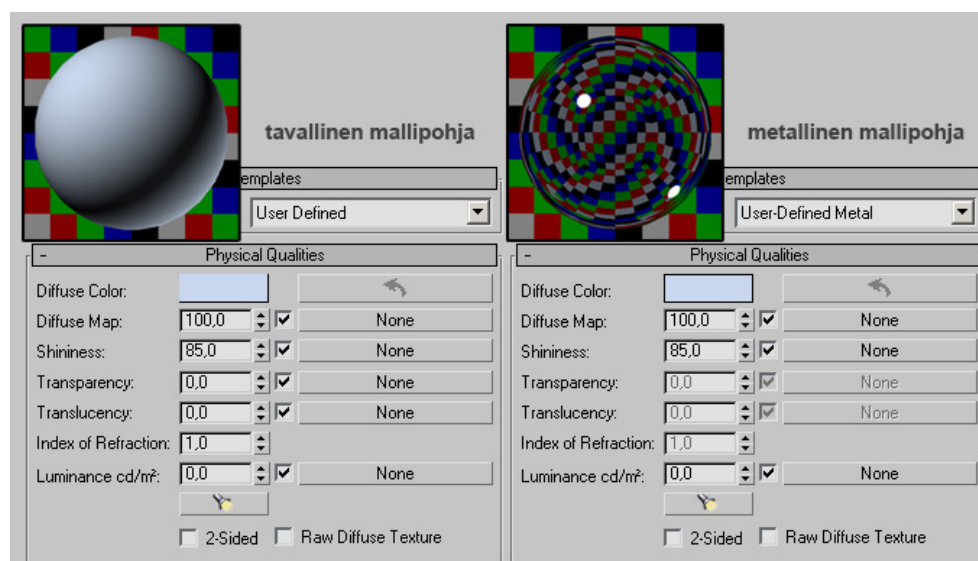
Jos käytössä ei ole luksimittaria, pitää erilaisten pintamateriaalien heijastus- ja läpäisysuhteet määrittää arvioimalla. Suhdelukujen määrittämisessä auttavat arkkitehtuuri-materiaaleille luodut valmiit mallipohjat. Mallipohjassa materiaalin fysikaaliset ominaisuudet on määritetty suunnilleen valitulle pinnalle sopiviksi. Valittavissa on 24 erilaisille pinnoille säädettyä mallipohjaa. Eri-laisia pintoja ovat mm. kangas, muovi, paperi, kivi, vesi ja kirkas lasi. Mallipohjan valinnan jälkeen materiaalin ominaisuuksia voi vielä säätää omien tarpeiden mukaan.

Mallipohja auttaa realistisen pintamateriaalin luonnissa, koska se asettaa suositusrajat materiaalin heijastus- ja läpäisysuhteille. Jos materiaalin heijastus- tai läpäisysuhde ei sovi tietyn mallipohjan suositusrajojen sisään, muuttuu kyseinen suhdeluku punaiseksi tai siniseksi. Punainen kuvaa liian suurta suhdelukua ja sininen liian pientä. Esimerkiksi lakatulle puupinnalle sopiva wood varnished -mallipohja suosittelee heijastussuhdetta 20 % - 50 %. Läpäisysuhteeksi suositellaan luonnollisesti vain 0 %, koska puun pinta ei yleensä ole läpinäkyvä. Eri mallipohjien valmiita säädöksiä voi



muuttaa muokkaamalla `ArchitecturalMaterialTemplates.ini`-tiedostoa. Tiedosto sijaitsee VIZ-ohjelman pääkansion alla olevassa `plugcfg`-kansiossa.

Metalliset pinnat heijastavat valoa täysin eri tavalla kuin muut pinnat. Tämä johtuu metallin sähköisen varauksen vaikutuksesta valoaaltoihin. (Linkoaho & Valjakka 1982, 160.) Ilmiön selittämisessä valon liike käsitetään aaltomaiseksi, mutta VIZ-ohjelma ymmärtää valon vain suoraviivaisesti liikkuvina hiukkasina. Ilmeisesti tämän takia on VIZ-ohjelmassa jouduttu luomaan metallipinnoille täysin omalaatuinen arkkitehtuuri-materiaali mallipohja. Metalleille ja peilille tarkoitettujen mallipohjien ominaisuudet eroavat huomattavasti muiden mallipohjien ominaisuuksista. Näiden mallipohjien yhteydessä materiaalien läpinäkyvyys, läpikuultavuus ja taittokerroin arvot eivät ole säädettävissä. Tämä johtuu siitä, että luonnossa metalli ei koskaan ole läpinäkyvää (Linkoaho & Valjakka 1982, 160). Metal- ja mirror-mallipohjilla materiaalit heijastavat valoa oikeita metalleja muistuttavalla tavalla.

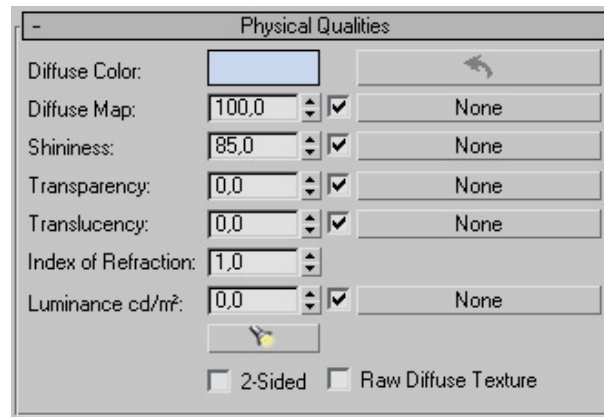


Kuvio 24. Mallipohjan vaikutus materiaalin ulkonäköön

### 3.3.3 Fysikaaliset ominaisuudet

Arkkitehtuuri-materiaalien säädettävissä olevat fysikaaliset ominaisuudet näyttävät melko yksinkertaisilta verrattuna perusmateriaalien vastaaviin ominaisuuksiin. Nämä ominaisuudet vaikuttavat heijastus- ja läpäisy-suhteen

lisäksi 3d-mallin renderöintien visuaaliseen ulkoasuun eli pintojen väriin, kiiltävyyteen ja läpinäkyvyyteen.



Kuvio 25. Arkkitehtuuri-materiaalin fysikaalisten ominaisuuksien säätövalikko

Materiaalin pinnan värin voi määrittää joko yhdellä värillä tai monivärisellä kartalla. Diffuse color -värin on tarkoitus kuvastaa materiaalin väriä ”hyvässä” valaistuksessa (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Diffuse Color). Arkkitehtuuri-materiaalin väri ”huonossa” eli erittäin kirkkaassa tai himmeässä valossa säädetään automaattisesti diffuse color -värin pohjalta. Diffuse map -kartaksi voi valita jonkin VIZ-ohjelman omista karttakuvioista tai vapaamuotoisen bittikarttakuvan. Realistisin lopputulos saavutetaan yleensä käyttämällä materiaalin värin määrittämiseen aidosta valokuvasta muokattua kuvatiedostoa. Kun diffuse map -kartan arvona on 100, diffuse color -värillä ei ole suoranaista merkitystä. Täytyy kuitenkin muistaa, että diffuse color -väri vaikuttaa epäsuoran valaistuksen color bleeding -ilmiöön. Radiositeetti toiminto siis määrittää pinnoilta kimpoavan epäsuoran valon värin materiaalin diffuse color -värin perusteella. Diffuse color -värin saa automaattisesti vastaamaan diffuse map -kartan keskimääräistä väriä painamalla väripainikkeen vieressä olevaa nuolipainiketta. (Omura ym. 2006, 432.)

Color bleeding -ilmiön voimakkuutta voi säätää advanced lighting override -valikosta käsin. Tämä säädös vaikuttaa myös materiaalin heijastus- ja läpäisy-suhteeseen ja heikentää lopullisen kuvan fysikaalista aitoutta. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Advanced Lighting Override Rollout.)

Kun arkkitehtuuri-materiaalin väriarvoa säädetään mahdollisimman aidon näköiseksi, ei omiin silmiin aina kannata luottaa. Esimerkiksi päivänvalossa kirkkaan valkoiselta näyttävää seinää simuloivan materiaalin väriä ei voi

asettaa täysin valkoiseksi, koska silloin materiaalin heijastussuhde olisi aivan liian suuri (100 %). Jos aito seinä on maalattu esimerkiksi valkoisella mattamaalilla, kannattaa arkkitehtuuri-materiaalille valita paint flat -mallipohja, jonka heijastussuhteen suositusyläraja on 80 %. Tämä heijastussuhde saavutetaan, kun materiaalin väriksi asetetaan RGB-väriarvo 203, 203, 203. Materiaali näyttää esikatseluikkunassa vaalean harmaalta, mutta lopullisessa renderöinnissä sen voi säätää näyttämään valkoiselta exposure control -toiminnon avulla.

Loput neljä arkkitehtuuri-materiaalien fysikaalista ominaisuutta vaikuttavat toisiinsa ja pinnan ulkonäköön uskomattoman sekavalla tavalla. VIZ-ohjelman ohjetiedostossa näitä ominaisuuksia ei ole kyetty selittämään riittävän selvästi, jotta niiden toiminnasta löytäisi edes jonkinlaista logiikkaa. Kyseiset ominaisuudet ovat shininess, transparency, translucency ja index of refraction. Ominaisuudet ovat niin riippuvaisia toisistaan, että on selvempää käydä läpi erilaiset pintatyylit ja selittää, miten kyseisen pinnan saa luotua näitä ominaisuuksia säätelemällä.

Läpinäkyvä pinta läpäisee valoa hajaannuttamatta sitä eri suuntiin. Arkkitehtuuri-materiaalin läpinäkyvyyttä säädetään pääasiassa transparency-arvon avulla. Valon taittuminen säädetään tarvittaessa materiaalin taitekertoimen eli index of refraction -arvon avulla. Jos materiaali taittaa valoa, tarvitsee läpinäkyvyyden luomiseksi nostaa myös shininess-arvoa. Muuten materiaali näyttää läpikuultavalta ja mustalta.

Aito läpikuultava pinta ei välttämättä ole musta. Se läpäisee valoa ja hajaannuttaa sen samalla eri suuntiin, niin ettei pinnan takana olevia kappaleita pysty hahmottamaan selvästi. Arkkitehtuuri-materiaalin läpikuultavuutta säädetään translucency-arvon avulla. Muut arvot eivät vaikuta materiaalin läpikuultavuuteen.

Pinnan kyky heijastaa valoa riippuu sen tasaisuudesta. Arkkitehtuuri-materiaalin heijastusominaisuuksia säädetään shininess ja index of refraction -arvojen avulla. On erittäin outoa, että taitekertoimen eli index of refraction -arvon avulla säädetään materiaalin heijastusominaisuuksia. Fysiikan oppien mukaan näillä kahdella asialla ei pitäisi olla mitään tekemistä keskenään. Joka tapauksessa kun index of refraction -arvoa kohotetaan, materiaalin kyky heijastaa valoa kasvaa ja materiaali alkaa näyttää kiiltävämmältä.

Shininess-arvon avulla materiaalin heijastuskykyä ja kiiltävyyttä voidaan säätää vielä lisää. Shininess-arvo vaikuttaa heijastuksen peilimäisyyteen ja kiiltopisteiden kokoon. Jos index of refraction -arvo on 1,0, ei shininess-arvolla ole mitään merkitystä. VIZ-ohjelman ohjeista ei selviä, mihin fysikaalisiin ominaisuuksiin nämä heijastusta säätelevät arvot perustuvat. Vaikka molemmat arvot säädetään maksimiin, ei materiaalin heijastus ole lähelläkään aidon peilin heijastusta. Jos halutaan simuloida aitoa peiliä, täytyy materiaalille valita metal- tai mirror-mallipohja.

Kuten edellä mainittiin, metal- tai mirror-mallipohjan valinta vaikuttaa huomattavasti arkkitehtuuri-materiaalin tapaan heijastaa valoa. Silloin arkkitehtuuri-materiaalien fysikaaliset ominaisuudet muuttuvat huomattavasti yksinkertaisemmiksi. Pinnan värin ja värikartan lisäksi ainoa säädettävä ominaisuus on shininess-arvo. Tässä yhteydessä vaikuttaa siltä, että shininess-arvo simuloi pinnan tasaisuutta periaatteella: mitä korkeampi arvo sitä tasaisempi pinta. Arvon ollessa 100 tapahtuu täydellinen peiliheijastus, ja materiaali muistuttaa aitoa peiliä.

Taulukko 3. Arkkitehtuuri-materiaalin ominaisuuksien vaikutus pinnan ulkonäköön

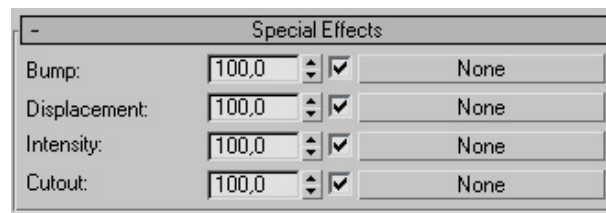
| MATERIAALIN<br>OMINAISUUS | PINTA      |               |                 |                |
|---------------------------|------------|---------------|-----------------|----------------|
|                           | Läpinäkyvä | Läpikuultava  | Peiliheijastava | Hajaheijastava |
| Template-mallipohja       | ei metal   | ei metal      | metal           | ei metal       |
| Shininess-arvo            | suuri      | vapaa valinta | suuri           | pieni          |
| Transparency -arvo        | suuri      | pieni         |                 | 0              |
| Translucency -arvo        | pieni      | suuri         |                 | 0              |
| IOR -arvo                 | yli 1.0    | vapaa valinta |                 | pieni          |

Kokonaisuutta ajatellen VIZ-ohjelman arkkitehtuuri-materiaaleilla on melko yksinkertaiset, mutta epäloogisesti toimivat ominaisuudet. Kaikki ominaisuuden eivät myöskään ole fysikaalisia, vaikka VIZ-ohjelman ohjetiedostossa niin väitetäänkin. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Architectural Material; Material Type; Material Components.) Onneksi epäloogiset ominaisuudet vaikuttavat vain materiaalien visuaaliseen ilmenemiseen. Valaistutkimuksen kannalta oleellimmat ominaisuudet, eli heijastus- ja läpäisysuhde sekä läpinäkyvän valon taitekerroin, ovat helposti säädettävissä. Luotettavin valaistussimulaatio saavutetaan käyttämällä mallissa yksinkertaisia värittömiä materiaaleja (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Ra-

diosity Workflows). Epäloogisista ominaisuuksista huolimatta arkkitehtuuri-materiaalien avulla pystytään simuloimaan melkein kaikkia oikeita pintamateriaaleja (Omura ym. 2006, 430).

### 3.3.4 Erikoistehosteet

Arkkitehtuuri-materiaaleihin voi lisätä tiettyjä erikoistehosteita, jotka parantavat materiaalien visuaalista ilmettä. Tehostekarttojen hillitty käyttö voi luoda materiaaleista aidomman näköisiä.



Kuvio 26. Arkkitehtuuri-materiaalin erikoistehosteiden säätövalikko

Materiaalin pinnassa olevia kohoumia voi simuloida bump-kartan avulla. Bump-kartta saa materiaalin pinnan näyttämään epätasaiselta, mutta se ei oikeasti muokkaa kappaleiden geometriaa. Bump-kartan voimakkuutta epäsuorassa valaistuksessa saa muokattua advanced lighting override -valikosta. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Special Effects Rollout; Advanced Lighting Override Rollout.)

Realistisen valaistussimulaation kannalta on parempi käyttää epätasaisuuksien luomiseen displacement-karttaa. Se muokkaa kappaleiden geometriaa ja vaikuttaa näin ollen myös kappaleista lähtevään epäsuoraan valaistukseen (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Special Effects Rollout). Displacement-kartta saattaa kuluttaa huomattavasti enemmän laskenta-aikaa bump-karttaan verrattuna. Siksi pienet kohoumat kannattaa ajan säästämiseksi simuloida bump-kartan avulla.

Arkkitehtuuri-materiaalin pinnan kirkkautta voi säätää intensity-kartan avulla. Intensity-kartta voi olla hyödyllinen, jos materiaali näyttää luonnottoman täydelliseltä eli toisin sanoen liian selvästi tietokoneella luodulta. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Special Effects Rollout.)

Cutout-kartta tekee materiaalista osittain läpinäkyvän. Kartan mustat osat leikkaantuvat kokonaan pois materiaalista, ja harmaat osat muuttuvat läpinäkyviksi. Cutout-karttaa käytettäessä on syytä huomioida, että se voi vaikuttaa materiaalin heijastus- ja läpäisyysuhteeseen.

### 3.3.5 Materiaali valonlähteenä

Arkkitehtuuri-materiaaleja voidaan käyttää valonlähteinä säätämällä niiden luminance  $\text{cd/m}^2$  -arvoa korkeammaksi. Luminance  $\text{cd/m}^2$  -arvon voi myös valita suoraan haluamastaan fotometrisestä valosta. Tämä voi olla hyödyllistä, jos halutaan simuloida erikoisen muotoisten valojen luomaa valaistusta. Valonlähteestä voidaan tehdä geometrinen malli, jolle asetetaan valaiseva arkkitehtuuri-materiaali. Esimerkiksi kuvion 27 neonvalo pystyttäisiin luomaan tällä menetelmällä.

Jotta materiaali myös valaisee 3d-mallia eikä ainoastaan näytä kirkkaalta, täytyy advanced lighting override -valikosta asettaa päälle emit energy (based on luminance) -asetus. Lisäksi renderöinnissä pitää käyttää radiositeettilaskentaa. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Advanced Lighting Override Rollout.)



Kuvio 27. Erikoisen muotoinen neonvalaisin (Cocktail © Touchstone Pictures)

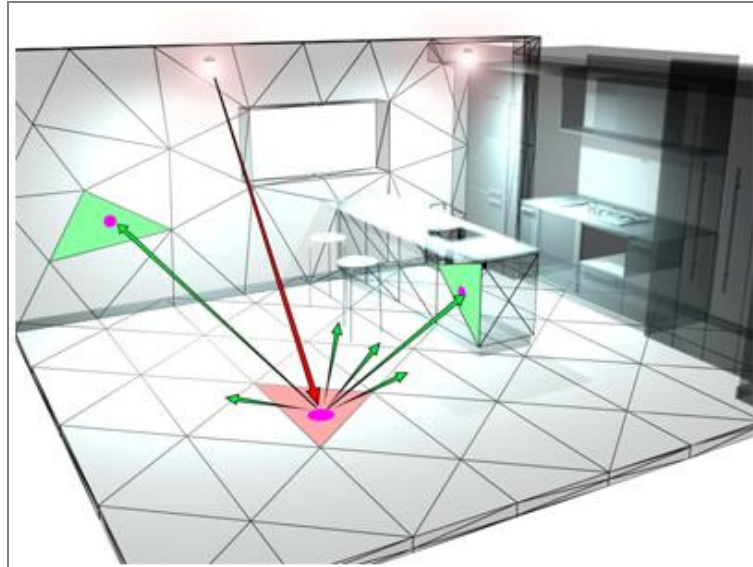
### 3.4 Radiositeetilaskenta

#### 3.4.1 Toimintaperiaate

Aitoa valaistusta simuloitaessa lopullinen renderöity kuva muodostuu fotometristen valojen ja arkkitehtuuri-materiaalien välisestä vuorovaikutuksesta. Ray tracing -laskenta määrittää kuvan värit pintamateriaalin ja pintaan osuvien valojen ominaisuuksien perusteella. Se osaa myös ottaa huomioon valon heijastumisen peilimäisistä pinnoista sekä valon taittumisen läpinäkyvistä pinnoista. Se ei kuitenkaan huomioi eri pintojen välistä valaistusta. Tätä epäsuoraa valaistusta pystytään simuloimaan esimerkiksi photon map -tekniikan tai radiositeetilaskennan avulla.

Radiositeetilaskenta simuloi valon vuorovaikutusta ympäristön kanssa. Toisin sanoen se laskee valon vaikutuksen kaikille 3d-mallin pinnoille ja pintojen vaikutuksen valolle. Kun valo osuu pintaan, se nostaa pinnan kirkkautta. Samalla pinta absorboi osan valosta ja laskee valon kirkkautta. Ennen laskentaa pinnat jaetaan pienempiin osiin eli elementteihin paremman tarkkuuden saavuttamiseksi. Sen jälkeen lasketaan elementtien välillä tapahtuvan valon levityksen määrä. Määrää laskettaessa otetaan huomioon valon kirkkaus ja väri sekä materiaalin heijastus- ja läpäisyysuhde. Lasketut radiositeetti arvot tallennetaan erikseen jokaiseen elementtiin. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Modeling Global Illumination With Radiosity.)

Elementteihin tallennettujen arvojen avulla mallin voi renderöidä uudelleen eri kuvakulmista ilman uutta radiositeetilaskentaa. Arvot säilyvät elementeissä myös tiedoston sulkemisen jälkeen, sillä ne voidaan tallentaa suoraan max-tiedostoon 3d-mallin geometrian mukana. Monimutkaisissa 3d-malleissa radiositeetilaskennan tietojen tallennus saattaa kasvattaa max-tiedoston kokoa jopa sadoilla megatavuilla. Tiedoston tallentamiseen voi silloin kulua useita kymmeniä sekunteja, joten VIZ-ohjelman automaattitallennus kannattaa kytkeä pois päältä ennen radiositeetilaskennan aloittamista.



Kuvio 28. Radiositeetilaskennan toimintaperiaate (Autodesk VIZ 2007 User Reference)

Radiositeetilaskenta ja ray tracing -laskenta täydentävät toisiaan. Vaikka radiositeetilaskenta ottaa huomioon valon heijastumisen ja taittumisen, ei sen avulla pysty luomaan peiliheijastus- tai läpinäkyvyysefektejä. Ray tracing -laskenta pystyy luomaan näiden efektien lisäksi myös huomattavasti tarkempia varjoja. Parhaan laadun saavuttamiseksi VIZ-ohjelman scanline renderöinti luo kuvan molempien laskentatekniikoiden avulla, mutta pintojen luminanssi ja valaistusvoimakkuus määritetään pelkällä radiositeetilaskennalla. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Modeling Global Illumination With Radiosity.)

#### 3.4.2 Radiositeettiverkon jakaminen

Kun 3d-mallin pinnat jaetaan radiositeetilaskennan alussa pienempiin elementteihin, muodostuu kyseisistä elementeistä radiositeettiverkko, jonka tiheys vaikuttaa valaistuksen yksityiskohtaisuuteen. Yleiskuvan saamiseksi ei verkkoa tarvitse muodostaa ollenkaan. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Radiosity Meshing Parameters Rollout.)

Ennen tarkempaa perehtymistä radiositeettiverkon laskentamenetelmiin, on syytä selittää VIZ-ohjelman kolmiulotteisen avaruuden eri käsitteiden merkitykset:

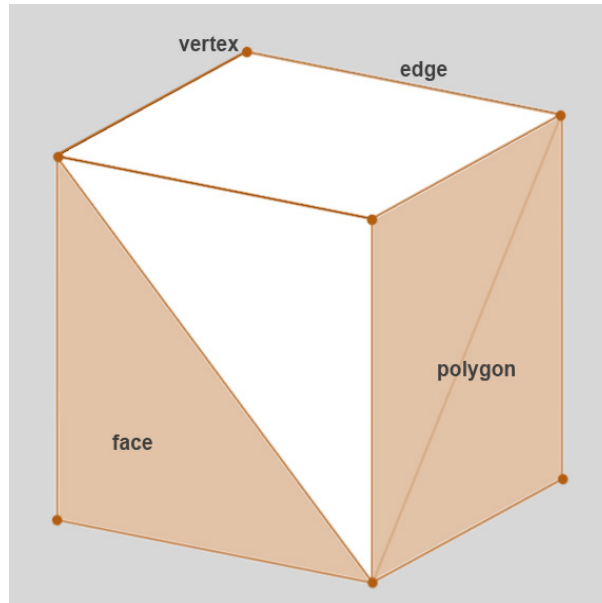


*vertex* - yksittäinen piste 3d-avaruudessa

*edge* - kahden vertex-pisteen välinen viiva

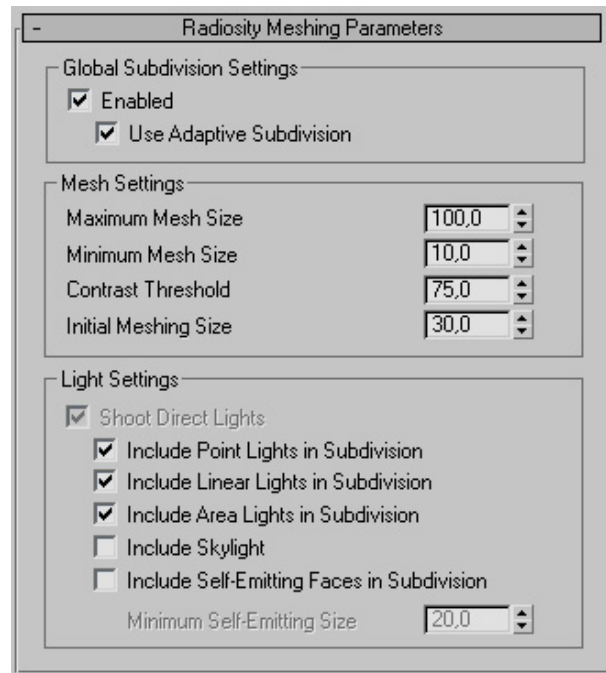
*face* - kolmen vertex-pisteen määräämä taso

*polygon* - kolmen tai useamman edge-reunan muodostama suljettu monikulmio



Kuvio 29. Kolmiulotteisen avaruuden käsitteet

Radiositeettiverkon elementtien kokoa säädelään radiosity meshing parameters -valikosta. Koon määrittämiseen käytetään oikeita mittayksiköitä. Jos radiositeettiverkko jaetaan kauttaaltaan samansuuruisiin elementteihin, määritetään elementtien koko max mesh size -arvon avulla.



Kuvio 30. Radiositeettiverkon jaon säätövalikko

Parhaan laadun saavuttamiseksi kannattaa käyttää adaptive subdivision -menetelmää, joka jakaa verkon erisuuruisiin elementteihin kontrastierojen perusteella. Suurimpien ja pienimpien elementtien koot määritellään max mesh size ja min mesh size -arvojen avulla. Verkon jakaminen tapahtuu seuraavan mallin mukaan:

1. *Kaikki 3d-mallin pinnat jaetaan max mesh size -arvon kokoi-  
siin elementteihin.*
2. *Lasketaan kuinka paljon 3d-mallin valonlähteet valaisevat  
verkon eri vertex-pisteitä.*

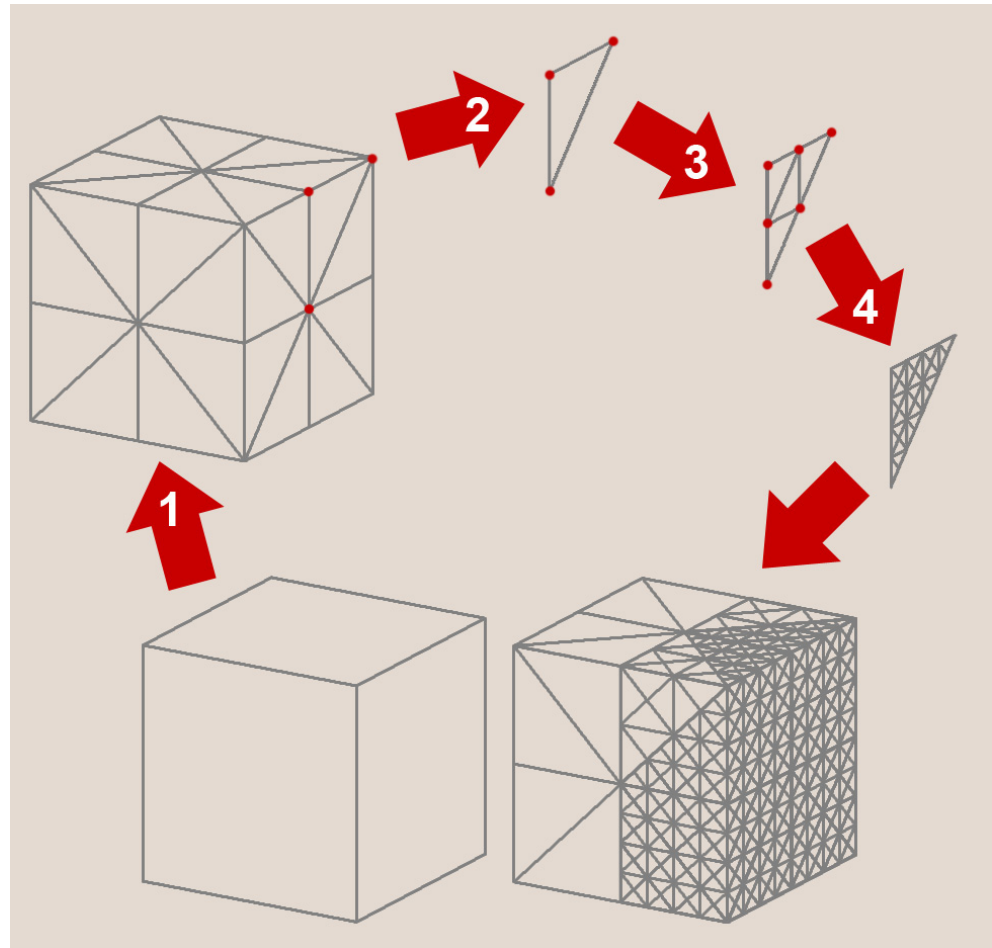
Valot joiden luomaa suoraa valaistusta käytetään laskennassa, valitaan light settings -valikosta.

3. *Tarkastetaan elementtien vertex-pisteiden saama valaistus.  
Jos saman elementin vertex-pisteiden valaistusarvot eroavat toi-  
sistaan liikaa, jaetaan kyseinen elementti pienempiin osiin.*

Elementin vertex-pisteiden välillä sallittu valaistuksen kontrasti määritetään prosentuaalisesti contrast treshold -arvon avulla. Jos vertex-pisteiden välillä oleva valaistuksen kontrasti ylittää contrast treshold -arvon määrittämän kynnyksen, elementti jaetaan pienempiin osiin.

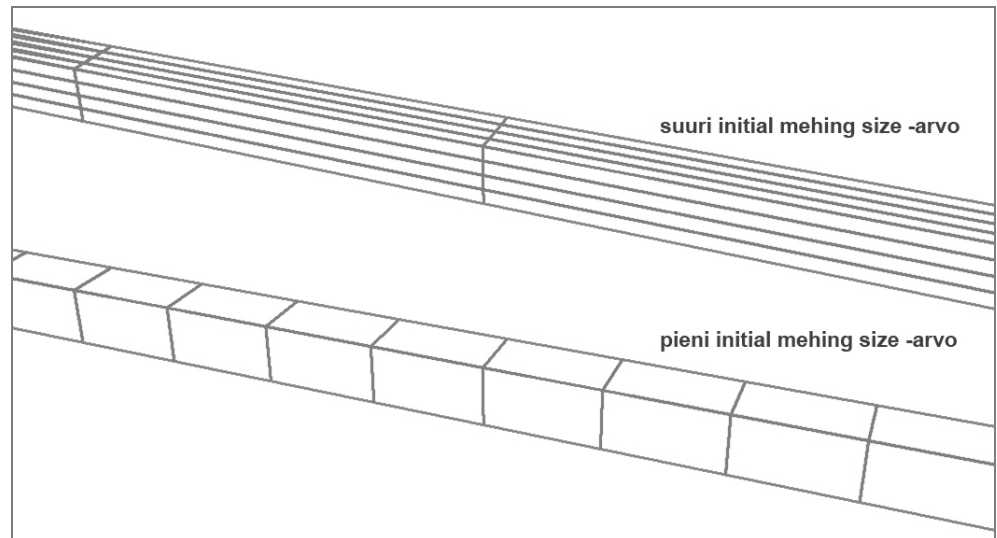
4. Näille pienemmille osille tehdään sama tarkastus ja mahdollinen osajako kunnes saavutetaan min mesh size -arvon määrittämä alaraja.

(Autodesk VIZ 2007 User Reference: Radiosity Meshin Parameters Rollout.)



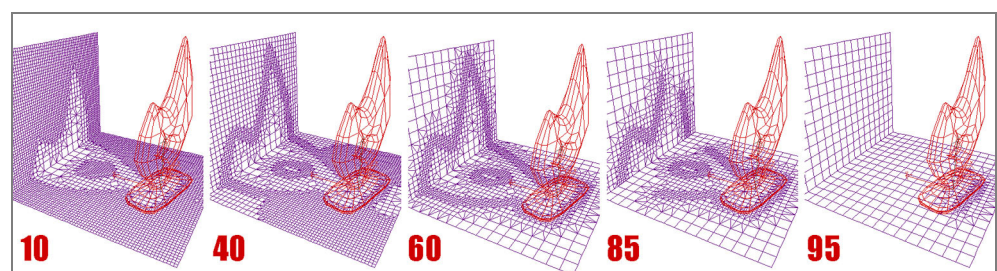
Kuvio 31. Adaptive subdivision -menetelmä

Initial mesh size -arvon avulla määritetään kuinka isoja elementit voivat olla, jotta niiden muotoja paranneltaisiin verkon muodostuksen aikana. Jos elementin koko on suurempi kuin initial mesh size -arvo, kyseisen elementin muotoa parannellaan tarvittaessa. Muotoa parannellaan, jos elementin reunat ovat huomattavan eripituiset, eli elementti on pitkulaisen muotoinen. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Radiosity Meshin Parameters Rollout.)



Kuvio 32. Initial meshing size -arvon vaikutus radiositeettiverkon jakoon

Parhaan lopputuloksen saamiseksi kannattaa radiositeettiverkon jakamiseen käyttää adaptive subdivision -menetelmää. Tarkoituksena on keskittää verkon tiheimmät kohdat kappaleiden muodostamien varjojen reunoille, kuten kuvion 33 keskimmaisessä jaossa on tapahtunut. Contrast treshold -arvoa kannattaa usein laskea, sillä vakioasetuksena oleva 75,0 on melko suuri. Verkko joudutaan yleensä jakamaan useaan kertaan eri arvoilla ennen kuin saavutetaan haluttu lopputulos. Sen takia muut radiositeetilaskennan arvot, kuten initial quality, kannattaa asettaa nolulle verkon jakamisen ajaksi. Kun verkko on saatu jaettua sopivan kokoisiin elementteihin, voidaan alkaa muokkaamaan varsinaisen laskennan asetuksia.

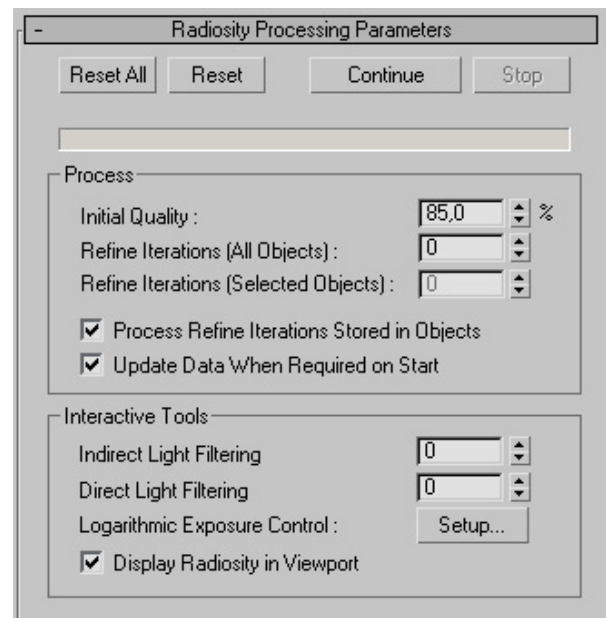


Kuvio 33. Contrast treshold -arvon vaikutus radiositeettiverkon jakoon (Autodesk VIZ 2007 User Reference)

### 3.4.3 Laskentaprosessi

Kun 3d-malli on jaettu elementteihin, on aika ruveta laskemaan elementtien välistä valaistusta. Laskenta tapahtuu lähettämällä mallin valonlähteistä säteitä eri suuntiin. Säteiden lähtösuunnat riippuvat valonlähteen tyypistä ja valonlevitystavasta. Säteiden kokonaismäärä riippuu mallin pintojen määrästä ja niiden keskimääräisestä heijastussuhteesta. Säteet jakautuvat valonlähteiden kesken niiden kirkkauden perusteella. Mitä kirkkaampi valonlähde, sitä enemmän säteitä lähetetään. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: How Radiosity Works in Autodesk VIZ; Radiosity Processing Parameters Rollout.)

Valonsäteet kimpoilevat satunnaisesti mallin elementtien välillä ja luovuttavat energiaa joka osumalla. Luovutetun energian perusteella määritetään pintojen valaistusvoimakkuus. Tätä satunnaista energian levitystä jatketaan kunnes saavutetaan initial quality -arvon määräämä laadutase. Laadulla tarkoitetaan valoenergian levityksen paikkansapitävyyttä, ei mallin visuaalista laatua. Initial quality on laskentaprosessin ensimmäinen vaihe. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: How Radiosity Works in Autodesk VIZ; Radiosity Processing Parameters Rollout.)



Kuvio 34. Radiositeetilaskennan laadun säätövalikko

Laskentaprosessin ensimmäisen vaiheen aikana valonsäteet siis kimpoilevat satunnaisesti elementtien välillä. Satunnaisuudesta johtuen osa elementeistä

ei välttämättä saa yhtä paljon osumia muihin verrattuna. Nämä elementit eivät valaistu kunnolla vaan näyttävät ympäristöään tummemmilta. Näiden tummentumien poistoa varten on kehitetty laskentaprosessin toinen vaihe. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: How Radiosity Works in Autodesk VIZ; Radiosity Processing Parameters Rollout.)

Toisen vaiheen aikana valoa ei lähetetä, vaan sitä kerätään ympäristöstä jokaisen eri elementin pinnalle. Tämä lievittää mallissa olevia kirkkauseroja. Valonkeräyskerrat määritetään refine iterations -arvolla. Halutessaan keräyksen voi tehdä vain sitä eniten tarvitseville kappaleille. Toinen vaihe vaikuttaa sekä valaistusarvojen tarkkuuteen että mallin visuaaliseen ilmeeseen. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: How Radiosity Works in Autodesk VIZ; Radiosity Processing Parameters Rollout.)

Valaistussimulaatioita tehtäessä ensimmäisen vaiheen initial quality -arvo kannattaa asettaa mahdollisimman suureksi. Toista vaihetta kannattaa käyttää valaistuksen kannalta tärkeiden pintojen tarkentamiseen.

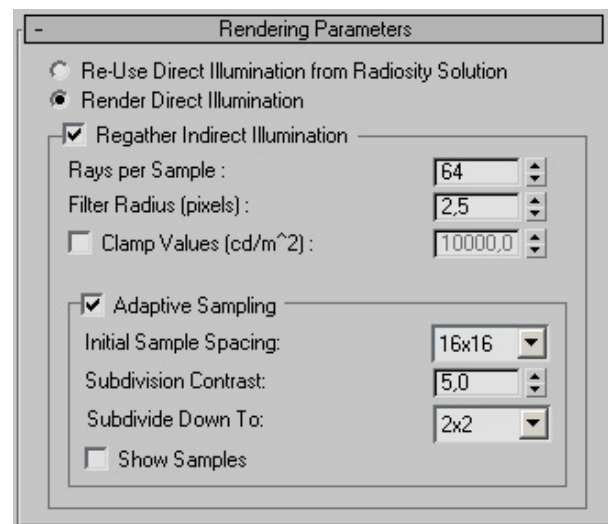
Kun halutaan vain renderöidä aidon näköisiä kuvia, riittää ensimmäiseen vaiheeseen noin 80 % initial quality -arvo. Ajan säästämiseksi voi initial quality -arvon laskea myös noin 60 % ja käyttää pintojen pehmentämiseen interactive tools -valikon valosuodattimia. Ne vähentävät pintojen laikkuutta sekoittamalla vierekkäisten elementtien arvoja keskenään. Tämä heikentää kuitenkin kuvan tarkkuutta eikä siksi sovellu kaikille 3d-malleille. Toisen vaiheen refine iterations -arvoa kannattaa nostaa kappaleille, jotka näyttävät luonnottoman kirkkailta tai tummilta.

Jos kuva näyttää vielä ensimmäisen ja toisen vaiheenkin jälkeen huonolta, saattaa ongelma johtua 3d-mallin topologiasta. Tämä ongelma ilmenee valon tai varjojen ”vuotamisena” pintojen lävitse. Ongelman voi korjata laskentaprosessin kolmannen vaiheen avulla. Kolmas vaihe suoritetaan vasta renderöinnin yhteydessä. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: How Radiosity Works in Autodesk VIZ.)

### 3.4.4 Renderöinti

Renderöinnissä Autodesk VIZ yhdistää ray tracing -laskennalla ja radiositeettilaskennalla saadut valaistustiedot samaan kaksiulotteiseen kuvaan. Halutessaan voi kuvan renderöidä myös pelkän radiositeettilaskennan tietojen perusteella. Silloin suoran valaistuksen laskentaan käytetään radiositeettiverkon luonnin aikana saatuja valaistustietoja. Varjojen laatu riippuu silloin pelkästään verkon tiheydestä. Realistisin lopputulos saadaan käyttämällä molempia laskentamenetelmiä.

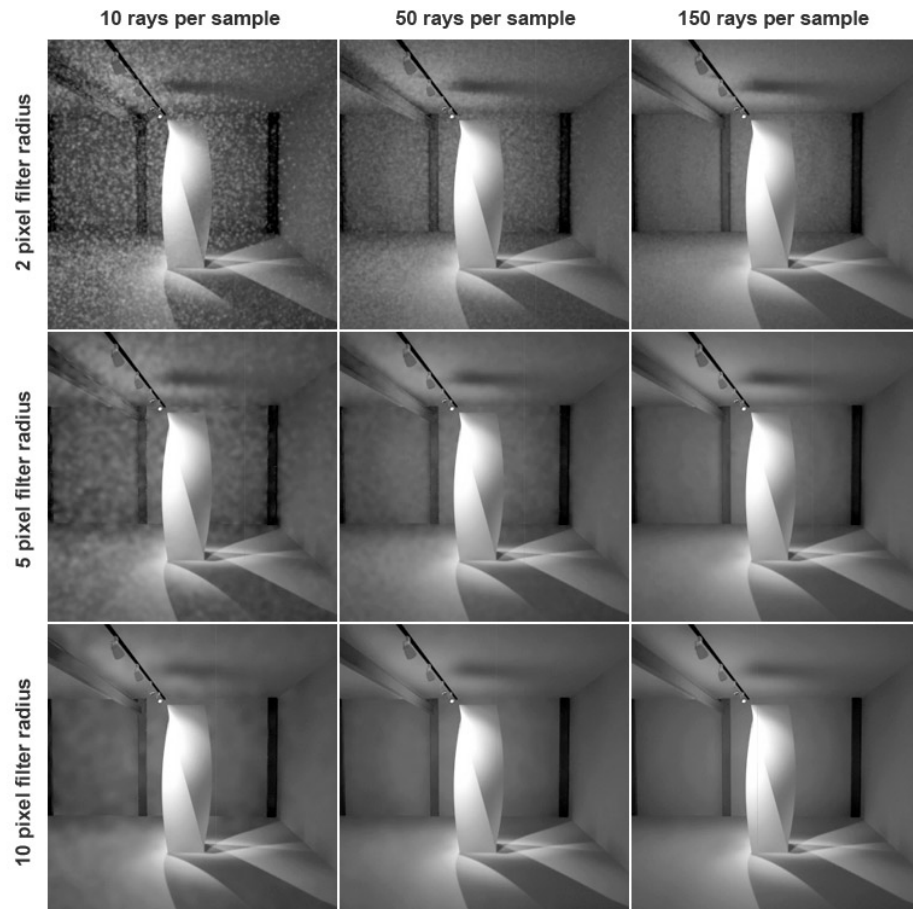
Renderöinnin yhteydessä on mahdollisuus parantaa kuvan laatua käyttämällä laskentaprosessin kolmatta vaihetta eli regather indirect illumination -toimintoa. Toisen vaiheen aikana ympäristöstä kerättiin valaistustietoa radiositeettiverkon elementeille. Kolmannessa vaiheessa samanlaista valaistustietoa kerätään renderöidyn kuvan pikseleille.



Kuvio 35. Radiositeettilaskennan renderöintiasetusten säätövalikko

Kolmas vaihe poistaa kuvasta viimeisetkin valaistusvirheet ja puutteelliset varjot. Se simuloi parhaiten ympäristön luonnollista valaistusta ja valitettavasti myös kasvattaa renderöintiäikää erittäin paljon. (Omura ym. 2006, 522.) Regather indirect illumination -toiminto on riippuvainen enimmäkseen radiositeettiverkosta. Laskentaprosessin aikaisemmat vaiheet eivät vaikuta lopputulokseen yhtä paljon kuin radiositeettiverkon tiheys. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Rendering Parameters Rollout (Radiosity).)

Rays per sample -arvo määrittää, kuinka paljon säteitä käytetään valaistuksen laskemiseen yhdelle pikselille. Suurempi arvo lisää pikselin värin paikansapitävyyttä. filter radius (pixels) -arvo määrittää, kuinka suurelta alueelta pikselit sekoitetaan keskenään. Pikseleiden sekoitus auttaa poistamaan kuvan rakeisuutta. Molempien arvojen korotus kasvattaa renderöintiäikää. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Rendering Parameters Rollout (Radiosity).)



Kuvio 36. Rays per sample ja filter radius -arvojen vaikutus renderöintiin (Autodesk VIZ 2007 User Reference)

Renderöintiäikää saa alennettua käyttämällä adaptive sampling -menetelmää. Sen avulla säteitä käytetään laskemaan valaistus ensin laajemmille alueille. Jos alueet eroavat toisistaan liikaa, jaetaan ne pienempiin osiin. Tämä menetelmä toimii täysin samalla periaatteella kuin radiositeetti-verkon jakamiseen käytetty adaptive subdivision. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Rendering Parameters Rollout (Radiosity).)

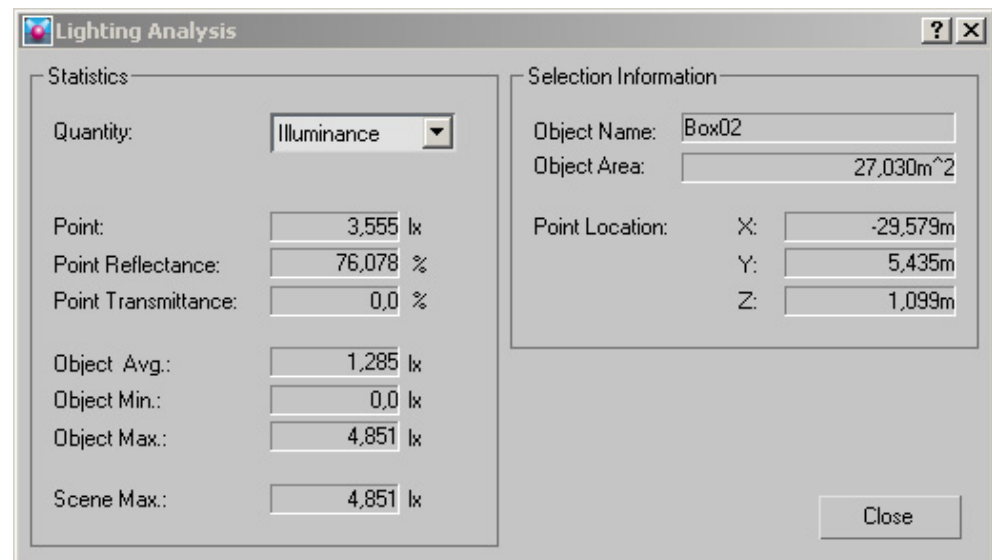


Clamp values ( $\text{cd/m}^2$ ) -arvon avulla voi asettaa mallin pinnoille luminanssiarvon ylärajan, jonka ylittyessä regather indirect illumination -toimintoa ei enää käytetä. Määritetyn rajan avulla voidaan ehkäistä kirkkaiden täplien syntymistä. Oikean arvon määrittäminen vaatii syntyneiden täplien kirkkaiden mittaamista. Kirkkauden voi tarvittaessa mitata suoraan mallista lighting analysis -työkalun avulla. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Rendering Parameters Rollout (Radiosity).)

### 3.5 Valaistuksen analysointi ja muokkaus

#### 3.5.1 Lighting analysis -työkalu

Kun radiositeettilaskenta on suoritettu halutulla tarkkuudella, voidaan 3d-mallista kerätä valaistustietoja lighting analysis -työkalun avulla. Tietojenkeruu tapahtuu yksinkertaisesti osoittamalla 3d-mallissa jonkin kappaleen tiettyä kohtaa, jolloin osoitetun kappaleen ja kohdan valaistustiedot ilmestyvät ikkunaan.



Kuvio 37. Lighting analysis -työkalu valaistusvoimakkuuden (Illuminance) ja luminanssin (Luminance) mittaamiseen

Näkyviin saa sekä pinnalle saapuneen valon valaistusvoimakkuuden [lx] että pinnalta lähtevän valon luminanssin [ $\text{cd/m}^2$ ]. Samalla ilmoitetaan myös heijastus- ja läpäisysuhde. Lisäksi ilmoitetaan osoitetun kappaleen valaistusvoimakkuuden tai luminanssin pienin, suurin ja keskiarvo sekä koko mal-

lin suurin arvo. Lisätietona kerrotaan osoitetun kappaleen nimi ja pinta-ala sekä osoitetun kohdan x, y ja z -koordinaatit. Lighting analysis -työkalu toimii vain radiositeettilaskennan yhteydessä.

### 3.5.2 Exposure control -toiminto

Kun 3d-mallin valaistus lasketaan radiositeetti- ja ray tracing -laskennan avulla, saattaa mallin valoisin kohta olla yli miljardi kertaa kirkkaampi kuin mallin pimein kohta. Valitettavasti tavallinen tietokoneen näyttö pystyy havainnollistamaan vain noin satakertaisen kirkkauseron. Kirkkauseroja kuvataan usein dynaamisen alueen avulla. Esimerkiksi miljardikertainen kirkkausero mahtuu dynaamiselle alueelle 9, koska  $10^9 = 1\,000\,000\,000$ . Vastaavasti satakertainen kirkkauseron mahtuu dynaamiselle alueelle 2, koska  $10^2 = 100$ . Ihmissilmän kirkkauserojen havainnoinnin dynaaminen alue on noin 16. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Exposure Controls.)

Jos suuria kirkkauseroja sisältävää 3d-mallia yritetään havainnollistaa tietokoneen näytöllä, jää suurin osa valaistustiedoista näytön dynaamisen alueen ulkopuolelle. Lopputulos näyttää silloin erittäin lattealta. Mallista voidaan toki renderöidä ja tallentaa kuvia, mutta yleisimmät kuvatiedostot saavat tallentua vain 256 eri kirkkaussävyä. Jotta 3d-mallin valaistus saataisiin kokonaisuudessaan näkymään, täytyy mallin suuret kirkkauserot mukauttaa näyttöön sopivalle dynaamiselle alueelle. Tämä mukauttaminen tapahtuu exposure control -toiminnon avulla. Toiminto vaikuttaa ainoastaan mallin visuaaliseen ilmeeseen, eikä siis muuta pintojen valaistusvoimakkuus- tai luminanssiarvoja. (Omura ym. 2006, 541.)

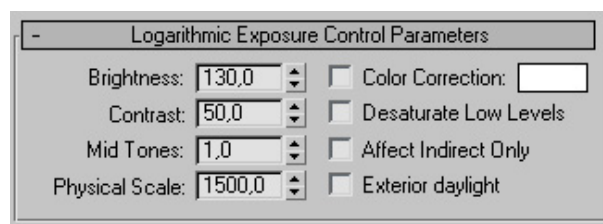
Exposure control -toiminto löytyy environment and effects -ikkunan environment-välilehdestä. Toiminnon avulla 3d-mallin fysikaaliset valaistusarvot muunnetaan kuvatiedostoihin sopiviksi RGB-väriarvoiksi. Muunnos voidaan tehdä neljällä eri menetelmällä.

Automatic exposure control -menetelmä ottaa mallista näytteitä ja rakentaa niistä histogrammin, jonka perusteella mallin dynaaminen alue määritellään. Tämän dynaamisen alueen fysikaaliset valaistusarvot muunnetaan RGB-väreiksi. Menetelmä korostaa mallin himmeitä valaistusefektejä. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Automatic Exposure Control.)

Linear exposure control -menetelmä ottaa mallista näytteitä ja laskee niiden keskimääräisen kirkkauden, jonka perusteella mallin dynaaminen alue määritellään. Tämän dynaamisen alueen fysikaaliset valaistusarvot muunnetaan RGB-väreiksi. Menetelmä sopii malleille, joiden kirkkauserot mahtuvat kohtalaisen pienelle dynaamiselle alueelle. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Linear Exposure Control.)

Molemmat edellä mainitut menetelmät käyttävät samoja säätimiä kuvan muokkaamiseen. Värien kirkkautta ja kontrastia voi säätää tarpeen mukaan brightness ja contrast -arvojen avulla. Exposure value -arvolla säädetään kuvan kokonaiskirkkautta. Color correction -väriarvo määrittää, minkä väriset 3d-mallin pinnat muutetaan kuvassa valkoisiksi. Desaturate low levels -arvo simuloi ihmissilmän hämäränäön värisokeutta. Kun tämä on valittuna, kuvan tummimmat alueet muutetaan mustavalkoisiksi. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Automatic Exposure Control; Linear Exposure Control.)

Logarithmic exposure control -menetelmä ei ota näytteitä mallista, vaan käyttää valmiiksi asetettua dynaamista aluetta, josta fysikaaliset valaistusarvot muunnetaan RGB-väreiksi. Vakiona käytetään sisätilan valaistukselle tavanomaista dynaamista aluetta. Exterior daylight -arvo kasvattaa dynaamisen alueen auringonvalolle tavanomaisemmaksi. Logarithmic exposure control -menetelmä sopii malleille, joiden kirkkauserot ovat erittäin suuria. Se on myös ainoa animaatioiden kanssa toimiva menetelmä. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Logarithmic Exposure Control; Omura ym. 2006, 542.)

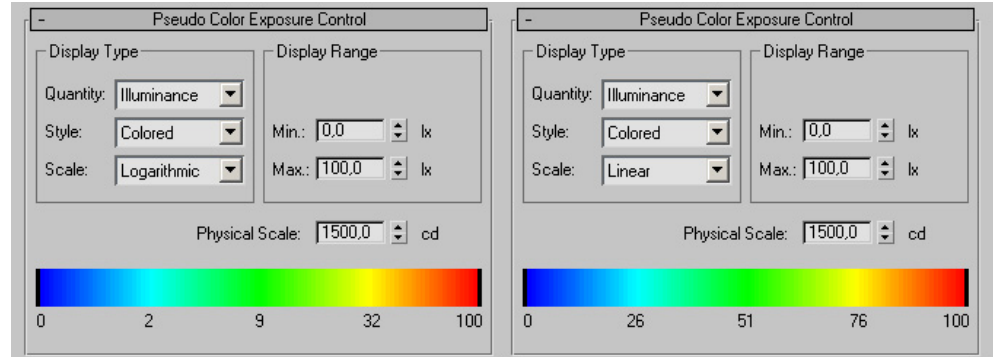


Kuvio 38. Logarithmic exposure control -menetelmän säätövalikko

Exposure control -toiminto ja sen eri säätimet vaikuttavat kuvaan samalla periaatteella kuin kameran aukon koko vaikuttaa valokuvaan (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Radiosity Workflows). Valitettavasti VIZ-ohjelman exposure control -toiminnon ja kameran aukon koon välillä ei ole mitään suoraa yhteyttä, joten renderöityä kuvaa ja vastaavan tilan aitoa valokuvaa

ei voi verrata keskenään. Valaistustutkimuksessa vertailu täytyy tehdä luminanssimittarin ja VIZ-ohjelman lighting analysis -työkalun avulla. Jos 3d-mallin valaistusvoimakkuutta halutaan havainnollistaa visuaalisesti, voidaan siihen käyttää neljättä exposure control -menetelmää.

Pseudo color exposure control -menetelmän avulla mallin dynaamisen alueen värit muunnetaan näennäisväreiksi, jotka kuvaavat mallin valaistusvoimakkuutta tai luminanssia. Dynaaminen alue määritetään itse antamalla kirkkauden minimi- ja maksimiarvo (luksi tai  $\text{cd}/\text{m}^2$ ). Pinnat, joiden kirkkaus on pienempi tai yhtä suuri kuin minimiarvo, värjätään sinisiksi. Pinnat, joiden kirkkaus on suurempi tai yhtä suuri kuin maksimiarvo, värjätään punaisiksi. Sinisen väri muuttuu kirkkauden kasvaessa syaanin, vihreän, keltaisen ja oranssin kautta punaiseksi. Kirkkausarvot voidaan jakaa väriarvoihin käyttämällä lineaarista tai logaritmistä asteikkoa. Linearisessa asteikossa valon kirkkaus jakautuu tasaisesti koko väriasteikolle. Logaritmisessa asteikossa suurin osa valon kirkkaudesta jaetaan väriasteikon loppupäähän. Valittu asteikko lisätään renderöidyn kuvan alareunaan. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Pseudo Color Exposure Control.)



Kuvio 39. Pseudo color exposure control -menetelmän säätövalikot lineaarisella ja logaritmisella asteikolla

Pseudo color exposure control -menetelmän avulla on hyvä tutkia, onko jokin huone valaistu oikein. Jos esimerkiksi huoneen valaistusvoimakkuuden pitäisi olla 500 luksia, määritetään minimiarvoksi 0 luksia ja maksimiarvoksi 1000 luksia. Linearisella jaolla 500 luksia osuu väriasteikon keskellä olevaan vihreään väriin. Renderöidystä kuvasta nähdään suoraan, mitkä pinnat ovat oikein valaistuja, koska ne värjätään vihreiksi. Alivalaistut pinnat värjätään sinisiksi ja ylivalaistut pinnat punaisiksi.

## 4 CASE: AIDON SISÄTILAN 3D-MALLI

### 4.1 Johdanto

Casen tarkoituksena oli testata VIZ-ohjelman valaistussimulaation tarkkuutta. Testaus tehtiin mallintamalla aito, jo olemassa oleva tila VIZ-ohjelman avulla. Valmiin 3d-mallin pinnat päällystettiin arkkitehtuuri-materiaaleilla, joiden ominaisuudet vastaavat mahdollisimman tarkasti aidon tilan pintojen ominaisuuksia. 3d-mallin valaistukseen käytettiin fotometrisiä valoja, joiden ominaisuudet vastaavat mahdollisimman tarkasti aidon tilan valojen ominaisuuksia.



Kuvio 40. Mallinnettu tila ylhäältä päin katsottuna

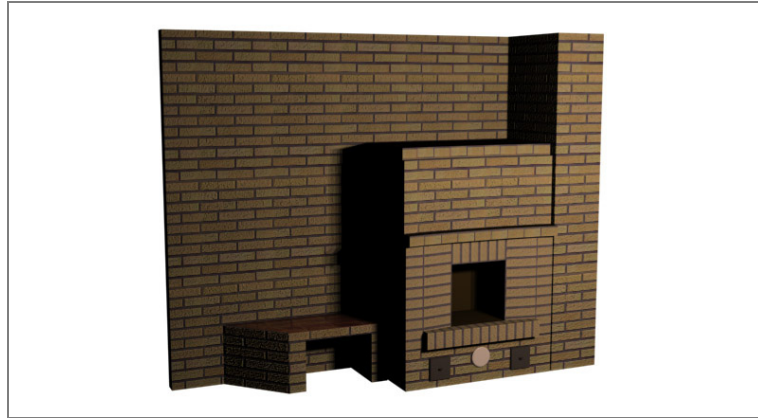
Mallinnettu aito tila oli noin 14 neliömetrin kokoinen olohuone ja siihen suorassa yhteydessä oleva eteinen. Tila soveltui valaistustutkimuksen tekoon erittäin hyvin. Kaikki tilasta pois vievät ovet sai suljettua, joten valo ei päässyt ”karkaamaan”. Myös olohuoneessa olevat kaksi ikkunaa sai valotiliksi sulkemalla sälekaihtimet. Tilassa oli useita erilaisia pintoja, joiden vaikutusta epäsuoraan valaistukseen pystyttiin tutkimaan VIZ-ohjelmassa.

Tila oli valaistu kahden loisteputken ja kahdentoista hehkulampun avulla, joten simulaatio voitiin tehdä usean erilaisen valaistusyhdistelmän kanssa.

## 4.2 Tilan mallintaminen VIZ-ohjelmalla

Ennen 3d-mallin rakentamista aito tila oli mitattava erittäin tarkasti. Mittaukset tehtiin noin yhden senttimetrin tarkkuudella. Pienimmät kappaleet mitattiin hieman tarkemmin. Pehmeitä ja sulavalinjaisia kappaleita (nojatuolit ja sohva) oli vaikea mitata tarkasti, joten ne mallinnettiin valokuvien perusteella. Valmiissa mallissa oli yhteensä 37452 face-tasoa, joista yli 20 % kuului viisihaaraiselle kattovalaisimelle. Valaisimen kuvut piti mallintaa äärimmäisen tarkasti, koska valojen ollessa päällä niistä muodostui erittäin suuret varjot huoneen seinille. Valaistussimulaation kannalta oli tärkeää saada muutkin 3d-mallin kappaleet vastaamaan aidon tilan esineitä mahdollisimman tarkasti ja yksityiskohtaisesti. Tällöin valo kulkisi mallissa samoja reittejä kuin aidossa tilassakin ja simulaation laatua voitaisiin tutkia luotettavammin.

Suurin osa 3d-mallin kappaleista, kuten kuvion 41 takka, mallinnettiin muokkaamalla kuutioita ja sylintereitä EditPoly-muokkaajan avulla. Joidenkin monimutkaisten kappaleiden kanssa käytettiin boolean-operaattoria tai TurboSmooth-muokkaajaa. Boolean-operaattorin avulla kaksi kappaletta voidaan yhdistää keskenään tai toisesta kappaleesta voidaan poistaa toisen kappaleen muotoinen alue. Boolean-operaattoria käytettiin esimerkiksi pöydän pinnan reiän luomiseen. TurboSmooth-muokkaaja jakaa kappaleen pinnat pienempiin osiin ja pyöristää samalla kappaleen teräviä kulmia ja reunoja. TurboSmooth-muokkaajaa käytettiin esimerkiksi sohvan tyynyjen ”pehmentämiseen”. Kun TurboSmooth-muokkaajaa käytetään radiositeettilaskennan yhteydessä, kannattaa muistaa, että molemmat toiminnot jakavat pintoja pienempiin osiin. Siksi TurboSmooth-muokkaajan pintojen jako kannattaa suorittaa vasta renderöintivaiheessa, jolloin radiositeettilaskenta suoritetaan huomattavasti nopeammin.



Kuvio 41. Takan 3d-malli

Aidon tilan mittaamiseen ja 3d-mallin piirtämiseen kului arviolta 10 työpäivää. Mallintamisen kanssa ei tullut vastaan mitään suuria ongelmia. Erittäin monet aidot kappaleet sai mallinnettua muokkaamalla tai yhdistelemällä kuutioita ja sylintereitä. Jos malli olisi tehty silmämääräisesti, ilman tarkkoja mittauksia, olisi sen tekemiseen kulunut vain muutama päivä.

### 4.3 Arkkitehtuuri-materiaalien luominen

#### 4.3.1 Materiaalikartat

Aidon näköisten pintamateriaalien luontiin kannattaa useimmiten käyttää aitojen pintojen valokuvista tai skannauksista muokattuja materiaalikarttoja. Skannaus on monessa mielessä valokuvausta parempi menetelmä, ja sitä kannattaakin käyttää aina kun se on mahdollista. Ensinnäkin kameralla otetuissa kuvissa on usein perspektiivivirheitä ja epätasainen valaistus. Skannatuissa kuvissa on aina täysin litteä perspektiivi ja kauttaaltaan tasainen valaistus, ja ne ovat myös huomattavasti tarkempia kuin kameralla otetut kuvat. Lisäksi skannatun kuvatiedoston mitat ovat automaattisesti oikean kokoiset, joten aitoa pintaa ei tarvitse mitata erikseen. Tämä on hyödyllistä, koska VIZ-ohjelmassa materiaalikartan koon voi halutessaan määrittää oikeiden mittayksikköjen avulla. Pintoja kannattaa kuvata kameralla vain, jos niitä ei jostain syystä saada mahtumaan skannerin sisään. (Birn 2006, 269 - 271.)

Lähes kaikki tässä työssä käytetyn aidon tilan pinnat olivat liian suuria tavalliselle A4-skannerille, joten ne jouduttiin kuvaamaan digikameralla. Ma-

terialikarttojen kuvauksessa on tärkeintä saada pinnalle mahdollisimman tasainen valaistus. Melko tasaisen valaistuksen saa pilvisen taivaan alla, joten pinnat kannattaa kuvata ulkona, jos se vain on mahdollista. Kameran salamavalo aiheuttaa monelle pinnalle kirkkaan täplän. Salamavalon voimakkuutta voi pienentää ja levitystä hajottaa teippaamalla valon eteen muutama palan läpikuultavaa paperia.

Kun tarvittavat aidot pinnat saatiin skannattua ja kuvattua, oli niiden kirkkautta, värejä ja jatkuvuutta muokattava kuvankäsittelyohjelman avulla. Tämän työn yhteydessä materiaalikarttojen muokkaukseen käytettiin Adobe Photoshop CS2 -ohjelmaa.

Pinnan kuvaa tai skannausta on muokattava materiaalikartan käyttötarpeen mukaan. Useimmiten materiaalikartan täytyy muodostaa saumaton kuvio, jos se toistetaan useaan kertaan pysty ja vaakasuunnassa. Esimerkiksi tiiliseinän materiaalikarttana saattaa olla noin kymmenen tiilen rykelmä, jota toistamalla saa luotua rajattoman suuren tiilillä päällystetyn pinnan.

Kameralla otetuista kuvista tulee usein väärän värisiä ja liian kirkkaita. Materiaalikartan kuvan täytyy olla valaistukseltaan mahdollisimman neutraali ja melko tumma, koska kartta valaistetaan myöhemmin 3d-mallin omilla valoilla. Hehkulamppujen valossa otetuista kuvista tulee usein kellertäviä tai punertavia, jos kameran valkotasapaino asetuksia ei ole määritetty oikein. Terävän kuvan saamiseksi täytyy pinta myös valaista riittävän hyvin, jolloin kuvasta tulee helposti liian kirkas.

Kaikkien tässä työssä käytettyjen materiaalikarttojen valmistusprosesseja on turha käydä läpi, koska eri karttojen muokkaamisessa käytettiin usein samoja menetelmiä. Seuraavassa luvussa on selitetty tapetin, tiilen ja maton materiaalikarttojen valmistusprosessit.

#### 4.3.2 Kuvan muokkaaminen materiaalikartaksi

Aidon tilan kolme pääseinää on päällystetty valkoisella tapetilla. Varastosta löytyi ylijääneitä palasia samasta tapetista, joten niitä voitiin käyttää kuvan skannaamiseen. Tapetissa sama kuvio toistuu pystysuunnassa noin 32 sent-



timetrin välein ja vaakasuunnassa noin 54 senttimetrin välein. Tämän kokoinen tapetin pala ei mahtunut skanneriin yhdellä kertaa, joten se täytyi skannata kuudessa osassa. Osat liitettiin yhteen Photoshop-ohjelman kanssa. Osien liittämisen jälkeen tapetin kuva rajattiin niin, että pintakuvio toistui tasan yhden kerran.

Periaatteessa tapettikuvio oli jo tässä vaiheessa valmis. Kuvion jatkuvuus ei kuitenkaan näyttänyt hyvältä, koska tapetin reunat eivät liittyneet toisiinsa saumattomasti. Reunojen välisiä saumoja tutkittiin offset-filtterin avulla, joka siirtää kuvan reunat kuvan keskelle. Kun reunat olivat vierekkäin, oli ne helpompi sulauttaa toisiinsa mm. clone-pensselin avulla.

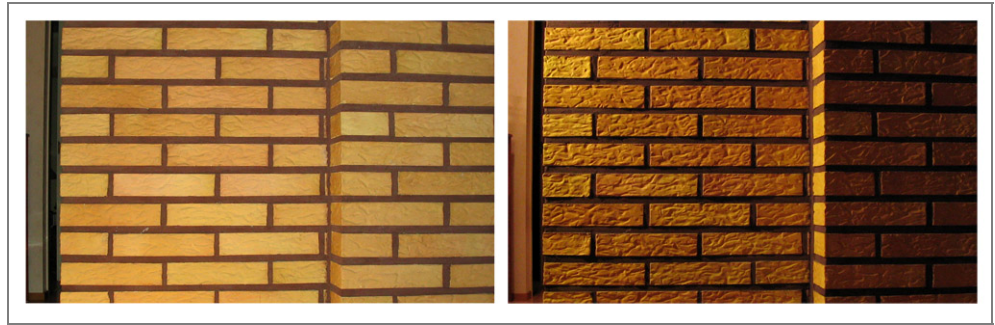
Kun reunat saatiin saumattomiksi, piti tapetin kuvan kirkkautta vielä pienentää curves-toiminnon avulla. Värit olivat valmiiksi kohdallaan, koska tapetti skannattiin valokuvauksen sijasta. Valmiista kuvasta tuli materiaalin diffuse-värikartta. Samasta kuvasta sai kirkkautta muokkaamalla tehtyä materiaalille myös shininess- ja bump-kartat.



Kuvio 42. Tapetin skannaukset ja niistä muokattu materiaalikäyttö

Tiiliseinä oli mahdotonta skannata, joten se täytyi siirtää digitaaliseen muotoon valokuvaamalla. Koska aidon tilan tiilissä oli erittäin voimakkaat kohokuviot, käytettiin tiilien kuvaukseen kahta erilaista valaistusta. Ensimmäinen valaistus osui tiiliin kohtisuorassa, jolloin kohokuviot eivät näkyneet kovinkaan selvästi. Tällä valaistuksella otettua kuvaa käytettiin tiilimateriaalin diffuse-värikartan luomiseen. Toinen valaistus osui tiiliin jyrkässä kulmassa, jolloin kohokuviot tulivat selvästi esiin. Tällä valaistuksella otettua kuvaa käytettiin tiilimateriaalin bump-kartan luomiseen. Tiilikuvion

saumojen sulauttamiseen sekä kirkkaus- ja värikorjauksiin käytettiin samoja menetelmiä kuin tapettikuvion muokkauksessa.



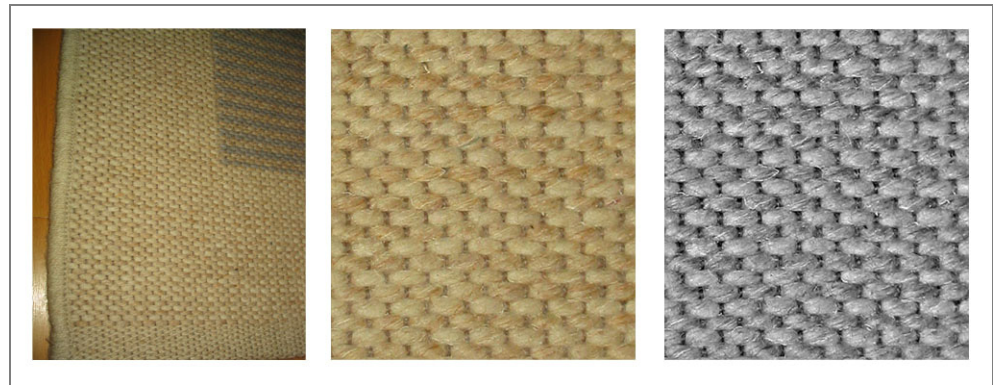
Kuvio 43. Kaksi eritavalla valaistua kuvaa samasta tiiliseinästä

Aidon tilan lattialla oli kohtalaisen kookas kangasmatto, jonka pinnassa oli yksinkertainen raitakuvio. Maton materiaalissa käytettiin kahta erilaista karttaa: toinen kartta kuvasi maton kokonaisväritystä ja toinen maton neulekuviota. Ensin koko matosta otettiin valokuva, jonka pohjalta muokattiin mattoa muistuttava yksinkertainen värikuvio.



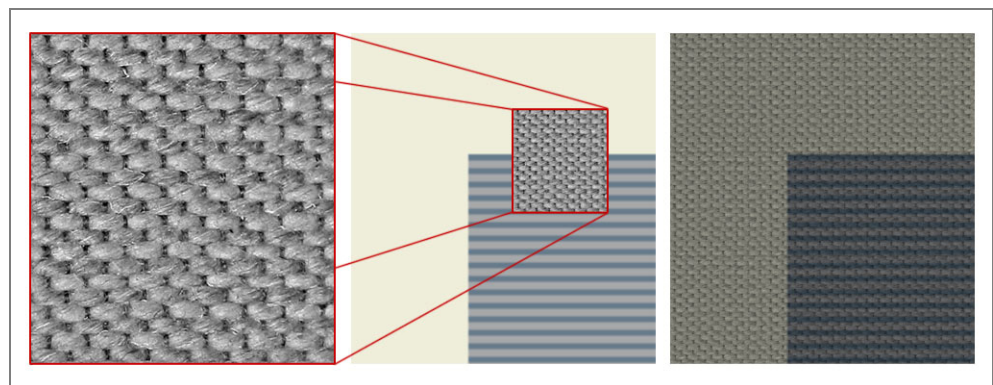
Kuvio 44. Maton valokuvan perspektiivikorjaus ja siitä muokattu yksinkertainen värikuvio

Seuraavaksi maton neulekuvioista otettiin lähikuva, joka muokattiin reunoiltaan saumattomaksi ja muutettiin mustavalkoiseksi. Valokuvat ovat usein epätasaisen kirkkaita, joten kuvan toinen reuna saattaa olla huomattavasti toista reunaa tummempi. Reunojen kirkkauserot vaikeuttavat saumattoman kuvion luomista. Yksi hyvä keino kirkkauserojen poistamiseen on high pass -filteri, joka poistaa kuvasta määritettyä pikselikokoa suuremmat yksityiskohdat. High pass -filteri vääristää kuvan värejä erittäin paljon, mutta tämän mustavalkoisen neulekuvion yhteydessä se ei haitannut.



Kuvio 45. Maton valokuvan perspektiivikorjaus ja siihen käytetty high pass -filteri

Neulekuvioista muokattua kuvaa käytettiin yhdessä koko maton kuvan kanssa luomaan aidon näköinen mattomateriaali. Kuvat yhdistettiin toisiinsa VIZ-ohjelmassa Mix-kartan avulla. Neulekuvioita käytettiin lisäksi materiaalin bump-karttana.



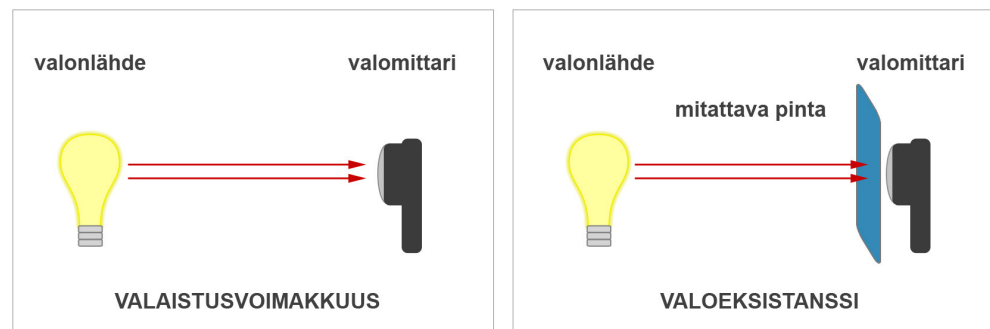
Kuvio 46. Lopullinen materiaali yhdistää kokomaton värikuvion ja saumattoman maton neulekuvion

Kaikki muut tässä työssä käytetyt materiaalikartat luotiin käyttämällä jotain edellä mainituista menetelmistä. Materiaalien kuvaamiseen, skannaukseen ja muokkaamiseen kului aikaa noin kolme työpäivää. Kaikkein yksinkertaisempiin 3d-mallin pintoihin ei tarvinnut edes luoda materiaalikarttoja. Esimerkiksi muovisten ja maalattujen pintojen materiaaleissa käytettiin pelkästään yhtä väriä. Kaikkien pintamateriaalien kiiltävyys asetettiin silmämääräisesti, koska sen mittaamiseen ei oikeastaan ole mitään käytännön keinoa. Pinnan kiiltävyys vaikuttaa ainoastaan pinnan ulkonäköön, joten valaistustutkimuksen kannalta sillä ei ole kovinkaan suurta merkitystä. Pinnan kyky luoda epäsuoraa valoa määräytyy heijastus- ja läpäisy-suhteen perusteella.

### 4.3.3 Heijastus- ja läpäisysuhde

Valaistustutkimuksen kannalta ainoa tärkeä materiaalien ominaisuus on niiden heijastus- ja läpäisysuhde. Kuten aiemmin on mainittu, heijastussuhde kertoo, kuinka monta prosenttia pinnalle tulevasta valosta heijastuu takaisin ympäristöön. Läpäisysuhde kertoo vastaavasti, kuinka monta prosenttia pinnalle tulevasta valosta jatkaa matkaa pinnan läpi.

Läpäisysuhteen mittaaminen käytännössä on kohtalaisen helppoa. Ensin mitataan valaistusvoimakkuus tietyssä pisteessä luksimittarin avulla. Sen jälkeen luksimittarin eteen laitetaan läpinäkyvä tai läpikuultava kappale ja mitaus suoritetaan uudestaan. Ensimmäinen arvo on pinnalle saapuvan valaistuksen määrä ja toinen arvo on pinnan läpi menevän valaistuksen määrä eli valoeksistanssi. Jos pintamateriaali on mittauksen aikana tiukasti kiinni luksimittarissa, ei valo pääse ”karkaamaan” mihinkään, joten mitaustuloksen pitäisi olla melko tarkka.



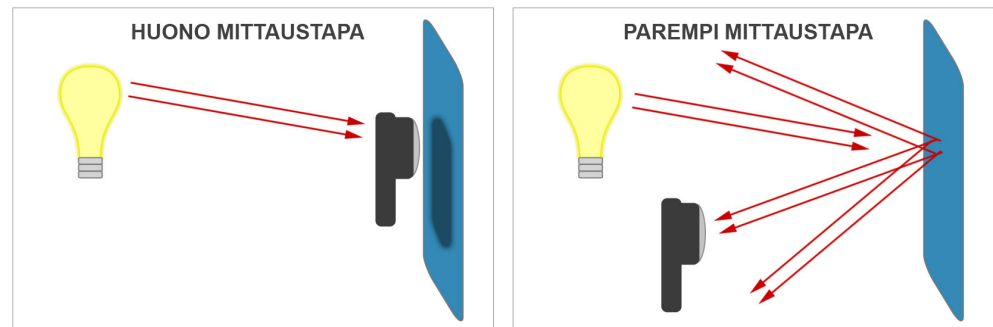
Kuvio 47. Pinnan valaistusvoimakkuuden mittaus

Tämän työn yhteydessä käytettiin neljää erilaista läpikuultavaa pintamateriaalia. Kolmen erilaisen lampunvarjostimen lisäksi myös verhokangas päästi hieman valoa lävitseen. Lasipinnat oletettiin 100 % läpinäkyviksi, joten niiden kanssa mitausta ei tarvinnut tehdä. Läpikuultavien pintojen mitaustulokset on esitelty liitteessä 1.

Heijastussuhteen mittaaminen käytännössä on huomattavasti läpäisysuhteen mittaamista vaikeampaa. Teoriassa ensin mitattaisiin jollekin pinnalle tuleva valaistusvoimakkuus asettamalla luksimittari pinnan eteen. Sen jälkeen pinnan valoeksistanssi mitattaisiin kääntämällä mittari toisinpäin. Valoeksistanssia mitattaessa täytyy kuitenkin huomioida luksimittarin pinnalle luoma varjo. Jos mittaria pitää liian lähellä pintaa, estää mittari osittain pinnalle

saapuvan valon kulun, jolloin myös pinnalta heijastuvan valon määrä on pienempi. Mittari pitää asettaa kuvion 48 mukaisesti noin 15 senttimetrin päähän pinnasta, jotta se ei vähennä pinnalle saapuvan valon määrää liikaa.

Kun valoeksistanssi mitataan noin 15 senttimetrin päästä pinnasta, pääsee osa heijastuneesta valosta ”karkaamaan” luksimittarin sensorin ulkopuolelle. Mitä enemmän pinta hajottaa valoa, sitä vähemmän valoa osuu sensorin kohdalle. Tästä johtuen valoeksistanssi on hieman pienempi kuin mitä se olisi, jos sen voisi mitata aivan pinnan läheltä. Tämän seurauksena myös pinnalle laskettu heijastussuhde on todellista arvoa pienempi. Valitettavasti pelkän luksimittarin avulla pinnan heijastussuhdetta ei saa mitattua tätä tarkemmin. Tarkan heijastussuhteen saisi mitattua spektrofotometrin avulla (Halonen & Lehtovaara 1992, 361).



Kuvio 48. Heijastussuhteen mittausergelmat

Mittausvirheen pienentämiseksi tällä menetelmällä laskettua pinnan heijastussuhdetta kannattaa nostaa arviolta 5-10 prosenttiyksikköä. Kiiltäville pinnoille noin 5 prosenttiyksikköä ja hajaheijastaville pinnoille noin 10 prosenttiyksikköä. Tämä arvio perustuu mittaustulokseen, joka tehtiin puhtaan valkoiselle kiiltävälle paperipinnalle. Pinnan heijastussuhteeksi saatiin mitaamalla 75 %, mutta puhtaan valkoisen pinnan heijastussuhde on ennemminkin 80 % (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Reflectance and Transmittance Display). 5 prosenttiyksikön lisäys mittaustulokseen muuttaa heijastussuhteen oikeaan luokkaan. Lisäyksen jälkeenkin lasketut heijastussuhteet saattavat poiketa todellisesta arvosta jonkin verran, mutta tarkempiin tuloksiin ei tällä menetelmällä päästä. Täytyy myös ottaa huomioon, että työssä käytetyn luksimittarin virhemarginaali hehkulampun valossa on  $\pm 3$  %.

Kaikki tämän työn aikana tehdyt valaistusmittaukset on tehty Tenmars DL-202 valomittarilla. Kyseinen mittari mittaa valaistusvoimakkuutta maksimi-

välillä 0 - 200000 luksia. Mittari käyttää kosinikorjausta, joka ottaa valon tulosuunnan huomioon valaistusvoimakkuuden arvoa laskettaessa. Kosinikorjaus on tarpeellinen, jos osa valosta ei tule anturiin suorassa kulmassa (Halonen & Lehtovaara 1992, 363). Mittarissa on pii fotodiode -anturi.



Kuvio 49. Tenmars DL-202 valaistusvoimakkuusmittari

Mittaustulokset sekä niiden perusteella lasketut pintojen heijastussuhteet ja virhekorjaukset on esitelty liitteessä 2.

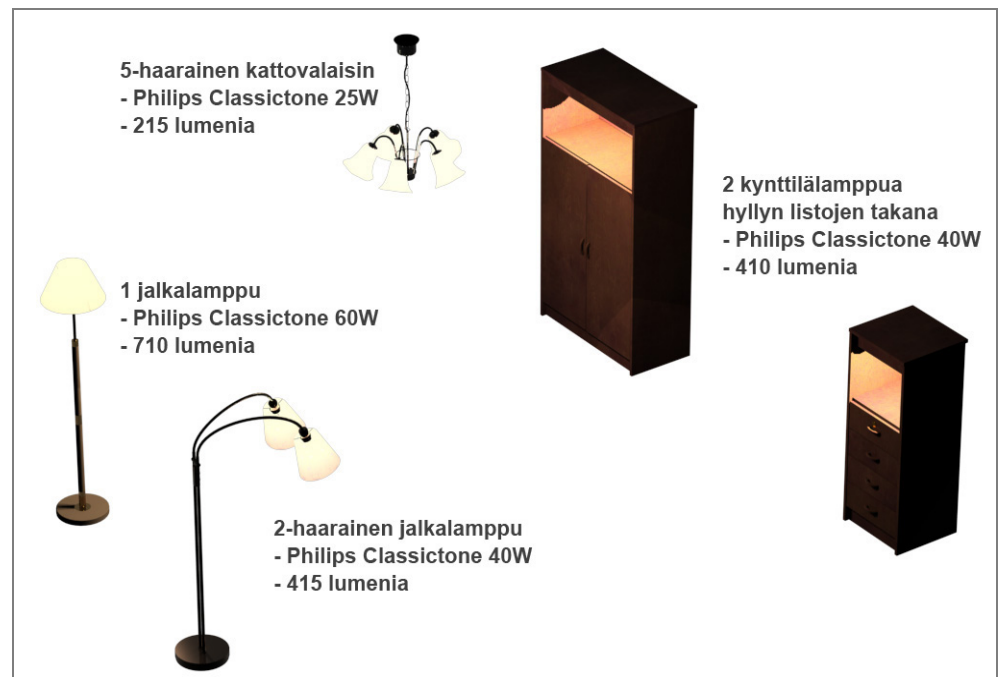
Kun heijastus- ja läpäisy-suhteen saatiin laskettua, piti vastaavat arvot määrittää 3d-mallin arkkitehtuuri-materiaaleille. Materiaalien suhdelukuja voidaan muokata suoraan advanced lighting override -valikosta käsin, mutta aidomman näköiseen lopputulokseen päästään muokkaamalla materiaalin fysikaalisia ominaisuuksia. Heijastussuhteen suuruuteen vaikuttaa yksinkertaisesti materiaalin värin tummuus periaatteella: mitä tummempi väri, sitä pienempi heijastussuhde. Jos materiaali on yksivärinen, voi heijastussuhteeseen vaikuttaa muokkaamalla värin value-arvoa. Jos materiaalissa on käytetty diffuse-karttaa, voi heijastussuhteeseen vaikuttaa muokkaamalla kartan RGB level -arvoa. Molemmat arvot vaikuttavat vain materiaalin tummuuteen, eivätkä muuta materiaalin värejä. (Autodesk VIZ 2007 User Reference: Reflectance and Transmittance Display.) Läpäisy-suhteeseen vaikuttavat materiaalin värin tummuuden lisäksi sen transparency- ja translucency-arvot.

Vaikka osasta materiaaleja tuli muokkauksen jälkeen erittäin tummia, näyttivät ne lopullisessa renderöinnissä oikean värisiltä. Heijastus- ja lä-

päisysuhteiden mittaamiseen ja arvojen asettamiseen materiaaleille kului aikaa muutaman työpäivän verran. Aikaa kului näin paljon etenkin heijastussuhteiden mittaussuhteiden takia.

#### 4.2 Fotometrinen valojen luominen

Kun mallin geometria ja pintamateriaalit saatiin oikeanlaisiksi, oli jäljellä ainoastaan fotometrinen valojen lisääminen. Aidon tilan neljästätoista lampusta vain kymmentä käytettiin valaistussimulaation luomiseen. Kaksi loisteputkea jätettiin pois, koska niiden todellisesta kirkkaudesta ei ollut saatavilla mitään tietoa. Kaksi kattoon kiinnitettyä pallomaista valaisinta jätettiin myös pois, koska niiden tarkka mallintaminen oli käytännössä mahdotonta ilman 3d-skanneria. Jäljelle jäi viisihaarainen kattovalaisin, kaksi hyllyjen listan takana olevaa lamppua sekä yksi- ja kaksihaarainen jalkalamppu.



Kuvio 50. Valaistussimulaatiossa käytetyt valaisimet oikeilla paikoillaan

Kaikki aidon tilan lamput olivat merkiltään Philips Classicstone -hehkulamppuja. Fotometrinen valojen kirkkaus määritettiin aitojen hehkulamppujen pakkauksissa olleiden valovirta tietojen perusteella. Pakkauksissa ei ilmoitettu lamppujen värilämpötilaa, joten se asetettiin hehkulamppuille tavanomaiseen 2750 kelviniin. Valon levitystapaa muokkaavia fotometrisia

verkkoja ei ollut saatavilla Suomessa toimiville hehkulampuille, joten kaikki 3d-mallin valonlähteet käyttävät isotropic-levitystä.

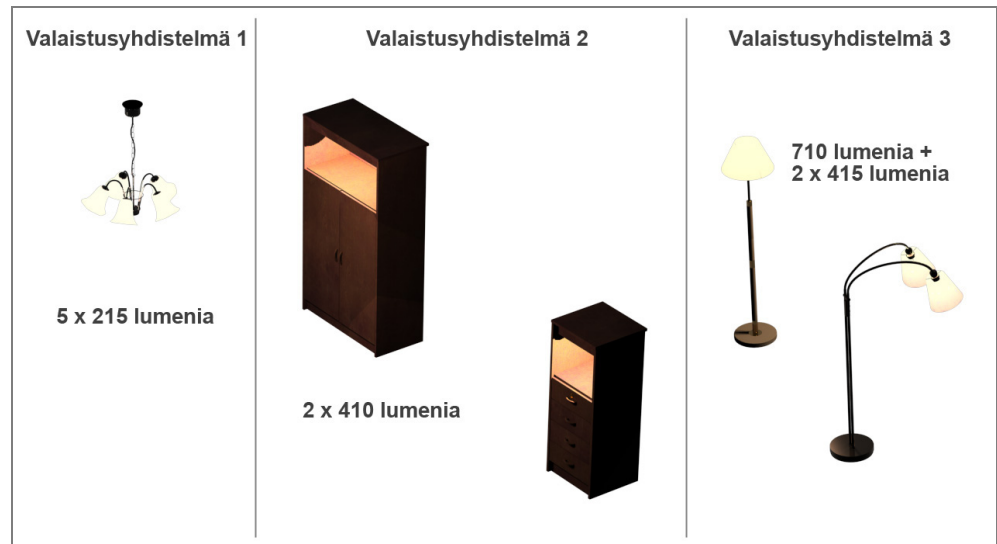
Kaikilla tässä työssä käytetyillä hehkulampuilla oli läpikuultava kupu, joten lamput olivat käytännössä kupunsa muotoisia kolmiulotteisia valonlähteitä. VIZ-ohjelman radiositeetilaskennassa ei kuitenkaan tunneta kolmiulotteisia valoja, joten hehkulamppujen valon simulointiin käytettiin point light -valonlähteitä. Varjojen simulointiin käytettiin area shadows -tekniikkaa ja pallomaisia ”virtuaalivaloja”. Pallon koko määritettiin aidon hehkulampun kuvun koon mukaan, jolloin valonlähteen luomista puolivarjoista tuli oikean kokoisia.

### 4.3 Valaistussimulaatio

#### 4.3.1 Aidon tilan valaistusmittaukset

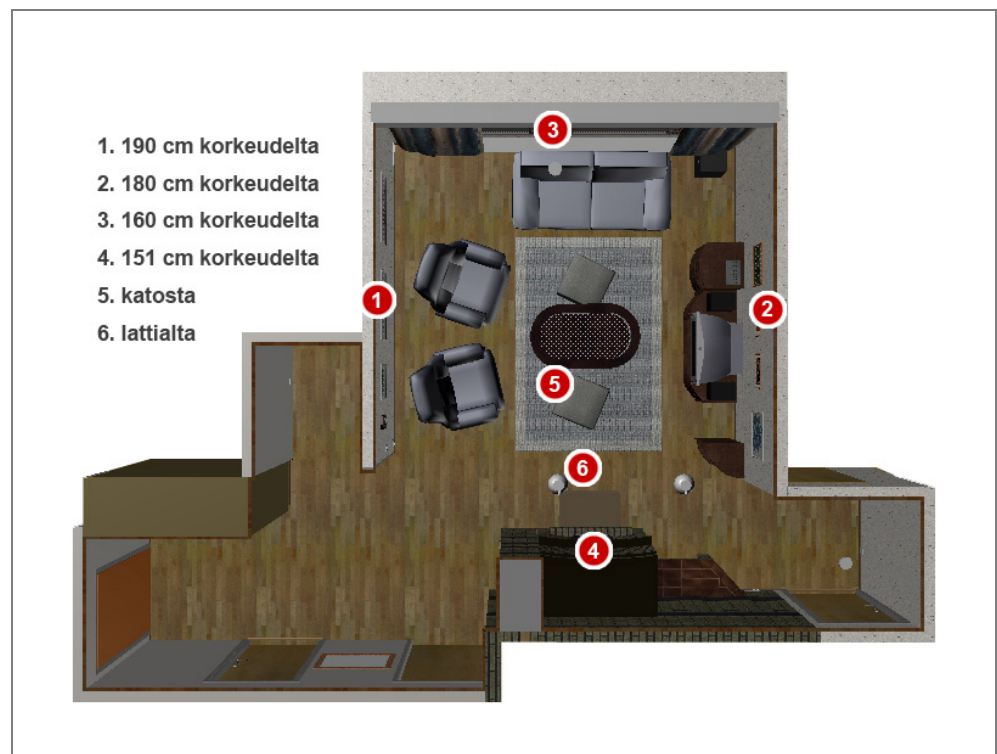
Aidon tilan valaistusmittaukset suoritettiin kolmella eri valaistusyhdistelmällä. Yhdistelmät valittiin niiden luomien erityylisten valaistusten perusteella. Ensimmäisessä yhdistelmässä vain viisihaaraisen kattovalaisimen lamput oli asetettu päälle. Valaistus oli kauttaaltaan tasainen ja suurin osa pinnoista valaistiin sekä suoralla että epäsuoralla valaistuksella. Toisessa yhdistelmässä käytettiin vain kahta hyllyn listojen takana olevaa lamppua. Valaistus oli erittäin himmeä, ja suurin osa pinnoista valaistiin pelkällä epäsuoralla valaistuksella. Kolmannessa yhdistelmässä päällä olivat vain yksi- ja kaksihaarainen jalkalamppu. Valaistus oli kirkkaudeltaan vaihteleva, ja useat pinnat valaistiin suoraan lampunvarjostimien läpi taittuneella valolla.





Kuvio 51. Valaistusyhditelmät

Ennen valaistusmittausta aidosta tilasta siirrettiin pois kaikki esineet, joita ei ollut mallinnettu 3d-malliin. Valaistusvoimakkuus mitattiin luksimittarilla tilan kuudesta eri kohdasta: kolmesta pääseinästä, takasta, lattiasta ja katoista.



Kuvio 52. Valaistusvoimakkuuden mittauskohdat

Mittauskohdat merkittiin aitoon tilaan teipillä. Seuraavaksi etsittiin vastaavat kohdat 3d-mallista. Koska 3d-mallin origo oli asetettu olohuoneen toi-

seen alanurkkaan, saatiin mittauskohdat määritettyä mallin koordinaattijärjestelmän avulla. Ensin mitattiin aidon tilan mittauskohtien etäisyys huoneen alanurkasta eli nurkasta jossa origo sijaitsee 3d-mallissa. Sen jälkeen luotiin 3d-malliin point-apuobjekteja, joiden sijainnit asetettiin vastaamaan aidon tilan mittauskohtien sijainteja.

Valaistusvoimakkuus mitattiin siis kuudesta eri kohdasta kolmella eri valaistusyhdistelmällä. Lisäksi aidosta tilasta otettiin valokuvia kolmesta eri kuvakulmasta.



Kuvio 53. Valokuvien ja renderöintien kuvakulmat

#### 4.3.2 Radiositeetilaskennat

Ennen varsinaisen radiositeetilaskennan aloittamista 3d-malliin asetettiin kolme kameraa, jotka suunnattiin samalla tavalla kuin oikea kamera oli suunnattu kuvien otto vaiheessa. Kameroiden suuntaamisessa käytettiin avuksi camera match -toimintoa ja aidosta tilasta otettuja valokuvia. camera match -toiminnossa malliin asetetaan apupisteitä paikkoihin, joiden sijainti tiedetään myös aidossa valokuvassa. Kun pisteiden sijainti on määritetty sekä 3d-mallissa että valokuvassa, luo camera match -toiminto niiden perusteella kameran, joka on suunnattu oikealla tavalla.

VIZ-ohjelman radiositeetilaskenta suoritettiin samoilla kolmella valaistusyhdistelmällä, joita käytettiin aidon tilan valaistusmittauksessa. Verkon asetukset säädettiin erikseen jokaiselle eri valaistusyhdistelmälle. Varsinainen radiositeetilaskenta tehtiin samoilla arvoilla kaikissa eri valaistusyhdistelmissä. Initial quality -arvo oli 95 % ja refine iterations -arvo 10. Laskennan jälkeen valaistusvoimakkuus mitattiin lighting analysis -työkalun avulla samoista kuudesta pisteestä, joista se mitattiin aidossa tilassakin. Liitteessä 3 on lueteltu sekä aidon tilan että 3d-mallin valaistusvoimakkuuksien mittaustulokset kaikilla kolmella eri valaistusyhdistelmällä.

Valaistusvoimakkuuden mittausten lisäksi aitoa tilaa ja 3d-mallia vertailtiin visuaalisesti valokuvien ja renderöintiä perusteella. Ennen renderöintiä tiettyjen pintojen kirkkauseroja tasoitettiin nostamalla niiden Refini Iterations -arvoa. Exposure control -asetukset määritettiin niin, että mallin valaistus ja valkotasapaino vaikuttaisivat mahdollisimman samanlaisilta kuin ne olivat vastaavissa aidossa valokuvissa. Valotuksen korjaukseen käytettiin automatic exposure control -menetelmää. Aidot valokuvat ja vastaavat mallista renderöidyt kuvat on esitelty liitteessä 4.

## 5 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia Autodesk VIZ -ohjelman valaistussimulaatio-ominaisuuksia. Tarkoitus oli selvittää, mitä menetelmiä VIZ-ohjelma käyttää valaistuksen simulointiin ja kuinka realistisia tuloksia niillä saavutetaan.

Fotometrinen valon kirkkaus ja väri arvot määritetään oikeiden fysikaalisten suureiden perusteella. Myös valon levitystapa voidaan asettaa oikean valaisimen mukaiseksi fotometrisen verkkotiedoston avulla. Ainoa VIZ-ohjelman fotometriin valoihin liittyvä puute on valonlähteiden rajoitettu muoto. Valittavissa on vain pistemäinen, lineaarinen tai suorakulmion muotoinen valonlähde. Lähes kaikki aidot valonlähteet ovat kuitenkin kolmiulotteisia, joten niiden levittämä valo osuu hieman laajemmalle alueelle. Ero ei kuitenkaan ole silmännähtävä, jos valonlähteen koko on kohtalaisen pieni verrattuna valaistavan tilan kokoon. Liitessä 4 valokuvien ja renderöintien valaistus näyttää yhtä tasaiselta, vaikka renderöityjen kuvien valonlähteet ovat pistemäisiä.

Arkkitehtuuri-materiaalien kaikki ominaisuudet eivät perustu fysikaalisiin arvoihin, vaikka VIZ-ohjelman ohjetiedostossa niin väitetään. Etenkin materiaalin shininess-arvon merkitys on hieman epälooginen. On myös outoa, että pinnan taittokerroin vaikuttaa valon heijastumiseen läpinäkymättömästä pinnasta. Jos arkkitehtuuri-materiaalien ominaisuudet perustuisivat täydellisesti aitojen pintojen fysikaalisiin ominaisuuksiin, olisivat säädöt hieman yksinkertaisempia. Pinnan väri, heijastussuhde, läpäisysuhde ja läpinäkyvän pinnan taitekerroin säädettäisiin nykyisellä tavalla. Lisäksi tarvittaisiin vain pinnan tasaisuutta simuloiva arvo, joka vaikuttaisi valon heijastumisen ja taittumisen luonteeseen. Valaistussimulaation kannalta oleelliset arvot ovat pinnan heijastus- ja läpäisysuhde. Koska nämä arvot pystytään määrittämään, soveltuvat arkkitehtuuri-materiaaleille teoriassa erittäin hyvin valaistussimulaation pinnoiksi.

Radiositeetilaskennan avulla lasketaan pintojen luminanssi ja valaistusvoimakkuus. Laskennassa valonlähteistä lähetetään säteitä 3d-mallin ympäristöön. Säteiden valoenergia riippuu fotometrinen valonlähteiden kirkkaudesta.

ta, joka perustuu fysikaaliseen arvoon. Säteet heijastuvat ja taivutuvat radiositeettiverkon pintaelementeistä oletettavasti fysiikan heijastumis- ja taivutuslakin määräämällä tavalla. Osuessaan pintaelementtiin, säde luovuttaa sille osan valoenergiastaan. Luovutetun energian määrä riippuu pinnan heijastus- ja läpäisysuhteista, jotka perustuvat fysikaalisiin arvoihin. Tätä energian luovutusta jatketaan, kunnes on saavutettu haluttu simulaatiotarkkuus. Teoriassa VIZ-ohjelman valaistussimulaation pitäisi siis toimia moitteettomasti, koska kaikki tarvittavat toimenpiteet suoritetaan fysiikan lakien mukaan.

Case-osiossa VIZ-ohjelman valaistussimulaatiota tutkittiin käytännön kokeen avulla. Aidosta tilasta mallinnettiin tarkka 3d-malli, joka varustettiin aitoja valoja vastaavilla fotometrisillä valoilla ja aitoja pintoja vastaavilla arkkitehtuuri-materiaaleilla. Sekä aidon tilan että 3d-mallin valaistusvoimakkuus mitattiin kolmella valaistusyhdistelmällä kuudesta eri kohdasta. Mittaustulokset on esitelty liitteessä 3.

Ensimmäisellä valaistusyhdistelmällä mittaustulokset erosivat toisistaan hyvin vähän. Toisella valaistusyhdistelmällä tuloksissa oli jo suurempia eroja. Kolmannella valaistusyhdistelmällä erot olivat erittäin suuria. Syitä mittaustulosten suuriin eroihin voi olla useita.

Ensimmäisten mittaustulosten yhtenäisyys saattoi johtua siitä, että käytössä ollut 5-haarainen kattovalaisin valaisi huoneen pääasiassa suoran valaistuksen avulla. Tällöin pintojen heijastussuhteilla ei ollut kovinkaan suurta merkitystä.

Toisten mittaustulosten kohtalaiset erot saattoivat johtua juuri arkkitehtuuri-materiaalien heijastussuhteiden epätarkkuudesta. Heijastussuhteiden tarkka mittaaminen pelkän luksimittarin avulla on erittäin vaikeaa. On myös mahdollista, että toisella valaistusyhdistelmällä 3d-mallin radiositeettiverkko jaettiin liian epätarkasti.

Kolmannet mittaustulokset eroavat toisistaan huomattavasti aikaisempia enemmän. Kaikki 3d-mallin valaistusvoimakkuudet ovat huomattavasti aidon tilan valaistusvoimakkuuksia pienempiä. Todennäköisin selitys on lampunvarjostimien väärin mitattu läpäisysuhde. Ilmeisesti myös läpäisysuh-

teen mittaaminen pelkän luksimittarin avulla voi tuottaa virheellisen tuloksen. Aidon tilan jalkalamput ovat myös helposti liikuteltavissa, joten on mahdollista, että niiden sijainti 3d-mallissa ei ole aivan kohdallaan.

Jokaisen valaistusyhdistelmän mittaustulosten eroihin vaikutti varmasti se, ettei 3d-mallin valonlähteiden levitykseen löytynyt oikeita fotometrisia verkkoja. Mallin fotometriset valot eivät siis levittäneet valoa samalla tavalla kuin aidon tilan hehkulamput. Lopuksi täytyy myös ottaa huomioon, että radiositeetilaskenta tehtiin vain 95 % tarkkuudella.

Kokeen perusteella valaistussimulaatio ei vaikuta kovinkaan paikkansapitävältä. VIZ-ohjelman simulaatiomenetelmät vaikuttavat kuitenkin teoriassa toimivan oikealla tavalla. On todennäköistä, että virheellinen lopputulos ei johtunut itse simulaatiosta vaan väärin asetetuista heijastus- ja läpäisysuhdearvoista. Luotettavampi simulaation testaaminen vaatisi spektrofotometrin, jonka avulla pintojen heijastus- ja läpäisysuhteet pystyttäisiin mittaamaan tarkemmin. Myös fotometrinen verkkotiedostojen käyttö 3d-mallin valonlähteissä parantaisi testin paikkansapitävyyttä.

Tämän opinnäytetyön yhteydessä ei varmuudella selvinnyt, kuinka tarkasti VIZ-ohjelman valaistussimulaatio toimii. Teorian perusteella simulaation pitäisi toimia moitteettomasti. Mittausongelmat kuitenkin estivät teorian todistamisen käytännössä. Joka tapauksessa VIZ-ohjelman valaistussimulaation avulla saa renderöityä erittäin aidon näköisiä kuvia.

## LÄHTEET

Autodesk VIZ 2007 User Reference [verkkojulkaisu]. Autodesk, Inc. Saatavissa  
Autodesk VIZ 2007 asennuskansiossa: VIZ2007\help\3dsviz.chm

Birn, J. 2006. Digital Lighting and Rendering. 2. painos. Berkeley: New Riders.

Halonen, L. & Lehtovaara, J. 1992. Valaistustekniikka. Espoo: Otatieto Oy.

Lehto, H. & Luoma, T. 1995. Fysiikka 2. 1.-2. painos. Helsinki: Kirjayhtymä Oy.

Linkoaho, M. & Valjakka, J. 1982. Valo-oppi. Espoo: Otakustantamo.

Omura, G., Onstott, S. & McFarland, J. 2006. Mastering Autodesk VIZ 2007.  
Indianapolis: Wiley Publishing, Inc.

Tiainen, J. & Mäkelä, P. 1993. Tietojätti. Jyväskylä: Gummerus Kustannus Oy.

## KUVALÄHTEET

Autodesk VIZ 2007 User Reference [verkkojulkaisu]. Autodesk, Inc. Saatavissa  
Autodesk VIZ 2007 asennuskansiossa: VIZ2007\help\3dsviz.chm

Holek 2007 Color temperature [verkkojulkaisu].

Saatavissa: [http://en.wikipedia.org/wiki/Color\\_temperature](http://en.wikipedia.org/wiki/Color_temperature)

Photopic vision [verkkojulkaisu]. Saatavissa:

<http://en.wikipedia.org/wiki/Photopic>

Donaldson, R. 1988 Cocktail [DVD-elokuva]. Touchstone Pictures.

## LIITTEET

### Liite 1.

#### Pintojen läpäisy-suhteiden mittaustulokset

|                               | mittaus 1 | mittaus 2 | mittaus 3 | mittaus 4 | KESKIARVO   |
|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|
| <b>Verhokangas</b>            |           |           |           |           |             |
| Valaistusvoimakkuus           | 23        | 540       |           |           |             |
| Valoeksistanssi               | 7,8       | 196       |           |           |             |
| Läpäisy-suhte                 | 33,9 %    | 36,3 %    |           |           | <b>35 %</b> |
| <b>Kattolampun varjostin</b>  |           |           |           |           |             |
| Valaistusvoimakkuus           | 740       | 248       |           |           |             |
| Valoeksistanssi               | 540       | 175       |           |           |             |
| Läpäisy-suhte                 | 73,0 %    | 70,6 %    |           |           | <b>72 %</b> |
| <b>Jalkalampun varjostin</b>  |           |           |           |           |             |
| Valaistusvoimakkuus           | 2500      | 2200      | 2900      | 2200      |             |
| Valoeksistanssi               | 320       | 190       | 800       | 240       |             |
| Läpäisy-suhte                 | 12,8 %    | 8,6 %     | 27,6 %    | 10,9 %    | <b>15 %</b> |
| <b>Lammaslampun varjostin</b> |           |           |           |           |             |
| Valaistusvoimakkuus           | 9500      | 8000      |           |           |             |
| Valoeksistanssi               | 650       | 450       |           |           |             |
| Läpäisy-suhte                 | 6,8 %     | 5,6 %     |           |           | <b>6 %</b>  |



Liite 2.

Pintojen heijastussuhteiden mittaustulokset

|                      | mittaus 1 | mittaus 2 | mittaus 3 | mittaus 4 | mittaus 5 | mittaus 6 | KESKIJARVO  | KORJAUS     |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|-------------|
| <b>Parketti</b>      |           |           |           |           |           |           |             |             |
| Valaistusvoimakkuus  | 125       | 555       | 26        | 90        | 22        | 700       |             |             |
| Valoeksistanssi      | 59        | 155       | 8         | 23        | 9         | 180       |             |             |
| Heijastussuhde       | 47,2 %    | 27,9 %    | 30,8 %    | 25,6 %    | 40,9 %    | 25,7 %    | <b>33 %</b> | <b>38 %</b> |
| <b>Tiili</b>         |           |           |           |           |           |           |             |             |
| Valaistusvoimakkuus  | 92        | 38        | 55        | 98        | 49        | 660       |             |             |
| Valoeksistanssi      | 20        | 12        | 12,5      | 23        | 12        | 190       |             |             |
| Heijastussuhde       | 21,7 %    | 31,6 %    | 22,7 %    | 23,5 %    | 24,5 %    | 28,8 %    | <b>25 %</b> | <b>35 %</b> |
| <b>Tapetti</b>       |           |           |           |           |           |           |             |             |
| Valaistusvoimakkuus  | 33        | 33        | 49        | 58        | 32        | 270       |             |             |
| Valoeksistanssi      | 23        | 25        | 33        | 52        | 23        | 200       |             |             |
| Heijastussuhde       | 69,7 %    | 75,8 %    | 67,3 %    | 89,7 %    | 71,9 %    | 74,1 %    | <b>75 %</b> | <b>80 %</b> |
| <b>Kattolaudat</b>   |           |           |           |           |           |           |             |             |
| Valaistusvoimakkuus  | 17        | 10,4      | 21        | 190       |           |           |             |             |
| Valoeksistanssi      | 12        | 6,5       | 12        | 71        |           |           |             |             |
| Heijastussuhde       | 70,6 %    | 62,5 %    | 57,1 %    | 37,4 %    |           |           | <b>57 %</b> | <b>62 %</b> |
| <b>Matto</b>         |           |           |           |           |           |           |             |             |
| Valaistusvoimakkuus  | 29        | 38        | 10,5      | 205       | 750       |           |             |             |
| Valoeksistanssi      | 11        | 11        | 3,8       | 60        | 190       |           |             |             |
| Heijastussuhde       | 37,9 %    | 28,9 %    | 36,2 %    | 29,3 %    | 25,3 %    |           | <b>32 %</b> | <b>42 %</b> |
| <b>Sohvakangas</b>   |           |           |           |           |           |           |             |             |
| Valaistusvoimakkuus  | 11        | 340       | 400       | 210       | 500       |           |             |             |
| Valoeksistanssi      | 2         | 25        | 62        | 17        | 43        |           |             |             |
| Heijastussuhde       | 18,2 %    | 7,4 %     | 15,5 %    | 8,1 %     | 8,6 %     |           | <b>12 %</b> | <b>22 %</b> |
| <b>Jakkarakangas</b> |           |           |           |           |           |           |             |             |
| Valaistusvoimakkuus  | 44        | 735       | 815       |           |           |           |             |             |
| Valoeksistanssi      | 16        | 250       | 155       |           |           |           |             |             |
| Heijastussuhde       | 36,4 %    | 34,0 %    | 19,0 %    |           |           |           | <b>30 %</b> | <b>40 %</b> |
| <b>Verhokangas</b>   |           |           |           |           |           |           |             |             |
| Valaistusvoimakkuus  | 24        | 23        | 490       | 640       |           |           |             |             |
| Valoeksistanssi      | 12        | 5         | 230       | 67        |           |           |             |             |
| Heijastussuhde       | 50,0 %    | 21,7 %    | 46,9 %    | 10,5 %    |           |           | <b>32 %</b> | <b>42 %</b> |
| <b>Hyllypuu</b>      |           |           |           |           |           |           |             |             |
| Valaistusvoimakkuus  | 55        | 410       | 311       | 360       |           |           |             |             |
| Valoeksistanssi      | 6,7       | 64        | 57        | 48        |           |           |             |             |
| Heijastussuhde       | 12,2 %    | 15,6 %    | 18,3 %    | 13,3 %    |           |           | <b>15 %</b> | <b>20 %</b> |

### Liite 3.

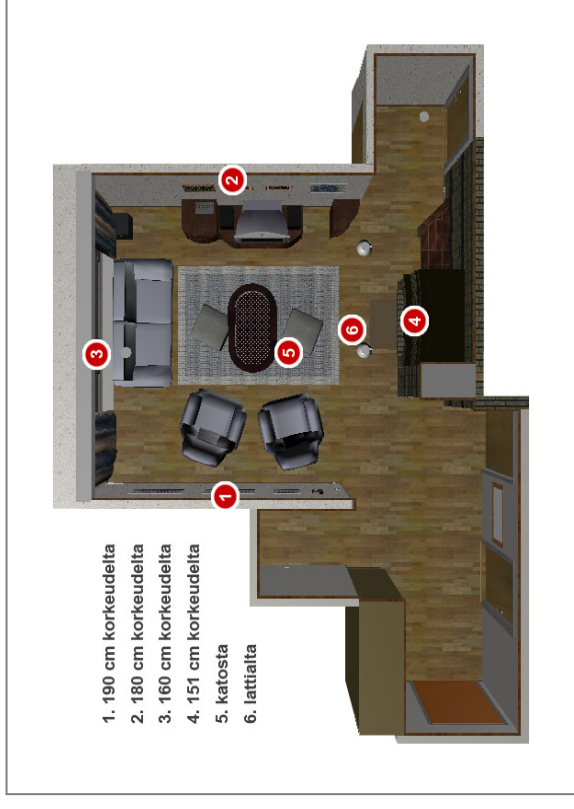
## Valaistusvoimakkuuden mittaustulokset aidosta tilasta ja sen 3d-mallista

|                         | VALAISTUSYHDISTELMÄ 1 |               |                  | VALAISTUSYHDISTELMÄ 2 |               |                  | VALAISTUSYHDISTELMÄ 3 |               |                  |
|-------------------------|-----------------------|---------------|------------------|-----------------------|---------------|------------------|-----------------------|---------------|------------------|
|                         | aito tila (lx)        | 3d-malli (lx) | % kirkkauseero * | aito tila (lx)        | 3d-malli (lx) | % kirkkauseero * | aito tila (lx)        | 3d-malli (lx) | % kirkkauseero * |
| Mittauskohta 1 (190 cm) | 19,1                  | 21,0          | <b>91 %</b>      | 0,73                  | 0,54          | <b>135 %</b>     | 16,5                  | 7,6           | <b>217 %</b>     |
| Mittauskohta 2 (180 cm) | 15,6                  | 15,6          | <b>100 %</b>     | 0,35                  | 0,43          | <b>81 %</b>      | 7,4                   | 4,0           | <b>185 %</b>     |
| Mittauskohta 3 (160 cm) | 25,3                  | 23,3          | <b>109 %</b>     | 0,78                  | 0,67          | <b>116 %</b>     | 10,5                  | 6,3           | <b>167 %</b>     |
| Mittauskohta 4 (151 cm) | 11,6                  | 11,7          | <b>99 %</b>      | 1,01                  | 0,90          | <b>112 %</b>     | 6,0                   | 4,5           | <b>133 %</b>     |
| Mittauskohta 5 (katto)  | 21,9                  | 23,6          | <b>93 %</b>      | 0,68                  | 1,00          | <b>68 %</b>      | 9,0                   | 5,3           | <b>170 %</b>     |
| Mittauskohta 6 (lattia) | 11,4                  | 12,5          | <b>91 %</b>      | 3,99                  | 1,64          | <b>243 %</b>     | 6,5                   | 4,0           | <b>163 %</b>     |

\* % kirkkauseero tarkoittaa aidon mittaustuloksen suhdetta simuloituun mittaustulokseen

Aidon tilan mittaukset tehtiin Tenmars DL-202 valaistusvoimakkuusmittarilla

3d-mallin mittaukset tehtiin radiositeettiasennan initial quality -arvolla 95 % ja refine iterations -arvolla 10



Liite 4.1

Valaistusyhdistelmä 1 (5-haarainen kattovalaisin). Kuvakulma 1.



Valokuva. Valotusaika 0,8 s.



Renderöinti. Brightness 105. Contrast 60.

Liite 4.2

Valaistusyhdistelmä 1 (5-haarainen kattovalaisin). Kuvakulma 2.



Valokuva. Valotusaika 0,8 s.



Renderöinti. Brightness 105. Contrast 60.

Liite 4.3

Valaistusyhdistelmä 1 (5-haarainen kattovalaisin). Kuvakulma 3.



Valokuva. Valotusaika 0,8 s.



Renderöinti. Brightness 105. Contrast 60.

Liite 4.4

Valaistusyhdistelmä 2 (hyllyvalaisimet). Kuvakulma 1.



Valokuva. Valotusaika 6 s.



Renderöinti. Brightness 140. Contrast 65.

Liite 4.5

Valaistusyhdistelmä 2 (hyllyvalaisimet). Kuvakulma 2.



Valokuva. Valotusaika 6 s.



Renderöinti. Brightness 140. Contrast 65.

Liite 4.6

Valaistusyhdistelmä 2 (hyllyvalaisimet). Kuvakulma 3.



Valokuva. Valotusaika 6 s.



Renderöinti. Brightness 140. Contrast 65.



Liite 4.7

Valaistusyhdistelmä 3 (jalkalamput). Kuvakulma 1.



Valokuva. Valotusaika 1,6 s.



Renderöinti. Brightness 120. Contrast 60.

Liite 4.8

Valaistusyhdistelmä 3 (jalkalamput). Kuvakulma 2.



Valokuva. Valotusaika 1,6 s.



Renderöinti. Brightness 120. Contrast 60.

Liite 4.9

Valaistusyhdistelmä 3 (jalkalamput). Kuvakulma 3.



Valokuva. Valotusaika 1,6 s.



Renderöinti. Brightness 120. Contrast 60.

## Liite 4.10

### Kameran asetukset kaikissa valokuvissa:

- keinovalolle säädetty valkotasapaino
- ISO 50
- aukko f/4.0

### Radiositeetilaskennan asetukset kaikissa renderöinneissä:

- initial quality 95 %
- refine iterations (all objects) = 10
- refine iterations (selected objects) = vaihteleva määrä

### Exposure control asetukset kaikissa renderöinneissä:

- mid tones 1,0
- color correction RGB 255, 211, 182