



Juuso Partanen

Pölyn visualisointi 3D-grafiikassa

Realistisen materiaaliratkaisun suunnittelu ja toteutus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Muotoilija (AMK)

3D-animointi ja -visualisointi

Opinnäytetyö

4.3.2026

Tiivistelmä

Tekijä(t): Juuso Partanen
Otsikko: Pölyn visualisointi 3D-grafiikassa
Sivumäärä: 50 sivua
Aika: 4.3.2026

Tutkinto: Muotoilija (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Muotoilun tutkinto-ohjelma
Pääaine: 3D-animointi ja -visualisointi
Ohjaaja(t): Lehtori Jaro Lehtonen

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan pölyä oikean maailman ilmiönä ja kehitetään havaintojen pohjalta realistinen pölymateriaali käytettäväksi 3D-ympäristön pinnoilla. Tavoitteena on tuoda esiin havainto siitä, että pöly on todellisuudessa keskeinen ja kaikkialla läsnä oleva ilmiö, mutta 3D-grafiikassa sen esittäminen on erittäin vähäistä.

Työssä tutkitaan erityisesti huonepölyn koostumusta, optisia ominaisuuksia ja kertymistä pinnoille sekä analysoidaan sen merkitystä visuaalisen median teoksen uskottavuudelle ja tarinankerronnalle.

Havaintojen pohjalta suunnitellaan ohjelma-agnostinen, node-pohjainen pölymateriaali, joka mahdollistaa pinnoille laskeutuneen pölyn määrän portaattoman määrittämisen. Ratkaisu perustuu pintojen ylössuuntaisuutta hyödyntävään adaptiiviseen maskiin, joka mahdollistaa pölyisyyden asteentarkan säädön.

Olen käyttänyt OpenAI:n ChatGPT:n versiota 5.2 apuna kappaleiden jäsentelyssä sekä tekstin oikolukemisessa. Opinnäytetyön tekijänä olen vastuussa kaikesta opinnäytteeni sisällöstä.

Asiasanat: 3D-grafiikka, realistinen pöly, pölyn visualisointi, pölymateriaali, pölyinen ympäristö, pölyinen pinta, huonepöly

Opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

Abstract

Author(s): Juuso Partanen
Title: Visualization of dust in 3D graphics
Number of Pages: 50 pages
Date: 4 March 2026

Degree: Bachelor of Culture and Arts
Degree Programme: Design
Major: 3D animation and visualization
Instructor(s): Jaro Lehtonen, Senior lecturer

This thesis examines dust as a real-world phenomenon and based on these observations develops a realistic dust material for use on surfaces in 3D environments. The aim is to highlight that dust is a central and ubiquitous phenomenon, yet its representation in 3D graphics is very limited.

The study focuses on the composition, optical properties, and accumulation behavior of household dust, and analyzes its impact on realism and storytelling in works of visual media.

Based on these observations, we design a software-agnostic, node-based dust material that provides full control over the amount of dust accumulated on surfaces. The solution is based on an adaptive mask driven by surface upward orientation, which enables degree-based control over dust distribution.

I have used OpenAI's ChatGPT version 5.2 to assist in structuring paragraphs and proofreading the text. As the author of this thesis, I am responsible for all its content.

Keywords: 3D graphics, realistic dust, dust visualization, dust material, dusty environment, dusty surface, house dust

This thesis has been checked using Turnitin Originality Check service.

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Pöly ilmiönä	2
2.1	Pöly osana jokapäiväistä ympäristöä	2
2.2	Pölyn määritelmä, syntyminen ja koostumus	2
2.3	Pölyn kulkeutuminen ja kertyminen pinnoille	4
2.4	Pölyn vaikutus pintojen optisiin ominaisuuksiin	5
3	Pöly visuaalisessa mediassa	7
3.1	Pölyn käyttö taiteessa ja sen merkitys tarinankerronnalle	7
3.2	Pölyn tärkeys visuaalisen teoksen realistisuudelle	12
3.3	Pölyn visualisoinnin menetelmät visuaalisessa mediassa	13
4	Realistisen pölymateriaalin suunnittelu ja toteutus	19
4.1	Lähestymistavat pölyn lisäämiseksi 3D-ympäristöihin	19
4.2	Adaptiivisen maskin luominen ja kehitys pölymateriaalille	20
4.3	Pölymateriaalin luominen ja yhdistäminen maskiin	26
4.4	Havainnollistavat renderöinnit ja visuaaliset vertailut	37
4.5	Toteutustavan rajoitteet ja kehittymismahdollisuudet	41
5	Yhteenveto	43
	Lähteet	45
	Kuvalähteet	46

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tarkastella, miksi pölyn visualisointi on usein jätetty vähäiselle huomiolle 3D-grafiikassa, ja osoittaa, millaista visuaalista ja narratiivista potentiaalia tämän ilmiön johdonmukainen esittäminen voisi tarjota. Opinnäytetyössä esitettävät positiiviset esimerkit pölyn käytöstä tulevat pääosin käytännön tehosteita hyödyntävistä elokuvista, kun taas negatiivisina esimerkkeinä toimivat modernit videopelit, joissa pölyä käytetään usein valikoivasti, tai ei lainkaan.

Pölyn rajallinen ja epäjohdonmukainen käyttö herättää kysymyksen siitä, voidaanko pölyn kertymistä visualisoida 3D-grafiikassa tavalla, joka on kevyt, joustava ja uskottava.

Teemme ensin havaintoja pölyn roolista osana oikeaa maailmaa, kuten mistä se tulee, mistä se koostuu, sekä millaiset tekijät vaikuttavat sen ulkonäköön ja materiaaliominaisuuksiin 3D-grafiikan kontekstissa. Tämän jälkeen tarkastelemme pölyn käytön vaikutusta erilaisissa visuaalisissa teoksissa sekä sitä, millaisia merkityksiä sen läsnäololla ja puuttumisella voidaan ilmaista, niin tarkoituksella kuin tahattomasti.

Lopuksi toteutamme kartoitetun tiedon pohjalta realistisen pölymateriaalin toteutusehdotuksen ohjelma-agnostisin periaattein nodeja käyttävällä materiaaleditorilla. Tavoitteena on ratkaisu, jolla voidaan lisätä pinnoille laskeutunutta pölyä kokonaiseen 3D-ympäristöön siten, että pölyntymisen asteisuutta on helppo säätää. Tutkimuksen kohteena toimii erityisesti huonepöly, mutta pölyn tarkastelun ja jäljentämisen periaatteet ovat sovellettavissa myös muunlaisten pölyjen esittämiseen.

2 Pöly ilmiönä

Tämä kappale tarkastelee pölyä oikean maailman ilmiönä. Tutkimme, mitä pöly on, miten se syntyy, mistä se koostuu ja kuinka se käyttäytyy. Lisäksi tarkastelemme miltä erilaiset pölyt näyttävät ja miten pölyt kumuloituvat erilaisille pinnoille.

2.1 Pöly osana jokapäiväistä ympäristöä

Pölyä on kaikkialla ja se on aina läsnä. Se on luonnollinen osa arkipäiväistä ympäristöä ja sitä esiintyy niin sisätiloissa kuin ulkonakin. Taistelemme siivoamalla pölyä vastaan, mutta täysin pölyttömäksi mitään tilaa emme koskaan saa. Jopa siivoamaan ryhtymisestä synnyttämämme ilmavirrat nostavat pölyä leijaillemaan ilmaan, joka laskeutuu takaisin pinnoille heti kun ilma on taas hetken paikallaan (History of Simple Things 2024. Why Does Dust Build Up Even in Closed Spaces? [ID0629]).

Pölyä kertyy jatkuvasti, sillä se on kaiken ympäröimämme aina käynnissä olevaa hidasta hajoamista. Seiniemme maali rapisee, huonekalut haurastuvat, vaatteemme hajoavat ja jopa me hajoamme (History of Simple Things 2024). Yksittäisten pölyhiukkasten jatkuvaa syntymistä on lähes mahdotonta havaita, mutta ne ovat aina läsnä, jos vain katsomme tarpeeksi tarkasti.

2.2 Pölyn määritelmä, syntyminen ja koostumus

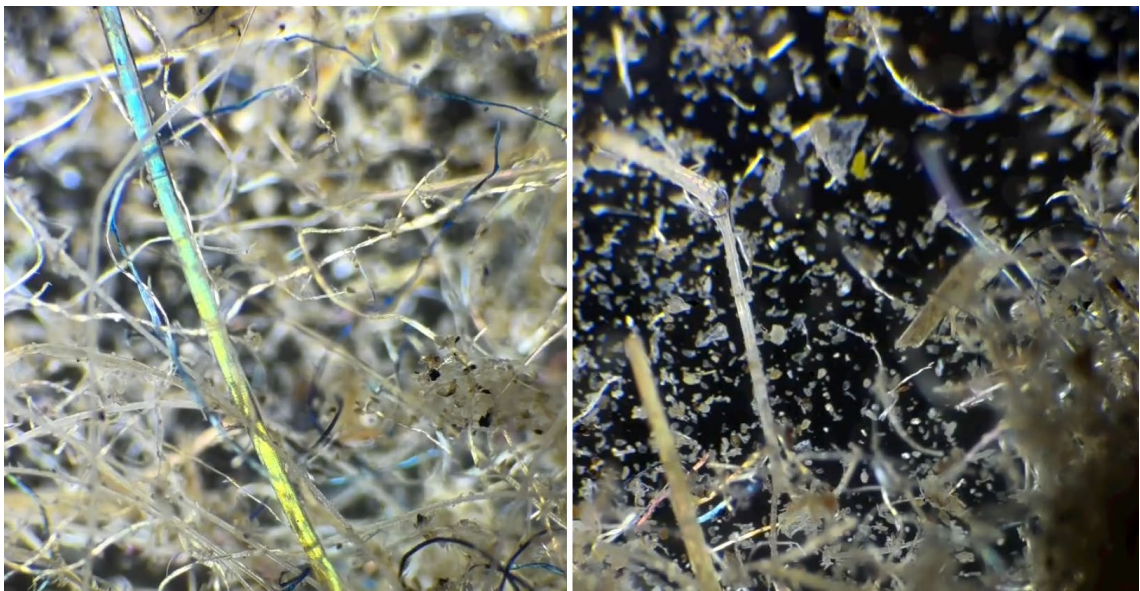
Pölyä ei voi varsinaisesti määrittää sen perusteella minkälaisesta materiaalista se koostuu, vaan se on ennemminkin nimitys kaikelle hienojakoiselle materiaalille tiettyyn kokoluokkaan asti. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että pöly voi olla lähes mitä tahansa materiaalia. Voimme kuitenkin tutkia pölyä sen ympäristön mukaan, jossa se esiintyy, jolloin osaamme kertoa minkälaisista aineista pöly pääosin koostuu.

Huonepölyn koostumus asutetussa kotitaloudessa vaihtelee merkittävästi lähiympäristön tekijöiden perusteella, mutta yleisesti ilmeneviä materiaaleja ovat

vaatteiden ja muiden kodin tekstiilien kuidut, maalit, homeet, siitepölyt, maainekset, rakennusmateriaalit, liikenteen ja teollisuuden saasteet, ihmisten ja lemmikkien ihosolut, hilse, hiukset ja karvat, sekä kuolleet ötökät ja niiden osat (Paustenbach, D. J., Finley, B. L., Long, T. F. 1997. The Critical Role of House Dust in Understanding the Hazards Posed by Contaminated Soils, 345).

Pelkästään huonepölynkin koostumus on siis äärimmäisen monimuotoinen, mutta määrällisesti merkittävimpiä tekijöitä asutetun kotitalouden huonepölyn muodostavat tekstiilikuidut, jotka sitovat kaiken pölymassan yhteen, sekä orgaaniset materiaalit, kuten kuollut iho, hiukset, ja kaikenkokoisten ötököiden rippeet. (Chesterton, M. 2017. Crowd Science. What is dust?)

Pölyksi määriteltävien hiukkasten koko on yleisesti ottaen niin pieni, että yksittäisten hiukkasten pigmenttiä ei paljaalla silmällä pysty erottamaan. Mikroskoopilla tarkasteltuna voi kuitenkin havaita näiden hiukkasten alkuperänä toimineen materiaalin pigmenttiä jonkin verran (Kuva 1), mutta paljaalla silmällä tarkasteltuna näiden partikkeleiden muodostama yhtenäinen seos näyttäytyy tuntemanamme tuttua harmaana höttöä (Chesterton, M. 2017).



Kuva 1. Tehokas mikroskooppi pystyy paljastamaan harmaan pölymassan muodostavien yksittäisten hiukkasten värityksiä. Geldhof 2023.

Mikäli lähialueella on huomattavan paljon katupölyä tai muuta ilmassa tuulen mukana liikkuvaa maa-ainesta, saattaa tämä ilmentyä huomattavana osana huonepölyn koostumusta, vaikuttaen jopa sen väritykseen. Tästä hieman epämiellyttävänä esimerkkinä toimii vuonna 1861 Lontoossa tehty lähempi tarkastelu kaupungin talojen lattiapölyyn, joka osoitti, että pöly koostui pääosin kuivuneesta hevosen lannasta. Sen arvioitiin tulleen kulkeutuneeksi sisätiloihin pääasiassa ajan muotiin kuuluneiden pitkien hameiden helmojen välityksellä (Bronswijk, J. E. M. H. v. 1981. House dust biology for allergists, acarologists and mycologists, 4).

2.3 Pölyn kulkeutuminen ja kertyminen pinnoille

Pölyksi määriteltävän materiaalin hiukkaskoko vaihtelee ultrapienistä (<100 nm) paljain silmin erotettaviin hiukkasiin. Hienempi pöly pystyy liikkumaan ilmassa ilmavirtojen mukana, kun taas raskaampi pöly liikkuu pyörimällä maata pitkin (Dust, Saksa 2007). Hienojakoinen pöly on kuitenkin aina läsnä siellä missä on pölyä, ja huoneiden pölyntyminen alkaa huomaamattomasti tämän kerroksen asettuessa vaivihkaa pinnoille ajan kuluessa, kerros kerrokselta.

Vaikka huonepölyä syntyykin sisätiloissa aivan itsestään, huomattava määrä pölyä kulkeutuu myös pienten ilmavirtausten, sekä ihmisten ja lemmikkieläinten mukana jokaisen ulkona käynnin seurauksena vaatteissa, turkissa, iholla ja hiuksissa. Jos sisätilaan ei pääse ilmavirtaa eikä siellä käy kukaan viemässä ”pölykuljetusta”, ei ulkomaailman pöly pääse näin ollen kertymään sisälle (Taylor, M. P., Barlow, C. F., Fry, K., Max, M. G. 2021. What is dust? And where does it all come from?). Tämä voi vaikuttaa merkittävästi sisätiloissa ilmenevän pölyn määrään ja ulkonäköön.
















Hienojakoinen pöly laskeutuu, kun painovoima voittaa tilan ilmavirtaukset. Hitaasti laskeutuvat hiukkaset päätyvät ensisijaisesti vaakasuorille, ylöspäin suuntautuville pinnoille, joille ne jäävät, ellei niitä häiritä. Kun tämä laskeutumisen prosessi saa jatkoa, ohut kerros pölyä alkaa muuttua ajan mittaan näkyvämmäksi (History of Simple Things 2024). Häiritsemättömässä

tilassa pöly jakautuu vaakapinnoille melko tasaisesti, kun taas aktiivisemmassa ympäristössä sillä on taipumus kertyä nurkkiin ja suojaisiin kohtiin.






2.4 Pölyn vaikutus pintojen optisiin ominaisuuksiin

Pölyn koostumuksen monimuotoisuuden takia sen varsinaisia materiaaliominaisuuksia on hankalaa määrittää tarkasti, ja todellisuudessa pölykerroksen paksuus vaikuttaa merkittävästi sen optisiin ominaisuuksiin. Siinä missä erittäin ohut pölykerros ei muuta sen alla olevan pinnan optisia ominaisuuksia juuri lainkaan, paksumpi kerros pölyä taas ei välttämättä näytä sen alla olevaa pintaa ollenkaan.

Pölyn hienojakoisuus hajottaa heijastuksia, joka tekee siitä 3D-grafiikan termein ilmaistuna erittäin karkean ja kiillon tasoltaan (specular level) hyvin alhaisen materiaalin (Guo, J. & Pan, J. 2014. Real-time simulating and rendering of layered dust). Metallisuusarvoa käyttävässä pinnan sävytyksessä myös pintojen metallisuuden taso vähenee sitä mukaa kun pöly kertyy peittämään niitä (Kuvat 2 ja 3). Teoriassa pöly voi muodostua metallisista ja kiiltävistä komponenteista, mutta yleisesti ottaen huonepöly ei ole lainkaan metallista tai kiiltävää.

	0.0	0.25	0.5	0.75	1.0
Karkeus					
Kiillon taso					
Metallisuus					

Kuva 2. Havainnekuva karkeuden, kiillon tason ja metallisuuden eri arvoista.

Karkeus	0.0	0.25	0.5	0.75	1.0
Kiillon taso / Metallisuus	1.0	0.75	0.5	0.25	0.0
					

Kuva 3. Kiillotetun metallipinnan totaalista pölyllä peittymistä simuloivia arvoja.

Erittäin paksusti peittävä pöly voi perustellusti vaikuttaa 3D-asettien pinnoilla myös pinnan yksityiskohtaisuutta kuvaavaan normaalikanavaan, mutta tämä riippuu hyvin paljon siitä, minkälaisen ominaisuuksien kuvaamiseen normaalitekstuureita käytetään. Esimerkiksi puhtaasti yksityiskohtaisuutta luovia, saumattomasti toistuvia normaalitekstuureita voidaan yleensä häivyttää pölyn kumuloituessa täysin huoletta, sillä se vain vahvistaa vaikutelmaa siitä, että pienemmät yksityiskohdat ovat yksinkertaisesti pölyn peittämiä.

Esineen suurempia muotoja, kuten kulmia pyöristäviä viisteitä määrittävän normaalitekstuurin häivyttäminen taas ei ole kannattavaa, sillä tällöin pölykerros hävittäisi alleen esineen muodolle olennaisia ominaisuuksia.

Pintojen läpinäkyvyys myös luonnollisesti vähenee pölyn kertyessä, josta ensimmäisenä silminnähtävissä ovat suuret yksittäiset hiukkaset. Hitaasti kerros kerrokselta paksuuntuva huntuhienojakoista pölyä pystyy muuttamaan lopulta läpinäkyvät pinnat täysin läpinäkymättömiksi (Gu, J., Ramamoorthi, R., Belhumeur, P., Nayar, S. & Kautz, J. ; P. 2007. Dirty glass: Rendering contamination on transparent surfaces, 166).

3 Pöly visuaalisessa mediassa

Tämä kappale tarkastelee pölyn esiintyvyyttä ja merkitystä taiteessa osana tarinankerrontaa, sekä miten sen läsnäolo tai poissaolo vaikuttavat teoksen tunnelmaan ja uskottavuuteen. Lopuksi analysoimme pölyn esittämisen toteutustapoja videotuotannossa ja videopeleissä.

3.1 Pölyn käyttö taiteessa ja sen merkitys tarinankerronnalle

Pölyllä on vahva symboliikka, ja se viestii sitä niin alitajuisesti kuin tiedostavallakin tasolla. Pinnat täyttävä pöly kertoo ajan kulusta, toimien ikään kuin tilan muistina jokaisesta kuluneesta hetkestä, kun se on yksinäisyydessään vain mitannut aikaa. Pölyinen tila herättää tunteita, kuten haikeutta, joka on kuin muisto jostain kauan sitten menetetystä. Rungas ja koskematon pöly saa tilan tuntumaan laiminlyödyttä ja saattaa herättää ajatuksia kuolevaisuudesta ja kuolemasta.

Pölyinen tila herättää myös kysymyksiä, kuten esimerkiksi siitä, mikä on johtanut tilan nykyiseen jamaan. Milloin tilassa on viimeksi ollut joku? Kuka sitä on asuttanut? Millainen tila on ollut silloin, kun sitä on käytetty? Onko tila jätetty unohduksiin tarkoituksella, vai onko se jouduttu jättämään pakosta? Olemmeko me ensimmäinen, joka vieraillee tässä tilassa sen hylkäämisen jälkeen? Onko tila turvallinen?

Pölyn kuvaaminen on aivan omiaan Vanitas-tyylin maalaustaiteessa, jonka asetelmat sisältävät muun muassa kalloja, kuolleita kasveja ja mätäneviä

hedelmiä, tarkoituksena herättää ajatuksia kaiken väliaikaisuudesta (Kuva 4). Pinnoille kertynyt pöly on kuitenkin harvinainen ilmentymä jopa tämän tyylin maalauksissa, mutta silloin kun sitä käytetään, se tuntuu voimistavan välittyvää viestiä entisestään.



Kuva 4. Steenwijck 1640. Volumetrinen valonsäde viestii ilmassa leijailevasta pölystä, sekä pintoja peittää kerros asettunutta pölyä, joka näkyy etenkin pääkallon päällä.

Elokuviissa käytetään pölyä tarinankerronnan välineenä selvästi muita visuaalisia medioita useammin, joista hyvinä esimerkkeinä toimii vaikkapa se, miten *Arkajalat (The Goonies)* -elokuvassa pojat löytävät pölyiseltä ullakolta vaikuttavan kokoelman merirosvoaiheisia esineitä sekä niiden joukossa olleen autenttisen aarrekartan, jonka peittämä pöly kertoo sen olleen vuosikausia vain odottamassa vertaisiaan aarteenetsijöitä.

Tai se, kun *Interstellar*issa Murph palaa aikuisena kotitalalleen ja löytää lapsuudenhuoneensa ennallaan, mutta kauttaaltaan hiekkapölyn peittämänä. Ikään kuin vain aika olisi asuttanut tuota huonetta, josta kaikki alkoi, ja pitänyt visusti tallessa vastausta hänen tutkimukseensa kaikki nuo vuodet.

Pöly vahvistaa myös merkittävästi *Harry Potter ja salaisuuksien kammio* -elokuvassa kohtausta, jossa Harry matkustaa hormipulveria käyttäen vahingossa täysin tuntemattomaan paikkaan, jossa on esillä kaikenlaisia pelottavan ja vinksahaneen näköisiä asioita (Kuva 5). Tilassa olevat esineet yhdessä sen pölyisyyden kanssa luovat vaikutelman, että siellä oleminen olisi jo kauan ollut kiellettyä.



Kuva 5. *Harry Potter ja salaisuuksien kammio* -elokuvan pimeän taikuuden esineitä myyvä liike, jonne Harry joutuu vahingossa. Kuvakaappaus elokuvasta *Harry Potter ja salaisuuksien kammio* 2002.

Ilman pölyä jokainen edellä mainituista esimerkeistä olisi tuntunut hyvin erilaiselta, eikä niillä ehkä olisi ollut samaa vaikutusta. Sävy olisi ainakin ollut erilainen, eikä kuvatuilla tiloilla olisi välttämättä koettu olevan yhtä paljon kerrottavaa. Pölyn mukana olennainen kerros tilan tarinaa olisi puuttunut.

Pölyn poissaolollakin voi olla vahva symboliikka, jolla voidaan kertoa tarinaa ja herättää tunteita. Pölyttömyys voi toki viestiä puhtaudesta, mutta se voi myös tuntua liian steriililtä ja synteettiseltä, jota voidaan käyttää tarkoituksella tehokeinona. Pölyttömyys, yhdessä muunlaisen tilan puhtauden kanssa voivat

saada aikaan vaikutelman ikään kuin tilassa olisi aika kokonaan seisahtunut, tai kuin se olisi täysin ajan vaikutuksen ulkopuolella.

Elokvassa *Playtime*, virheettömän puhtaina kiiltävät pinnat yhdessä pitkien staattisten otosten kanssa saavat kuvatut ympäristöt tuntumaan lähes yliluonnollisilta (Kuva 6). Tämä saa tuon muuten niin elävän maailman tuntumaan lavastetulta.



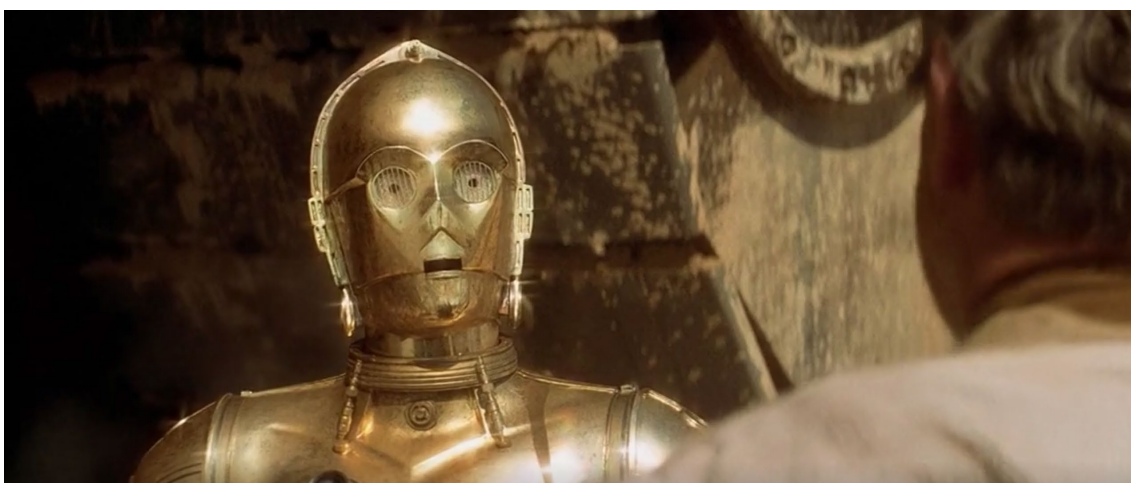
Kuva 6. *Playtime*-elokuvassa siivooja saapuu kuvaan vain katselemaan hämmentyneenä ympärilleen, sillä tila on absoluuttisen puhtas. Kuvakaappaus elokuvasta *Playtime* 1967.

Pöly puhuu vahvasti poissaolonsa kautta hyvin usein myös tulevaisuutta kuvaavissa sci-fi maailmoissa. Pölyisyys on elokuvantekijöiden mielestä selvästi tulevaisuudessa joko täysin ratkaistu ongelma, tai sitten pölyttömyyteen on päädytty sellaisella logiikalla, että kaikki tulevaisuudessa on uutta, ja kaikki uusi on puhdasta. Tästä toimii klassisena esimerkkinä vaikkapa *2001: A Space Odyssey*:ssä kuvattu Hilton Space Station V, jonka toruksen muotoista sisäpintaa pitkin kaartuvat lattiat hohtavat kuin ne olisi juuri äsken asennettu (Kuva 7).



Kuva 7. *2001: A Space Odyssey* -elokuvan edelleenkin futuristiselta näyttävä avaruusasema pitkine käytävineen. Kuvakaappaus elokuvasta *2001: A Space Odyssey* 1968.

Tämänkaltaisen steriilin tulevaisuuden ja pölyisen realismin välin siltasi erittäin onnistuneesti alkuperäinen *Tähtien sota* -trilogia, joka esitti puhtaan ja teollisen suunnitelmallisen avaruusalusten vastapainona myös kuluneita, likaisia ja pölyisiä aluksia, ympäristöjä, sekä hahmoja (Kuva 8). Tämä visuaalinen innovaatio on varmastikin vaikuttanut siihen, miten todelliselta maailma tuntuu, kun pitkä käyttö ja historia ovat jättäneet siihen jälkensä.



Kuva 8. *Star Wars: Uusi toivo* esitti aiemmista scifi tuotannoista poiketen maailman, jossa näkyi lika, ruoste ja ruuvit. Kuvakaappaus elokuvasta *Star Wars: Uusi toivo* 1977.

Yhdessä edeltävät esimerkit pölyn käytöstä vahvistavat sen tärkeyttä visuaalisena ja narratiivisena välineenä. Ne osoittavat myös, että pölyn käyttämättä jättäminen ei ole vain potentiaalinen hukkaaminen, vaan sen poissaololla voidaan myös tahattomasti viestiä jotain sellaista mitä ei ole tarkoitettu.

3.2 Pölyn tärkeys visuaalisen teoksen realistisuudelle

Kun puhutaan teoksen realistisuudesta, pöly on elementtinä aivan omiaan kohottamaan sen koettua aitoutta. Pölyn puuttuminen ei kuitenkaan suoraan tarkoita sitä, etteikö ympäristö voisi tuntua täysin autenttiselta. Varsinkin arkisissa ympäristöissä pölyä on kyllä aina läsnä, mutta vain siinä määrin, että se on usein täysin huomaamattomissa. Näin ollen sen kokonaan puuttumista tuskin tullaan huomaamaan edes alitajuisella tasolla. Hienovarainenkin pölyn lisääminen voisi kuitenkin lisätä todentuntuisuutta arkisiakin ympäristöjä kuvatessa.

Pölyn kokonaan puuttuminen voi muodostua ongelmaksi, jos ympäristö, jonka kuuluisi perustellusti olla huomattavan pölyinen, onkin täysin pölytön. Se antaa katsojalle ristiriitaista informaatiota, joka voi kiinnittää katsojan huomion tähän ristiriitaan ja harhauttaa itse teoksen tarkoitettua viestiltä, tai johtaa katsotun materiaalin keinotekoisuudesta muistutetuksi tulemiseen, eli immersion rikkoutumiseen.

Videopelit syyllistyvät erittäin usein esittämään ympäristöjä täysin pölyttöminä, joiden pitäisi perustellusti olla kauttaaltaan pölyn peittämiä (Kuva 9), mutta niille on opittu antamaan tämä anteeksi. Ehkäpä siksi, että videopelien grafiikan on nähty kehittyvän hyvin yksinkertaisista lähtökohdista kohti tämän päivän fotorealismia, ja olemme vain oppineet matkan varrella hyväksymään, ettei aivan jokaista oikean maailman ilmiötä pystytä esittämään. On myös totta, että mitä yksityiskohtaisempia asioita videopelin grafiikoissa pyritään esittämään, niin sitä monimutkaisempaa niitä on kehittää, joten onkin aivan kohtuullista vetää raja johonkin realismin tavoittelussa.



Kuva 9. *Shadow of the Tomb Raider* -pelissä muinaisesta Mayojojen temppelistä löytyvä mekanismi, joka on säilynyt aikakausien läpi täysin pölyttömänä. Kuvakaappaus pelistä *Shadow of the Tomb Raider* 2018.

On kuitenkin mielenkiintoista, että pelien elokuvamaisuuden esikuvana toimivat elokuvat ovat yleisesti ottaen hyvin tunnollisia ja johdonmukaisia pölyn esittämisessä paikoissa, joissa sitä perustellusti kuuluukin olla. Harva elokuvan ohjaaja myöskään jättää tilaisuuden käyttämättä näyttää kuinka päähenkilö paljastaa itselleen ja samalla yleisölle ikivanhan esineen pyyhkimällä pois sitä peittäneen pölykerroksen, tai kuinka ilmaan pöllähtää kuvauksellinen pölypilvi, kun muinainen mekanismi herää ikiunestaan liikkeelle.

3.3 Pölyn visualisoinnin menetelmät visuaalisessa mediassa

Visuaalisen median eri lajeista pölyn peittämiä pintoja nähdään eniten kerronnallisessa videotuotannossa. Elokuvatuotannossa rekvisiitan ja ympäristön pölyttämiseksi käytetään useimmiten erilaisia pulvereita, joista yleisiä ovat saksanpähkinästä tehty jauhe, sekä hienojakoinen savimineraalien seos, jota kutsutaan nimellä "Fuller's earth" (Reeder, Scott 2022. Prop Dusting). Nämä pulverit eivät vastaa oikean huonepölyn koostumusta kovinkaan tarkasti,

mutta niiden tuottama vaikutelma on yleisesti ottaen riittävän vakuuttava ollakseen katsojalle uskottava (Kuva 10).



Kuva 10. Elokuvasa *Kansallisaarre* löydetään vuosisatoja vanha aarrekammio, jota peittävä pöly vaikuttaisi olevan Fuller's earth -savijauhetta. Kuvakaappaus elokuvasta *Kansallisaarre* 2004.

Live action -elokuviissa 3D-grafiikan keinoin toteutettua pölyä on vaikea tunnistaa käytännön efekteistä, joten pystyäksemme tarkastelemaan pölyä, joka on takuu varmasti toteutettu 3D-grafiikan keinoin, on parasta tarkastella täysin tietokoneanimaationa toteutettuja elokuvia.

Tästä hyvänä esimerkkinä toimii *Toy Story 2*, jossa nähdään todella vaikuttavaa pölyn käyttöä, etenkin ottaen huomioon, että elokuva on valmistunut 1999. Ensinnäkin pöly reagoi hahmojen liikkeisiin niin, että se pyyhkiytyy pois pinnoilta kohdista, johon hahmojen liikkeet osuvat. Tarkemmin tarkasteltuna tämä vaikuttaa olevan kuitenkin sarja käsin maalattuja maskeja, eikä todellinen hahmojen liikkeeseen mukautuva tekstuuri. Kohtaus ei ole kovin pitkä, niin tuotannossa on todennäköisesti todettu olevan järkevämpää maalata pölyn esiintymistä rajaavat maskit käsin, kuin suunnitella ja implementoida aidosti reaktiivinen maskisysteemi. Elokuvasa on olemassa making of -materiaalia, mutta ikävä kyllä pölyn toteutusta ei esitellä missään.

Pöly ei myöskään ole vain tekstuuripohjainen ratkaisu, vaikka pohjalla on selkeästi myös sellainen, mutta se on etenkin aikalaisekseen vaikuttavan tiheä kerros pieniä karvartikkeleita, jotka ovat sumppuuntuneet (clumping) luonnollisen näköisesti. Partikkeleiden nähdään myös varisevan ja pöllähtävän hitaasti leijailevaksi pilveksi, mutta kyseessä voi olla pinnalla olevien partikkeleiden mobilisoitumisen sijaan erillinen partikkelisysteemi.



Kuva 11. *Toy Story 2*:n pölyinen hylly on teknologisesti vaikuttava, sekä tarinankerronnallisesti sillä on vahva symboliikka hylätyksi tulemiseen. Kuvakaappauksia elokuvasta *Toy Story 2* 1999.

Videopeleissä pinnoille laskeutuneen pölyn visualisointi on hyvin harvinaista, ja silloin kun sitä näkee, se vaikuttaa olevan aina tehty suoraan osaksi esineen teksturointia. Videopeleissä ympäristön yläpinnoille materiaalin lisääminen on hyvin yleistä silloin kun kyseessä on kerros sammalta tai lunta, mutta tätä periaatetta ei näy juurikaan sovellettavan pölyn kohdalla. Yksinkertaisimmillaan pölyn lisääminen voisi olla laskennallisesti hyvin kevyttä ja kohottaisi heti tuntua ympäristön iästä ja pitkäaikaisesta koskemattomuudesta. Useimmiten tätä tuntua haetaan kuitenkin pinnoille laskeutuneen pölyn sijaan muunlaisin keinoin, joista yleisimpiä ovat kuluma ja lika, hämähäkinseitit sekä ilmassa leijuvat pölypartikkelit.

Resident Evil 7: Biohazard -pelin miljöönä on metsän keskellä sijaitseva kartano, joka on pahoin rappeutunut ja kaikin puolin hylätyn oloinen, vaikka sitä asuttaa omituinen perhe. Kartanossa on paljon pölyisiä pintoja, ja pöly vaikuttaa poikkeuksetta olevan teksturoitu suoraan ympäristössä oleviin asetteihin (Kuva 12). Tämän varmistaa se, että toistuvissa esineissä pölyn ulkonäkö on täysin identtinen. Aivan kaikkien esineiden pinnoilla ei kuitenkaan ole pölyä, mutta huomattavasti suuremmalla määrällä kuin muissa peleissä.



Kuva 12. *Resident Evil 7: Biohazard* -pelissä kyljelleen aseteltu, staattinen pahvilaatikko, jonka päälle teksturoitu pöly on sen pystysuorassa seinämässä. Kuvakaappaus pelistä *Resident Evil 7: Biohazard* 2017.

Hieman valikoivampaa pölyn käyttöä löytyy *Uncharted 4: A Thief's End* -pelissä, jossa 300-vuotiaissa raunioissa ei juuri pölyä nähdä, mutta Bostonilaisen kartanon ullakolla on muutamia esineitä, joiden pintaan on teksturoitu paksu kerros pölyä, niitä ympäröivien esineiden ollen täysin pölyttömiä.

Erytysmainintana kuitenkin eräistä raunioista löytyvä pölyinen pöytä, josta väläanimaatiossa nostetun pikarin alta paljastuu sen jättämä pölytön kohta (Kuva 13).



Kuva 13. *Uncharted 4: A Thief's End* -pelin välianimaatiossa nostetun pikarin alta paljastuva pölytön kohta muuten pölyiseksi teksturoidulla pöydällä. Kuvakaappaus pelistä *Uncharted 4: A Thief's End* 2016.

Edellä mainitut pelit noudattavat videopeleissä yleisesti näkyvää käytäntöä pölyn visualisoinnissa, jossa pölyisiä pintoja käytetään valikoivasti aksentteina, eikä johdonmukaisesti koko ympäristöä koskevana ilmiönä.

Yksi mahdollinen syy pölyn vähäiselle ja paikalliselle käytölle voi olla se, että ympäristöjen materiaalit pyritään pitämään laskennallisesti mahdollisimman kevyinä, eikä erillisen pölymateriaalin laajamittaista lisäämistä välttämättä koeta mahtuvan käytettävissä olevaan laskennalliseen budjettiin tai muihin tuotannollisiin prioriteetteihin.

4 Realistisen pölymateriaalin suunnittelu ja toteutus

Tämä kappale tarkastelee, miten erityyppisiä pölyjä voidaan saavuttaa erilaisin teksturointimenetelmin, sekä miten tehdä adaptiivinen maski, jolla määritetään missä pöly ilmenee esineiden pinnoilla. Lopuksi vertailemme renderöintejä eri asteisesti pölyntyneistä pinnoista, ja arvioimme toteutetun menetelmän vahvuuksia, rajoitteita, sekä mahdollisia jatkokehityssuuntia.

4.1 Lähestymistavat pölyn lisäämiseksi 3D-ympäristöihin

Kun kerros pinnoille laskeutunutta pölyä halutaan lisätä yhtenäisesti laajempaan ympäristöön, on syytä harkita projektille paras ratkaisu. Jokainen tilassa esiintyvä assetti voidaan tehdä jo teksturointivaiheessa pölyiseksi, jolloin pöly ei lisää lainkaan laskennallista kuormaa, mutta jonkin verran teksturoinnin vaatimaa työmäärää. Jos asetteja on tarkoitus käyttää uudelleen myös pölyttömässä ympäristössä, tämä ei ole kannattava ratkaisu. Tällöin aseteille pitäisi tehdä kaksi settiä tekstuureita, toinen puhdas ja toinen pölyinen, mutta tämä kasvattaa projektin kokoa ja tekee aseteista hankalammin hallittavia.

Trimsheet-teksturointimenetelmää käyttävät assetit jäävät kuitenkin tällaisessa toteutuksessa pois pölyisten asettien joukosta, sillä trimsheetin osia hyödyntävien pintojen suuntaisuutta ei tyypillisesti voida hallita riittävän johdonmukaisesti pölyn uskottavaa sijoittumista varten.

Tämä ratkaisu edellyttää myös, että pölyn ulkonäkö on lyöty jo teksturointivaiheen alkaessa lukkoon, sillä pölyn ulkonäköön liittyvien tekijöiden iteroiminen myöhemmin olisi todella hidasta ja rasittavaa. Lisäksi se lukitsee asettien käytön vain ympäristöihin, joissa sen pölyisyys on perusteltua, eikä sitä voi enää asetella vapaasti mihin tahansa asentoon, mikäli pöly on teksturoitu niin, että se on selkeästi laskeutunut esineen yläpinnoille. Tämän ratkaisun näennäinen yksinkertaisuus tarkoittaa siis luopumista monenlaisesta joustavuudesta tuotannon myöhemmissä vaiheissa.

Parempi tapa lisätä pölyä kokonaiseen ympäristöön on sekoittaa erillistä pölymateriaalia pölyttömäksi teksturoituihin asetteihin vasta sävytysvaiheessa. Pölyn lisääminen pintoihin voidaan tehdä erillisellä maskitekstuurilla, tai verteksiväreillä maalatulla maskilla, joka on erityisesti pelimootoreissa yleisesti käytetty materiaalien keskenään sekoittamisen keino. Tällöin säästetään kontrolli muuttaa pölyn ulkonäköä myöhemmässä vaiheessa, mutta pölyn vaikutusalueen määrittäminen ja myöhempi muokkaaminen vaatii paljon käsin maalaamista.

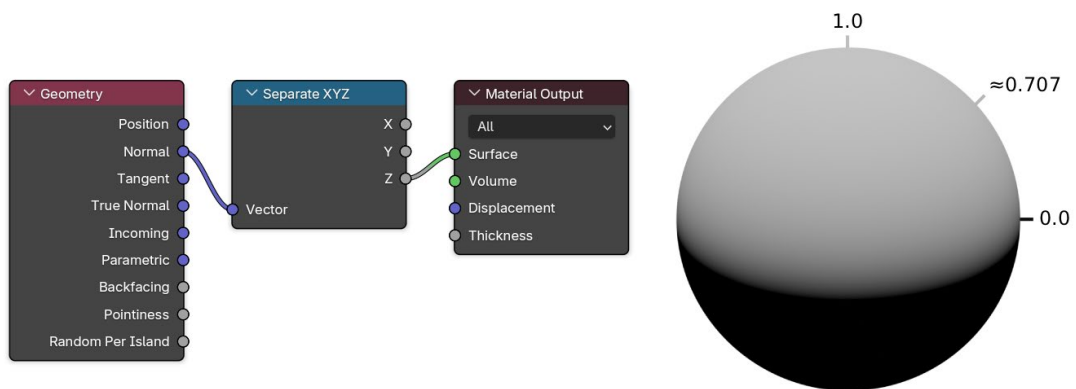
Erillisen pölymateriaalin lisääminen pinnoille onnistuu myös täysin ilman erikseen maalattua maskia, jos se tehdään shaderissa käyttämällä tietoa pintojen yössäsuuntaisuudesta. Tällainen haluttuihin pintoihin mukautuva, eli ns. adaptiivinen maski, mahdollistaa pölyn ilmenemisalueiden määrittämisen säätämisen myöhemmässäkin vaiheessa. Ylössäsuuntaisuuden käyttäminen materiaalien sekoittamiseen on myös yleinen peliympäristöjen käytäntö, vaikka pölyisyyteen sitä harvemmin käytetään.

4.2 Adaptiivisen maskin luominen ja kehitys pölymateriaalille

Adaptiivinen maski perustuu siihen, että pölyn määrä vaihtelee pinnan orientaation mukaan. Vaaka- tai lähes vaakasuorille pinnoille kertyy tyypillisesti eniten pölyä, ja pölyn määrä vähenee sitä mukaa, mitä jyrkemmäksi pinta muuttuu, eli kun pinnan normaalin yössäsuuntaisuus vähenee ja pinta lähestyy pystysuoraa asentoa (Hsu, S. C., Wong, T. T. 1995. Visual Simulation of Dust Accumulation, 1).

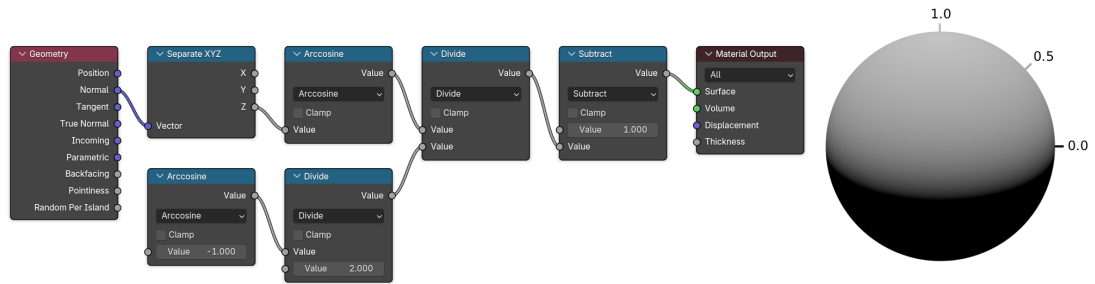
Hyvä lähtökohta pölymaskille voidaan saavuttaa käyttämällä world space normalin pystykomponenttia, joka on ohjelmasta riippuen joko Y tai Z (Kuva 14). Eristetyn pystykomponentin vaikutusta voidaan yksinkertaisimmillaan käyttää pölymaskina täysin sellaisenaan tai murtoluvulla kerrottuna, mutta tällöin maskin vahvuus ja vaikutusalue perustuvat täysin silmänmääräisyyteen, joten seuraavaksi tutkimme, miten maskista voidaan tehdä ennustettava ja sellainen, että voimme määrittää täsmällisesti millä kaltevuuksilla pölyä esiintyy.

Intuitiivisesti voisi ajatella, että jos pallomaisen pinnan laella world space normalin pystykomponentista saadun liukuväriin arvo on 1 ja pystysuorassa seinämässä 0, niin niiden puolivälissä oleva 45 asteen kaltevuus tuottaisi arvon 0.5. Todellisuudessa arvo 45 asteen kohdalla on kuitenkin noin 0.707, koska pinnan ylössuuntaisuus ei vähene lineaarisesti, vaan ensin hitaasti ja vasta loppuvaiheessa nopeammin, sillä sen arvo perustuu kosinikäyrään. Tämän vuoksi 45 asteen kaltevuudessa liukuväriin arvo on yli 0.5.



Kuva 14. World space normaalin pystyakseli eristettynä Blenderin materiaalinodeilla.

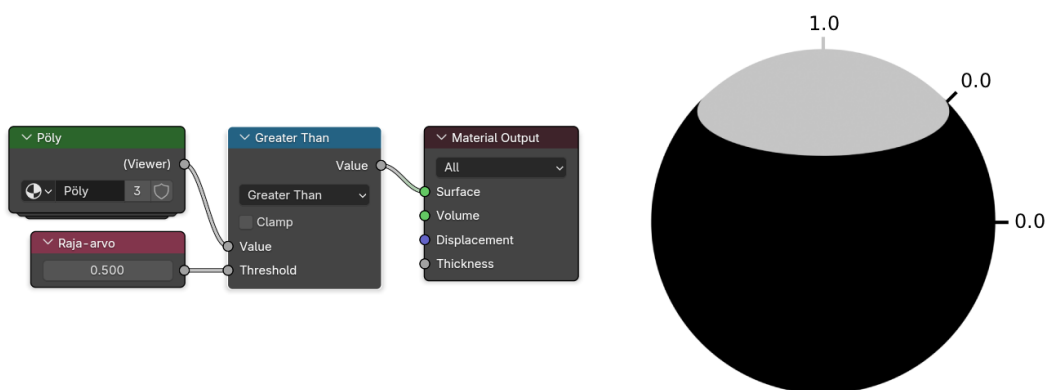
Liukuväri voidaan kuitenkin muuttaa lineaariseksi yksinkertaisella yhtälöllä, jolloin 45 asteen kulmassa olevat pinnat saavat tuon intuitiivisen 0.5 arvon. Tämä onnistuu arkuskosini-funktiolla ja jakamalla tulos $\pi/2$:lla. Joissain materiaaleditoreissa, kuten Unreal Engineissä ja Unityssä, on dedikoitu pi-node, mutta sen asemassa voidaan käyttää myös toista arkuskosini-funktiota $\text{acos}(-1)$, josta saadaan arvoksi π . π jaetaan kahdella ja lopuksi vielä vähennetään luvusta 1, jolloin liukuväri on taas 0-90° välillä sekä halutussa arvohaarukassa 0-1 (Kuva 15).



Kuva 15. Liukuvärin linearisointi arkuskosini-funktioilla.

Pölyn määrä ei kuitenkaan vähene pinnan kaltevuuden mukaan täysin lineaarisesti, vaan loivasti kaltevilla pinnoilla voi olla yhtä paljon pölyä kuin täysin vaakasuorilla pinnoilla. Tätä varten me haluamme määrittää raja-arvon kaltevuudelle, jonka yläpuolella pölymaski näkyy täysvahvaisena (arvo 1). Tämä voidaan saavuttaa 'suurempi kuin' ($>$) -vertailuoperaatiolla (Kuva 16).

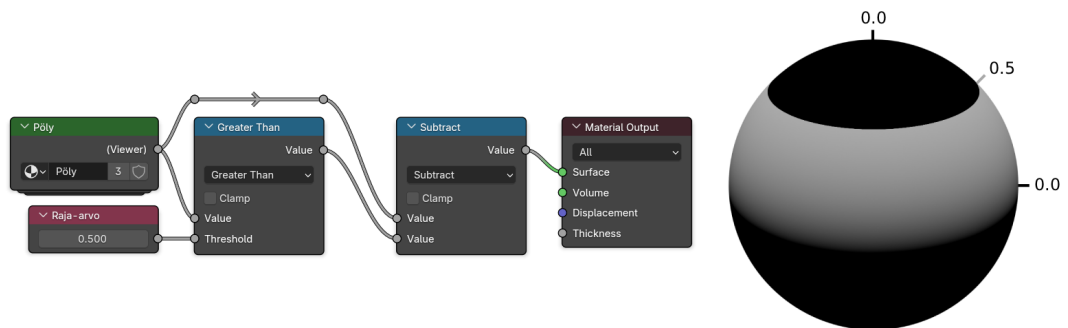
Koska tulemme myöhemmässä vaiheessa normalisoimaan täysitehoisen maskista jäljelle jäävän liukuvärin osan arvoasteikolle 1-0, tekemämme 'suurempi kuin' -vertailu tulee teknisesti olemaan 'suurempi tai yhtä suuri kuin' (\geq) -vertailuoperaatio, jolloin määrittämämme raja-arvo vastaa täysin pinnan kaltevuutta.



Kuva 16. 'Suurempi kuin 0.5 (raja-arvo)' -vertailu tuloksena oleva maski, joka on täysitehoisen kaikilla alle 45° kulmassa olevilla pinnoilla. Edellisten vaiheiden

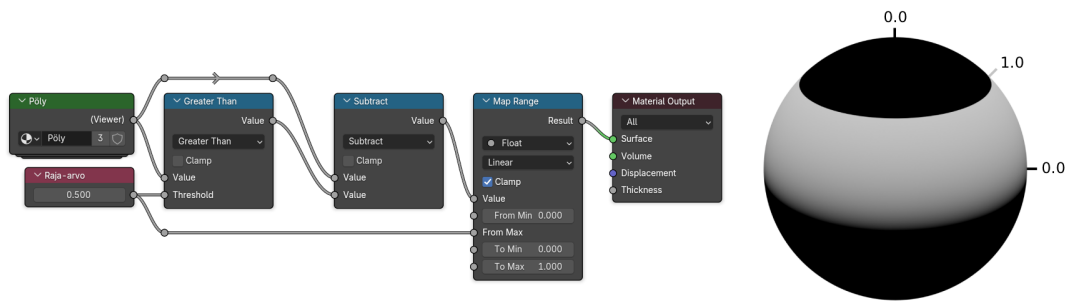
operaatiot on siirretty kuvassa “Pöly” –nimisen node groupin sisälle tulevien vaiheiden visualisoinnin selkeyttämiseksi.

Vähentämällä lineaarisesti tekemästämme liukuväristä ‘suurempi kuin’ -vertailuoperaation tulos, saadaan eristettyä vertailun ulkopuolelle jäävä “laskeuma” (falloff) (Kuva 17), joka tulee häivyttämällä pehmentämään valmiin adaptiivisen maskin rajat. Tämä laskeuman arvo alkaa raja-arvoksi määrittämästämme luvusta 0.5, joka tarkoittaa että se alkaa 45° kaltevilla pinnoilla ja häivyytty lineaarisesti 90° kaltevuuden saavuttaessaan arvon 0.



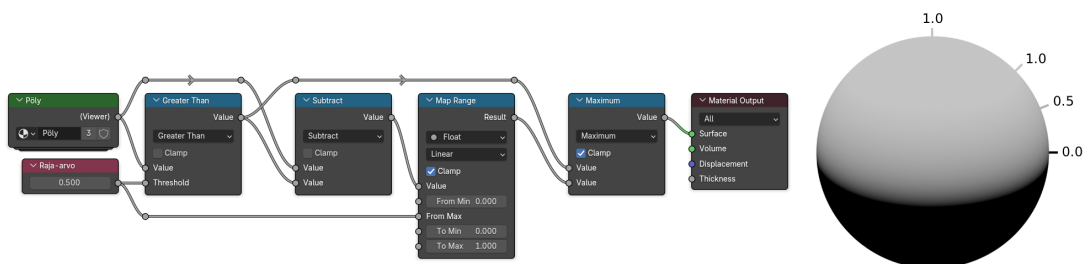
Kuva 17. Raja-arvon 0.5 ulkopuolelle jäävä osuus liukuväristä.

Jotta raja-arvon ulkopuolelle jäävä laskeumaosa liukuväristä alkaisi saumattomasti täysitehoisen maskin reunasta, se pitää normalisoida niin, että se alkaa aina arvosta 1. Tämä onnistuu remap-toiminnolla, jolla voidaan määrittää sisääntulevan liukuväriin maksimiarvo käyttäen sen arvona raja-arvoa (Kuva 18). Näin liukuväriin laskeumaosuus alkaa aina arvosta 1, oli raja-arvo sitten mikä tahansa.



Kuva 18. Raja-arvon ulkopuolelle jäävän liukuvärin laskeumaosuuden normalisointi alkamaan aina arvosta 1 käyttämällä remap-toimintoa, joka on Blenderissä nimeltään Map Range.

Lopuksi raja-arvon molemmin puolin olevat osat yhdistetään yhdeksi saumattomaksi maskiksi. Tämä onnistuu yksinkertaisesti käyttämällä maximum-toimintoa, joka muodostaa lopullisen maskin valitsemalla kummankin alueen arvoista aina suuremman (Kuva 19).



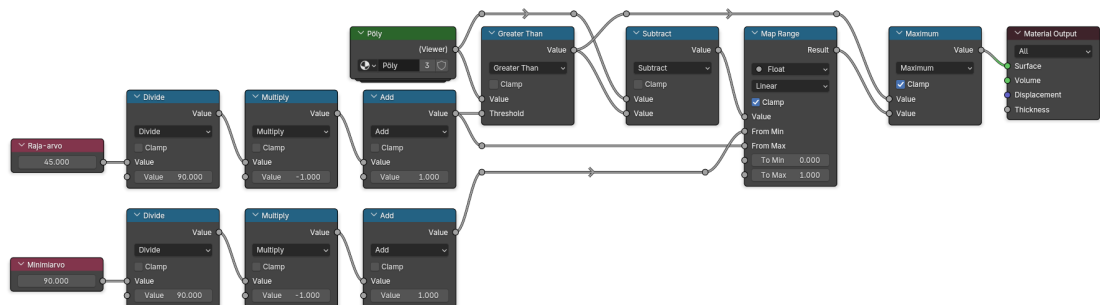
Kuva 19. Raja-arvolla 0.5 adaptiivinen maski on täysitehoinen 45° kaltevuuteen saakka, jonka jälkeen maskin teho laskee lineaarisesti arvoon 0 saavuttaessaan 90° kaltevuuden.

Nyt pystymme säätämään raja-arvolla täysitehoisen maskin rajaa, sekä laskeumaosuuden pituutta muuttamalla remap-toiminnon minimiarvoa.

Minimiarvo voi olla raja-arvon tavoin mitä tahansa 1 ja -1 väliltä, joka vastaa 0-180° kaltevuutta, mutta minimiarvon täytyy kuitenkin aina olla pienempi tai yhtä

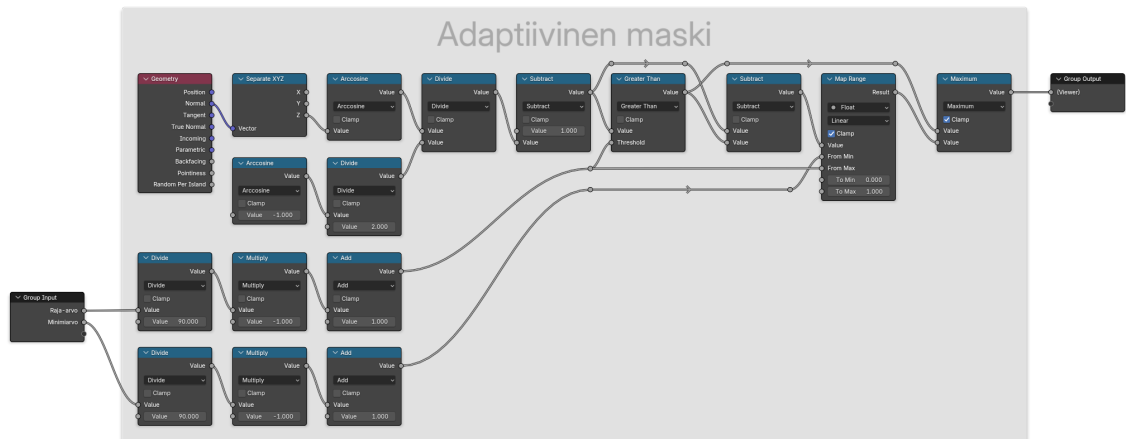
suuri kuin raja-arvo. Muuten maski menee rikki ja tuloksena on täysitehoinen maski koko 180° kaltevuusalueelta.

Tässä vaiheessa muutamme sekä raja-arvon että laskeuman minimiarvon vastaamaan kulmalukemia 0-180 maskin käytön ja ymmärtämisen helpottamiseksi niin, että 'suurempi kuin' -vertailu ja remap-toiminnon minimiarvo saavat kuitenkin edelleen sisääntulevat lukuarvot väliltä 1 ja -1. Tämä onnistuu jakamalla syöttämämme kulmaluvut luvulla 90 ja invertoimalla lopputulos (1-x) (Kuva 20).



Kuva 20. Raja-arvon ja laskeuman minimiarvon syöttöluvut muutettuina kulmalukemiksi niin, että 'suurempi kuin' -vertailu ja remap-toiminto saavat edelleen luvut 1 ja -1 väliltä.

Seuraavaksi voimme siirtää kaiken tähänastisen työn Pöly -node groupin sisälle ja muuttaa raja-arvon sekä laskeuman minimiarvon node groupin input parametreiksi (Kuva 21).



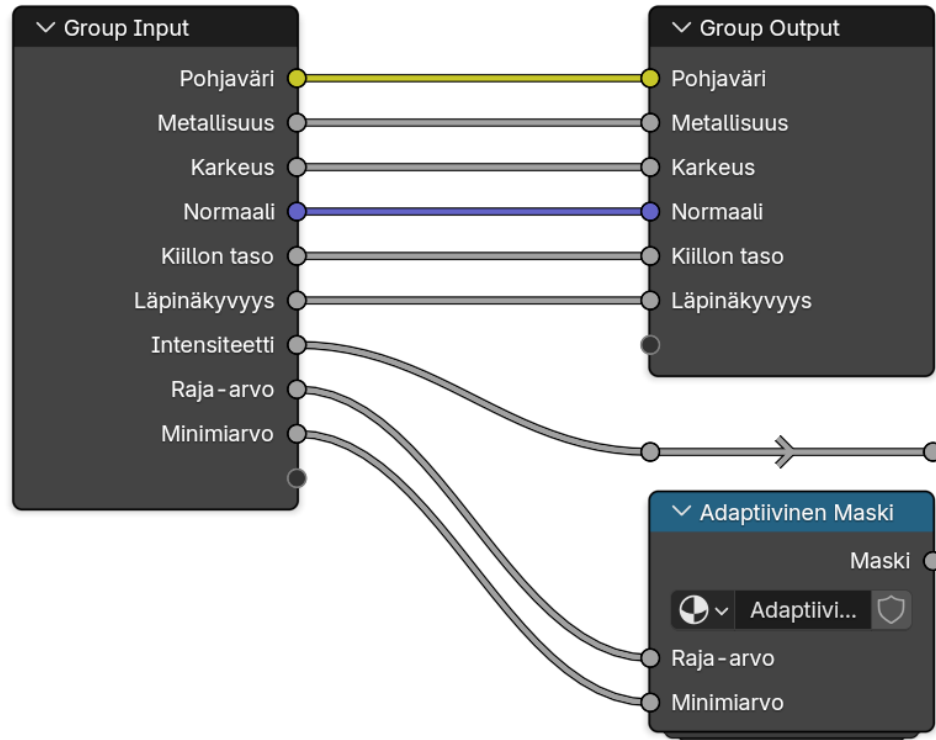
Kuva 21. Valmis adaptiivinen maski Pöly -node groupin sisällä.

4.3 Pölymateriaalin luominen ja yhdistäminen maskiin

Luvussa 2.2 kartoitimme ymmärrystä siitä, minkälaisista pölyhiukkasista huonepöly tyypillisesti pääosin koostuu. Tässä luvussa toteutamme nuo hiukkastyypit, määritämme niille materiaaliominaisuuksia, ja yhdistämme ne teksturoitujen ympäristön esineiden pinnoille niin, että pölyn sijoittuminen seuraa aiemmin toteuttamaamme adaptiivista maskia.

Tarkoituksenamme on tehdä Pöly -node groupista välikappale tekstuurien ja materiaalin väliin, joten luomme node groupille input- ja outputparametrit kaikille materiaaliominaisuuksille, joihin haluamme pölymateriaalin vaikuttavan. Näitä ominaisuuksia voi lisätä tarpeen mukaan, mutta tässä esimerkissä haluamme vaikuttaa metallisuusarvoa käyttävässä PBR-materiaalissa seuraaviin kanaviin: Pohjaväri, metallisuus, karkeus, kiillon taso, normaali, sekä läpinäkyvyys.

Teemme myös intensiteettiparametrin, jolla voimme kontrolloida pölyn kokonaisvaltaista vahvuutta, eli pölyisyyden astetta, kertomalla seuraavaksi toteutettavia operaatioita 0-1 välin murtoluvulla (Kuva 22). Intensiteetin ollessa 0 pinnat eivät ole lainkaan pölyisiä, ja sen ollessa 1 alkuperäinen pinta ei näy ollenkaan pölyn alta maskin täysitehoiselta alueella.



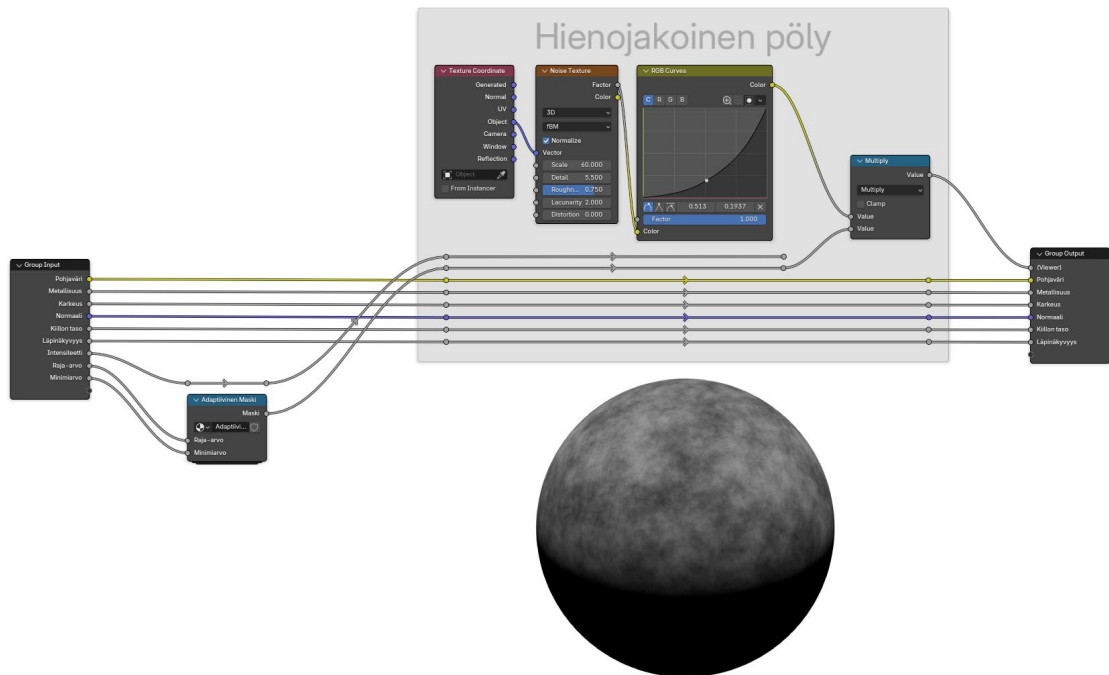
Kuva 22. Pöly -node groupin sisältö, jossa kaikki materiaaliominaisuudet menevät muuttamattomina groupin inputeista outputteihin. Adaptiivinen maski on tehty vielä sisemmäksi node groupiksi graafin visualisoinnin selkeyttämiseksi.

Ensiksi toteutamme erittäin hienojakoisen pölyn, joka koostuu kaikista pölyn muodostavista hiukkastyypeistä, mutta jotka ovat kooltaan niin pientä, että ne muodostavat yhdessä vain harmaan, yhtenäisen kerroksen.

Tämä kerros tulee seuraamaan vahvasti luomaamme adaptiivista maskia, mutta jottei tämä osa pölystä jäisi kuitenkaan vain matemaattisen tasaiseksi gradientiksi, adaptiivista maskia on tarkoituksenmukaista rikkoa kertomalla se kohinakuviolla. Kohinakuvion kokoa ja voimakkuutta voidaan säätää eri tavoin saavuttaaksemme halutulla tavalla tasapainotetun tuloksen (Kuva 23).

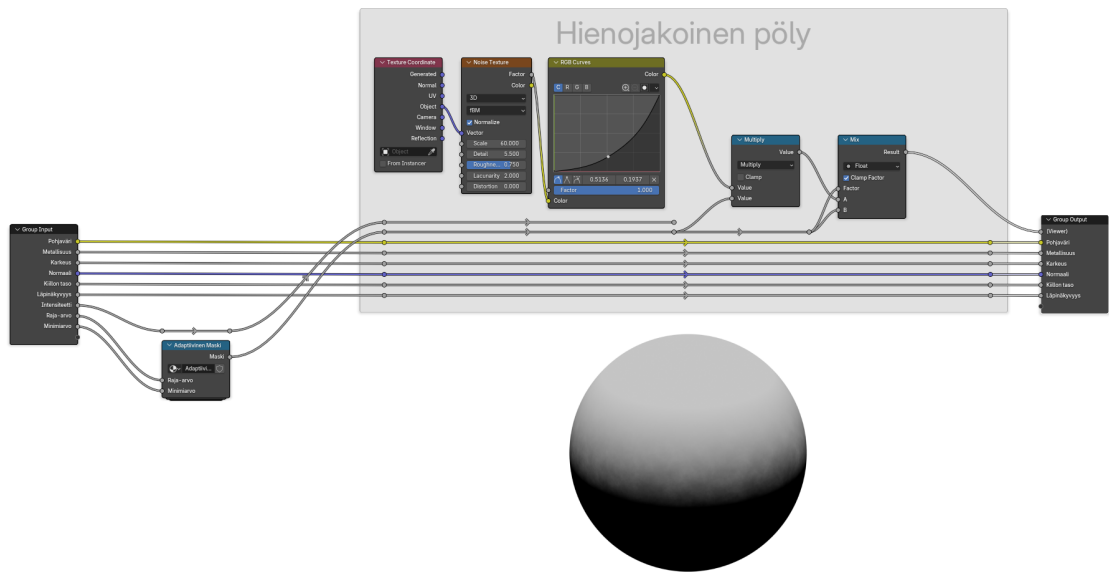
Laskemme kaikki kohinakuviot assettien pinnoille 3D-kuvioina käyttäen object-avaruuden tekstuurikoordinaatistoa. Kevyempänä, vaihtoehtoisena ratkaisuna esimerkiksi pelimoottorissa voitaisiin käyttää proseduraalisten kohinakuvioiden

sijaan myös tekstuurikarttoja kolmisuuntaista projisointia käyttäen. Tällöinkin pölymateriaalin yksityiskohdat säilyvät proseduraalisen kohinakuvioiden tavoin yhdenkokoisina kaikenlaisten asettien pinnoilla. Tekstuureja käyttäessä silminnähtävä toistuvuus saattaa kuitenkin muodostua ongelmaksi, mutta tätä vaikutusta voidaan vähentää suuremmalla tekstuurien kokoa, jolloin sen toistuvuusarvo voi olla pienempi.



Kuva 23. Kohinakuviolla kerrottu pohjamaski tuo hienojakoisen pölyn vaikutusalueeseen orgaanisuutta ja mielenkiintoa.

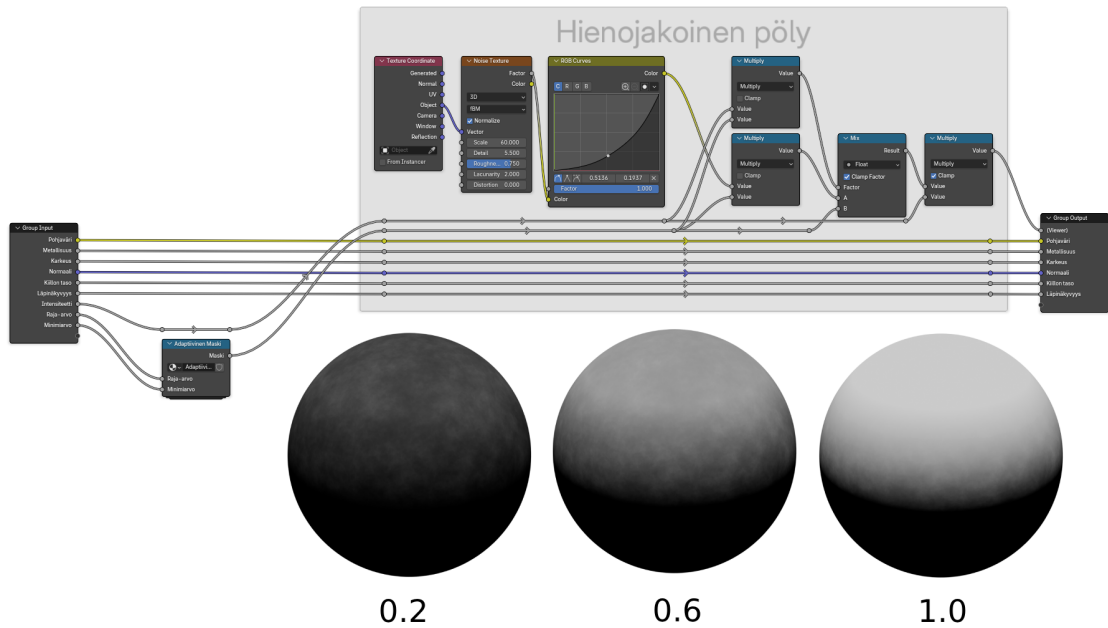
Haluamme kuitenkin vähentää kohinakuvioiden vaikutusta sieltä missä maskin vaikutus on vahvin, jotta pölykerros säilyy peittävänä sieltä missä adaptiivinen maski on täysitehoinen. Tämä voidaan saavuttaa interpoloimalla adaptiivista maskia ja kohinakuviolla kerrottua maskia, käyttäen adaptiivista maskia interpoloinnin alfa-arvona (Kuva 24).



Kuva 24. Kohinakuviolla kerrotun maskin ja adaptiivisen maskin interpolointi käyttäen adaptiivista maskia interpoloinnin alfa-arvona. Blenderissä yksikanavaisten arvojen interpolointi voidaan tehdä käyttämällä Mix-nodea.

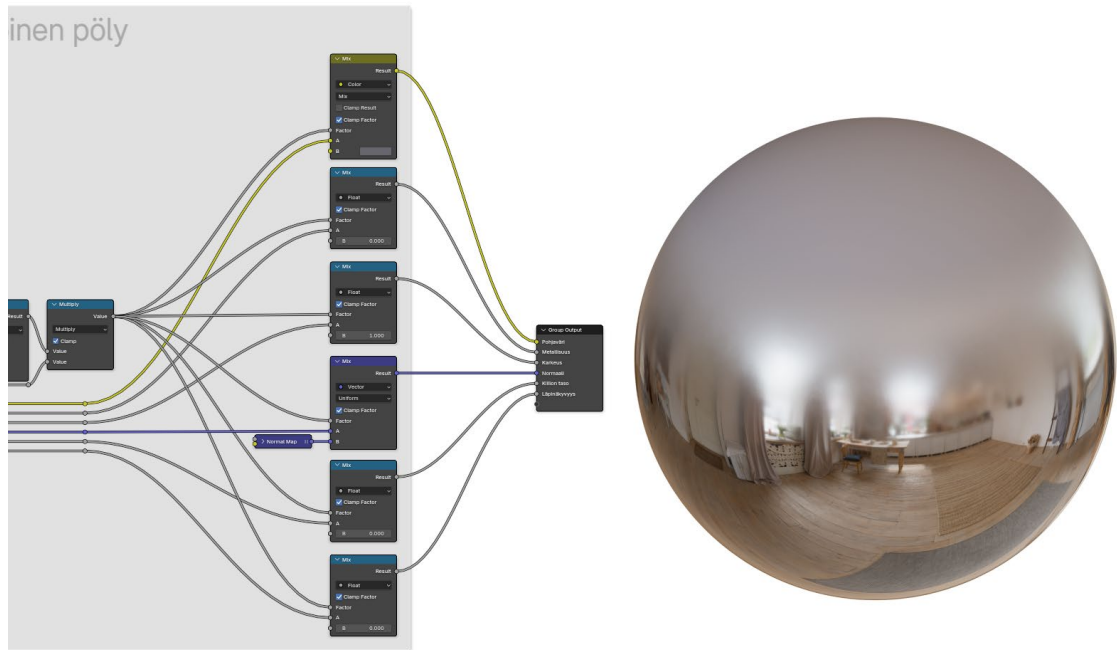
Tämä kuvaa hyvin erittäin pölyntyynyttä pintaa, jossa pölykerros peittää adaptiivisen maskin täysitehoisella alueella täysin sen alla olevan pinnan. Haluamme kuitenkin palauttaa kohinakuviota tuomaa varianssia intensiteetin ollessa alhaisempi, joka onnistuu kertomalla interpoloinnin alfa-arvona toimivan version adaptiivisesta maskista intensiteettiparametrin arvolla. Näin intensiteettiparametrin ollessa 1, pinta on täysin paksun pölyn peittämä, ja mitä alhaisempi pölyn intensiteetti on, sitä hajanaisempaa pöly esiintyy.

Kertomalla interpoloinnin tulos vielä kertaalleen intensiteettiparametrilla saamme hienojakoisen pölyn maskin näkyvyyden häviävän kokonaan intensiteetin ollessa 0 (Kuva 25).



Kuva 25. Hienojakoisen pölyn valmis maski. Graafin alla havainnekuvia intensiteettiparametrin eri arvojen vaikutuksesta maskiin.

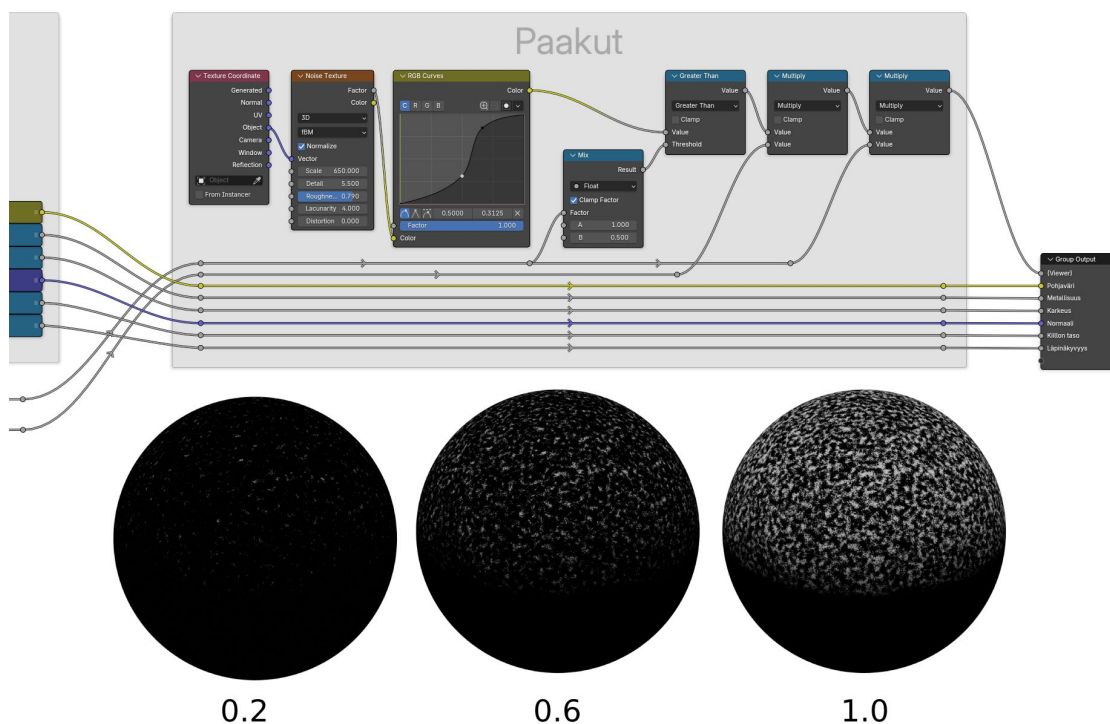
Nyt meillä on hienojakoisen pölyn alueen määrittävä valmis maski, jolla voimme interpoloida sisään tulevia materiaaliominaisuuksia ja pölyn materiaaliominaisuuksia. Pölyn materiaaliominaisuuksiksi määritämme pohjaväriille hieman sinertävän harmaan sävyn (#66666EFF), metallisuudeksi 0, karkeudeksi 1, normaaliksi tasaisen tangentialiavuuden normaalin, kiillon tasoksi 0 ja läpinäkyvyydeksi 0 (Kuva 26). Nämä arvot voi tehdä joko säädettäviksi parametreiksi, tai jättää materiaalin sisäisiksi vakioiksi.



Kuva 26. Kiiltävä metallinen pallo, jonka materiaaliominaisuuksiin on interpoloitu pölymateriaalin määrittäviä arvoja, käyttäen luomaamme 'hienojakoinen pöly' -maskia, pölyn intensiteettiparametrin ollessa 1.

Seuraavaksi teemme hienojakoiselle pölylle luonnollisen jatkeen, joka esittää hienojakoisesta pölystä muodostuneita paakkuja. Tämä voidaan saavuttaa käyttämällä hienojakoiseen kohinakuviioon suurempi kuin -vertailua, jonka kynnyksarvona käytetään kahta sopivaksi todettua arvoa, käyttäen intensiteettiarvoa näiden arvojen interpoloinnin alfana (Kuva 27).

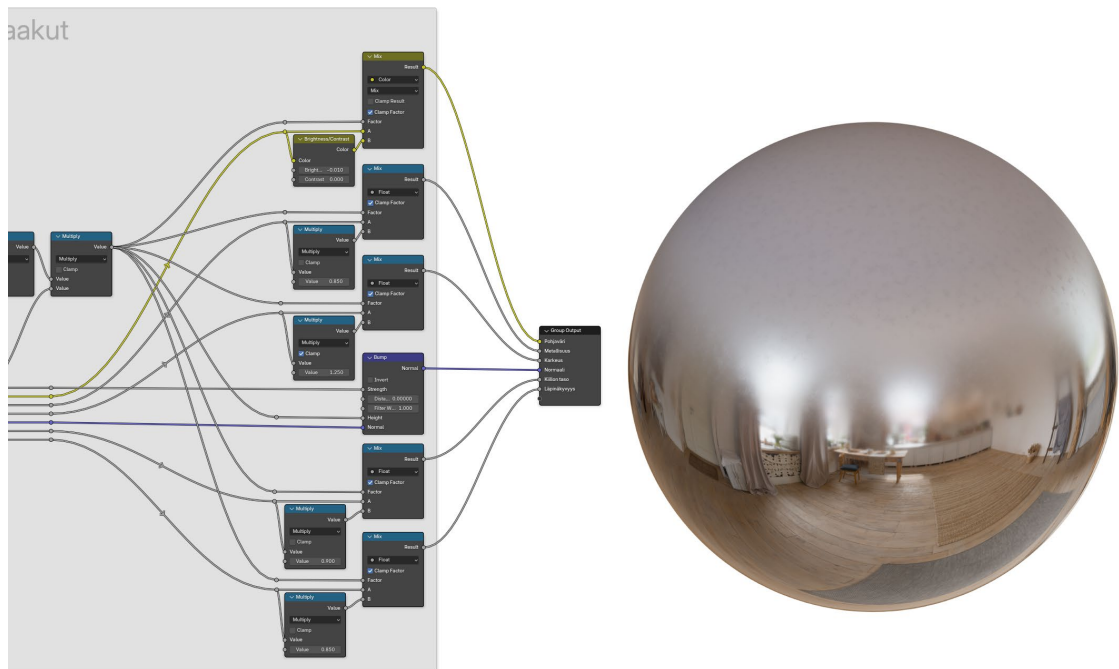
Toimituksen tulos kerrotaan adaptiivisella maskilla, jotta paakkujen ilmentyminen rajoittuu raja- ja minimiarvoparametrien määrittämälle alueelle. Tulos voidaan haluttaessa kertoa vielä intensiteettiparametrilla, jolloin matalilla intensiteettiarvoilla paakut ovat sekä pienempiä, että haaleampia.



Kuva 27. Kohinakuviosta eristetään suurempi kuin -vertailulla sen huippuarvot niin, että intensiteettiparametrin ollessa 0, vertailun kynnyksarvona on 1, ja intensiteettiparametrin ollessa 1, vertailun kynnyksarvo on 0,5. Näin saadaan aikaan intensiteetin mukana lisääntyvät ja kasvavat paakut.

Tässä toteutuksessa emme määritä hienojakoisen pölyn jälkeen muille pölytyypeille enää varsinaisesti uniikkeja arvoja, vaan muutamme olemassa olevia materiaaliominaisuuksia erilaisin laskutoimituksin, ja interpoloimme alkuperäistä muutettua materiaaliominaisuutta käyttäen kunkin pölytyypin maskia (Kuva 28). Näin pölyn ulkonäön säätäminen onnistuisi halutessaan muuttamalla vain alkuperäisiä materiaaliominaisuuksia, ja kaikki niihin tehdyt muutokset välittyvät kaikkiin pölymateriaalin osiin.

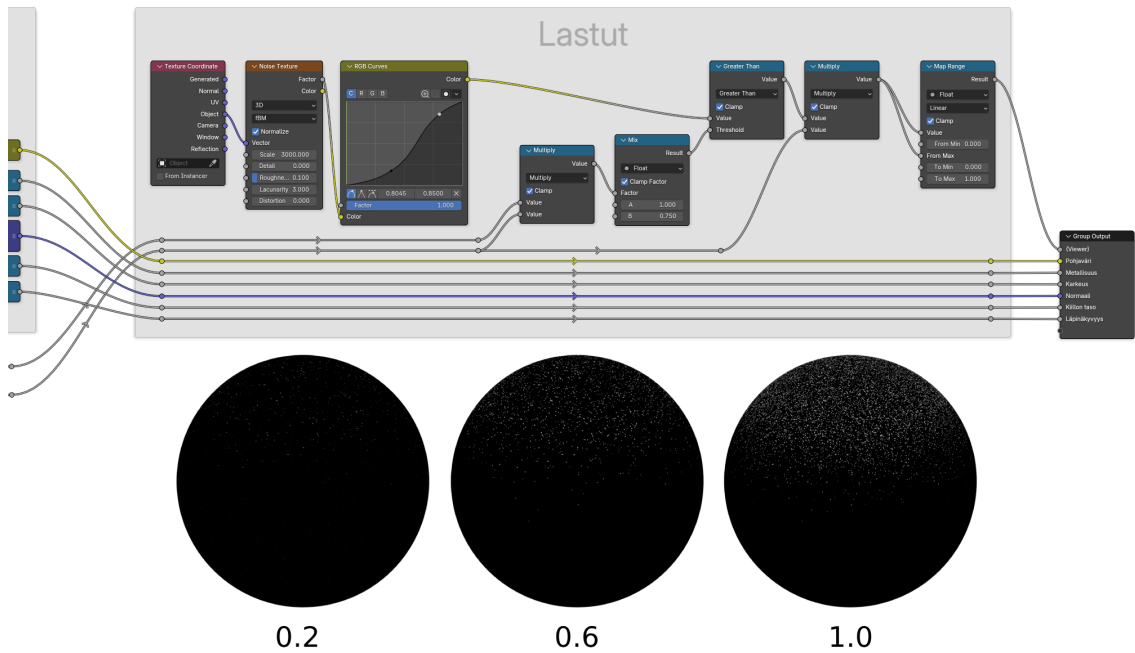
Käytämme eri pölyjen maskia myös bump mapin määrittämiseen, joka Blenderin materiaalinodeissa käsitellään osana pinnan tangenttiavaruuden normaalin informaatiota. Bump map -noden vahvuusparametria ajetaan toteutuksessaan suoraan materiaalin intensiteettiparametrilla.



Kuva 28. Paakkujen materiaaliominaisuudet määritettyinä hienosäätämällä pelkästään jo olemassa olevia materiaaliominaisuuksia.

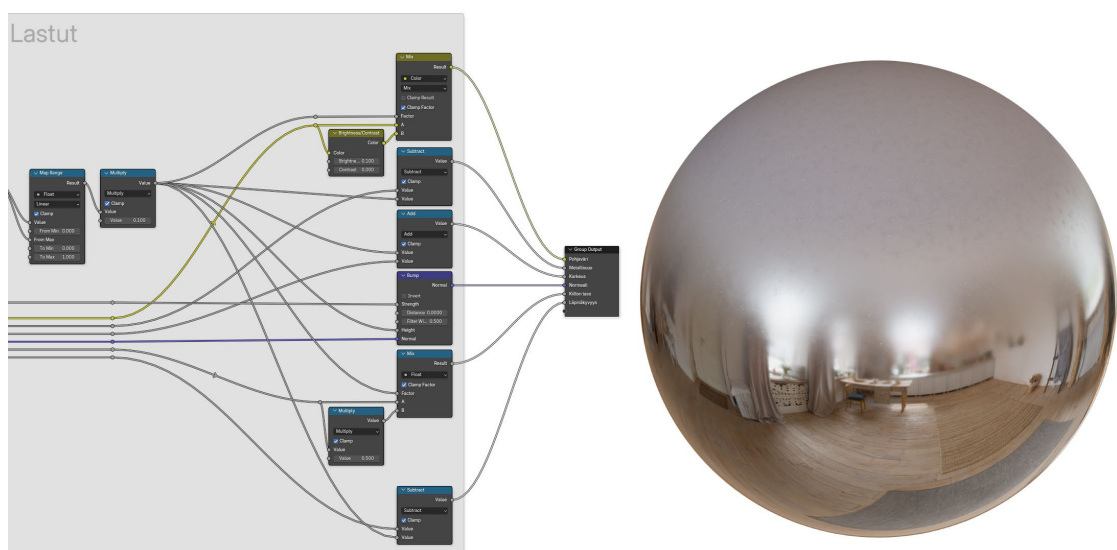
Seuraavaksi toteutamme erilaisia kuivuneita orgaanisia materiaaleja kuvaavan pölyn hiukkastyypin, joka ilmenee pieninä lastuina. Asutetussa kotitaloudessa tämä on suureksi osaksi ihmisten ja lemmikkieläinten kuollutta ihoa. Kuollut iho/hilse on väritykseltään läpikuultavaa ja vaaleaa ihonväristä riippumatta, sillä se on peräisin ihon ylimmästä kerroksesta, nimeltään orvaskei tai epidermi, jossa ihon värin määrittävän melaniinin määrä on lähes olematon (Joly-Tonetti, N., Wibawa, J.I.D., Bell, M., Tobin, D.J. 2018. An explanation for the mysterious distribution of melanin in human skin: a rare example of asymmetric (melanin) organelle distribution during mitosis of basal layer progenitor keratinocytes, 10).

Tämä kerros saadaan tehtyä paakkujen tapaan käyttämällä kohinakuvioiden arvoasteikon huippuja suurempi kuin -vertailulla, käyttäen kynnyksarvona kahden hyväksi toden arvon interpolointia. Interpoloinnin alfana käytetään kuitenkin pelkän intensiteettiparametrin sijaan intensiteetillä kerrottua adaptiivista maskia, jolloin hiukkaset ovat aina pienempiä ja harvemmassa adaptiivisen maskin laskeuma-alueella kuin raja-arvon kattamalla alueella (Kuva 29).



Kuva 29. Lastumaisten hiukkasten valmis maski, jossa kaikki lastut ovat arvoltaan 1, mutta ne ovat sitä pienempiä ja harvempia mitä himmeämpi adaptiivinen maski on.

Mikäli emme kerro lastujen maskia kokonaisuudessaan intensiteetillä, lastut ovat aina keskenään yhtä vahvasti näkyviä. Haluamme lastujen kuitenkin näkyvän melko haaleasti, joten kerromme lastujen maskin luvulla 0,1 ennen sen käyttöä materiaaliominaisuuksien määrittämiseen (Kuva 30).

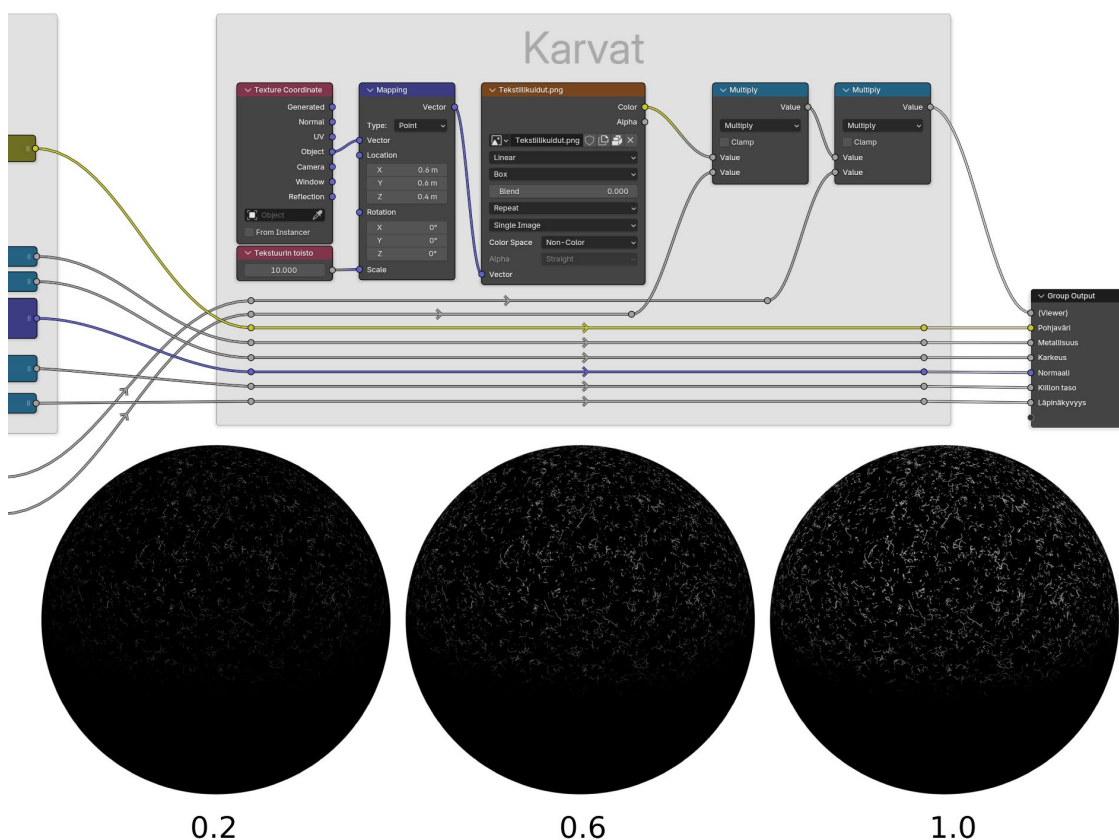


Kuva 30. Lastumaisten hiukkasten materiaaliominaisuudet määritettynä.

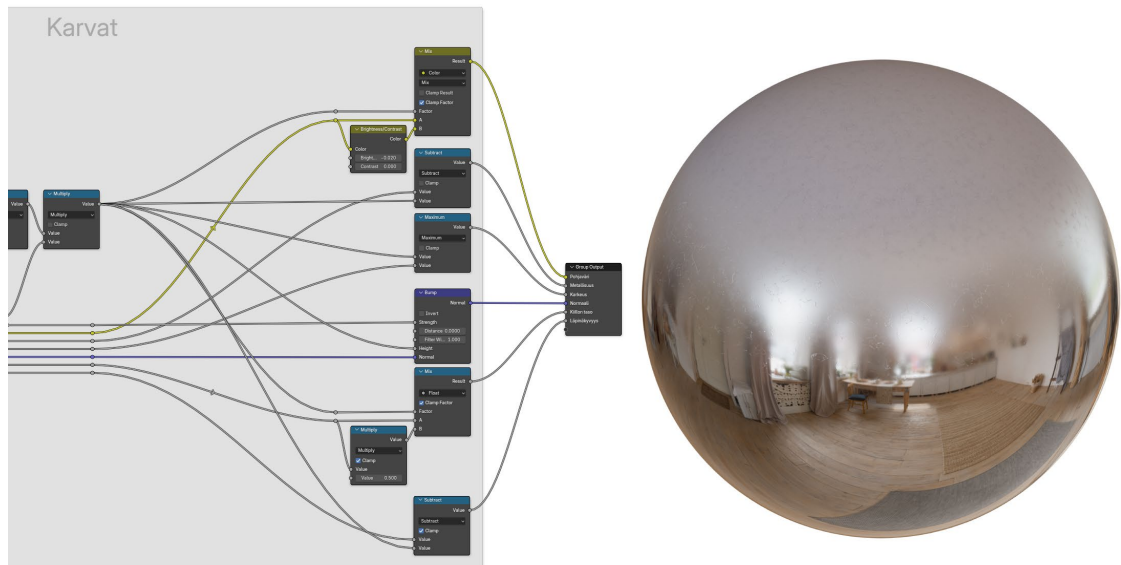
Yksittäiset lastut erottuvat parhaiten läheltä tarkasteltuna, mutta kauempaakin katsottuna ne osallistuvat varianssin luomiseen pölymateriaalissa.

Viimeisenä hiukkastyypinä teemme silmin erotettavia, karvamaisia kuituja kuvaavan kerroksen. Tähän käytämme mustavalkoista tekstuuria, joka kartoitetaan pinnoille UV-koordinaatiston sijaan käyttäen kolmisuuntaista projisointia, eli triplanar-kartoitusta.

Intensiteettiparametrin arvojen vaikutusta karvoihin voidaan säätää halutessaan jollain aiemmille hiukkastyypeille toteutetuista menetelmistä, mutta tässä toteutuksessa teemme niille simppelein häivytyksen käyttäen suoraan adaptiivista maskia ja intensiteettiparametria (Kuvat 31). Tämä riittää luomaan vaikutuksen, että haaleampina näkyvät karvat pinnalla ovat yksinkertaisesti läpikuultavampia, ja siksi vähemmän näkyviä (Kuva 32).

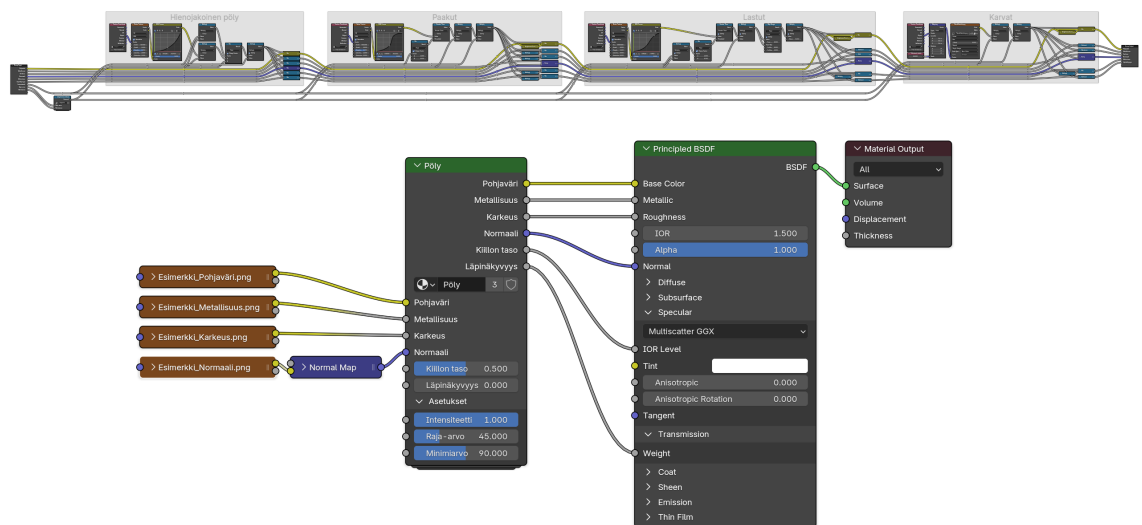


Kuva 31. Pieniä karvoja, langanpätkiä ja tekstiilikuituja esittävä kerros toteutettuna yksinkertaisesti käyttämällä tekstuuria.



Kuva 32. Karvamaisten pölyhiukkasten materiaaliominaisuudet määritettynä.

Tämän myötä toteutuksemme pölymateriaalista on valmis, ja voimme käyttää luomaamme Pöly -node groupia välikappaleena ympäristön assettien tekstuureille ja pinnan sävytyksestä vastaavalle shaderille (Kuva 33).



Kuva 33. Ylhäällä koko Pöly -node groupin sisältö, sekä alla esimerkki sen käytöstä assetin tekstuurien ja shaderin välikappaleena.

4.4 Havainnollistavat renderöinnit ja visuaaliset vertailut

Seuraavaksi vertailemme pölyn näyttäytymistä pienen ympäristön pinnoilla niin, että ensin säädämme pelkkää intensiteettiparametria (Kuva 34), sen jälkeen pelkkiä pölyn ulottuvuusarvoja, eli raja-arvoa sekä minimiarvoa (Kuva 35), jonka jälkeen säädämme kaikkia parametreja yhtäaikaaisesti asteittain, luoden luonnollisen näköiset pölyyntymisen vaiheet (Kuva 36).

Pölymateriaali on asetettu havainnekuviin vaikuttamaan kaikkiin ympäristön pintoihin vertailukuvien ohessa olevien taulukoiden mukaisilla arvoilla. Kuvat on renderöity Blenderin Cyclesillä äärettömällä syväterävyysalueella, mutta renderöintiin on lisätty hienovaraisia jälkiefektejä, kuten bloomia ja värimäärityä, joiden arvot pysyvät kuitenkin samoina kaikkien kuvien kesken. Joihinkin pölymateriaalin sisäisiin vakioarvoihin on tehty hienosäätöjä ennen renderöintiä.



Kuva 34. Intensiteettiparametrin eri arvojen vaikutuksen vertailu.

Kuva	Raja-arvo (°)	Minimiarvo (°)	Intensiteetti
A	45	90	0.0
B	45	90	0.3
C	45	90	0.6
D	45	90	1.0

Matalalla intensiteettiärvolla vaikutelma on melko luonnollisen näköinen, mutta korkeammat arvot näyttävät aivan liian yläsuuntaisilta, sillä pölyä pitäisi alkaa kertyä myös jyrkemmille pinoille pölyntymisen edetessä.



Kuva 35. Raja- ja minimiarvoparametrien eri arvojen vaikutus pölyyn.

Kuva	Raja-arvo (°)	Minimiarvo (°)	Intensiteetti
A	20	45	0.7
B	45	90	0.7
C	60	135	0.7
D	75	150	0.7

Erittäin korkeat pölyn ulottuvuusarvot saavat pinnat näyttämään tasaisesti kauttaaltaan huurretuilta, mikäli intensiteettiarvoa ei kasvateta samanaikaisesti. Myös erittäin matalat arvot saavat täysin tasaiset pinnat näyttämään huomattavasti pölyisemmiltä kuin loivasti kaltevat pinnat, joka ei myöskään näytä luonnolliselta, koska intensiteetti ei laske aste-arvojen laskiessa.



Kuva 36. Kaikkia kolmea parametria yhdessä säätämällä saavutetut luonnollisen näköiset pölyntymisen vaiheet.

Kuva	Raja-arvo (°)	Minimiarvo (°)	Intensiteetti
A	25	80	0.35
B	35	100	0.5
C	45	120	0.65
D	55	135	0.85

Kun kaikkia kolmea arvoa säädetään yhtäaikaaisesti, saadaan aikaan uskottavia pölyntymisen vaiheita kevyestä, arkipäiväisestä pintojen pölystä aina äärimmäiseen pölyisyyteen asti (Kuva 37).



Kuva 37. Edellisen vertailusarjan kuva D suuremmaksi rajattuna, josta pölyn erilaiset hiukkastyypit erottuvat selkeämmin.

4.5 Toteutustavan rajoitteet ja kehittymismahdollisuudet

Tämänkaltainen täysin materiaalipohjainen toteutus on melko helppo luoda missä tahansa ohjelmistossa, jossa on nodeja käyttävä materiaalieditori, ja siitä voidaan tehdä juuri niin yksinkertainen tai monimutkainen kuin kullekin tuotannolle sopii. Luonnollinen lisä tämänkaltaiseen materiaaliin olisi pölymateriaalin sisäisten vakioiden, kuten pölyn pohjaväriin ja kohinakuvioiden toistuvuusarvojen muuttaminen parametreiksi, jolloin pölyn ulkonäköä voidaan

hienosäätää helposti globaalilla tasolla. Jätin tämän toteuttamatta materiaalin rakenteen presentoinnin selkeyttämiseksi.

Toteutuksen ehkä suurin rajoite on se, että se soveltuu pelkästään staattisiin esineisiin, sillä dynaamisesti orientaatiotaan muuttava esine säilyttäisi pölyn aina sen yläsuuntaisilla pinnoillaan. Tämä ominaisuus on samalla toteutuksen suurin vahvuus sekä heikkous. Dynaamiset esineet vaatisivat materiaalista jatkokehitetyn tai erillisen version, jossa esine säilyttäisi alkuperäisen pölyn kertymissuunnan liikkueessaan, ja suurempi esineen liikkuminen olisi hyvä myös vähentää pölyn määrää sen pinnalla, simuloiden karisemista.

Nykyisellään toteutus on laskennallisesti melko kevyt ja se sitoo visuaalisesti yhteen keskenään hyvin erilaisetkin esineet. Pöly näyttää uskottavalta melko läheiselläkin tarkastelulla, mutta varsinaisia lähikuvia se ei kuitenkaan kestä. Näissä tilanteissa tämän toteutuksen erilaisia hiukkastyyppejä pitäisi joko täydentää, tai korvata kokonaan kolmiulotteisilla partikkeleilla.

Pölyn esiintymiseen olisi helppo luoda lisää varianssia lisäämällä sisääntulo ylimääräiselle maskitekstuurille, jolla voitaisiin vähentää materiaalin pohjana toimivaa adaptiivisen maskin vaikutusta. Maskia voitaisiin käyttää myös määrittämään esineiden pintoja, joihin pölyn ei haluta kertyvän ollenkaan, tai vaikka esiintyvän vain vähennetyllä intensiteetillä. Tämä maski voisi olla erillisen tekstuurin sijaan myös määritetty esineen verteksiväreillä, jolloin pölymateriaalin tavoin maski ei ole kytköksissä asetin UV-koordinaatistoon. Tästä olisi hyötynyt esimerkiksi havainnollistavissa renderöinneissä olleen myrskylyhdyn lasisylinterin sisäpuoli, sekä tilan ikkunoiden ulkopuoli, sillä korkeille kaltevuusasteille määritetty pölymateriaali vähensi lasin läpinäkyvyyttä noin kaksinkertaisesti haluttuun määrään verrattuna, kun pölyn vaikutus laskettiin yhtä vahvana molemmille puolille lasia.

Toteutuksessa pölyn esiintyminen tasaisilla pinnoilla on myös äärimmäisen tasajakoinen, verrattuna sellaiseen sisätilaan, jossa on ollut elämää. Tavallisen tilassa liikkumisen seurauksena syntyneet pienet ilmavirrat kuljettavat pölyä

nurkkiin, jota tämä toteutus ei ota ollenkaan huomioon. Tämä informaatio voisi olla saatavilla esimerkiksi hyödyntämällä ympäristön geometriasta laskettua ambient occlusionia. Materiaalin tasajakaisuus pinnoilla näkyy myös siinä, ettei toteutettu materiaali tee eroa pölyn kertymisessä sileiden ja karkeiden pintojen välillä, vaikka todellisuudessa etenkin jyrkemmällä kaltevuuksilla niillä on eroja. (Hsu, S. C., Wong, T. T. 1995).

5 Yhteenveto

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia pölyä oikean maailman ilmiönä ja löytää tapa tiivistää sen ominaisuudet 3D-grafiikan keinoin jäljiteltäväksi materiaaliksi, joka on sekä ulkonäöltään että pinnoille sijoittumisensa osalta realistinen.

Pyrin samalla nostamaan esiin pölyn usein vähäiseksi jäävää roolia erityisesti reaaliaikaisessa 3D-grafiikassa ja osoittamaan sen tärkeyttä analysoimalla elokuvia ja muita visuaalisia teoksia, joissa pölyä käytetään tietoisesti voimakkaana kerronnallisena ja visuaalisena elementtinä.

Työn aikana kävi ilmi, että näennäisesti pienen realismin kerroksen lisääminen 3D-ympäristöön vaatii yllättävän paljon ymmärrystä pölyn koostumuksesta, kertymislogiikasta ja optisista ominaisuuksista. Adaptiivisen maskin matemaattinen suunnittelu, parametrien minimalistinen mutta tehokas määrittäminen sekä erilaisten pölytyyppien rakentaminen muodostivat kokonaisuuden, joka ei ole täysin triviaali toteuttaa.

Pienemmässä laajuudessa tai aikapaineiden alla tehdyssä ympäristössä suoraan asettien pintaan maalattu pölytekstuuri voi siis olla edelleen jopa suosittava ratkaisu, mikäli vaihtoehtona olisi täysin pölytön tila. Toisaalta kerran rakennettu toteutuksen kaltainen järjestelmä mahdollistaa pölyn hallinnan ja lisäämisen jatkossa vähällä vaivalla, mutta se vaatii hieman työtä.

Pölyn tutkimisen raamit olivat alkuun hankalat asettaa pölyn määritelmän monimuotoisuudesta johtuvan epämääräisyyden vuoksi. Lisäksi oli hankalaa löytää lähdemateriaalia, joka täytti akateemisen lähteen kriteerit ilman, että aihealue meni liian syvälle mikrobiologian, astrofysiikan tai forensiikan piiriin.

Toteutuksen käytettävyyttä rajoittaa se, että se ei ole sellaisenaan käytettävissä dynaamisiin esineisiin, eikä se huomioi pölyn taipumusta kertyä nurkkiin. Tulos soveltuu kuitenkin erinomaisesti staattisiin ympäristöihin ja mahdollistaa jopa pölyn määrän muuttumisen visualisoinnin animoimalla pölymateriaalin parametrien arvoja.

Kokonaisuutena työ osoittaa, että pölyn kaltaisten arkisten ilmiöiden huomioiminen voi vaikuttaa merkittävästi 3D-ympäristön koettuun uskottavuuteen ja sanomaan. Vaikka sen kunnollinen toteuttaminen vaatiikin alkuvaiheessa jonkin verran työtä, hyvin suunniteltu materiaaliratkaisu voi palvella kaikenlaisia tuotantoja joustavasti. Pölyn syvällisempi tarkastelu nostaa esiin kysymyksen siitä, kuinka monia muita pieniä, mutta kokemuksellisesti merkittäviä ilmiöitä 3D-tuotannoissa jää vielä systemaattisesti hyödyntämättä.

Lähteet

Bronswijk, J. E. M. H. v. 1981. House dust biology for allergists, acarologists and mycologists. Zoelmond.

Chesterton, M. 2017. What is dust?. Crowd Science. 19.12.2017. BBC World Service. 30min. Saatavilla: <https://www.bbc.com/audio/play/w3cswc8m> (linkki tarkistettu 27.02.2026).

Dust (Staub). Saksa 2007. Ohjaaja Hartmut Bitomsky. 90min.

Gu, J., Ramamoorthi, R., Belhumeur, P., Nayar, S. 2007. Dirty glass: Rendering contamination on transparent surfaces. Eurographics Symposium on Rendering. Saatavilla: <https://doi.org/10.2312/EGWR/EGSR07/159-170> (linkki tarkistettu 28.02.2026)

Guo, J. & Pan, J. 2014. Real-time simulating and rendering of layered dust. The Visual computer, 30(6-8), pp. 797-807. Saatavilla: <https://doi.org/10.1007/s00371-014-0967-9> (linkki tarkistettu 27.02.2026).

History of Simple Things 2024. Why Does Dust Build Up Even in Closed Spaces? [ID0629]. Verkkovideo 24.01.2026. 8min. Saatavilla: https://www.youtube.com/watch?v=OY_22DAfjiQ (linkki tarkistettu 28.02.2026)

Hsu, S. C., Wong, T. T. 1995. Visual Simulation of Dust Accumulation. IEEE Computer Graphics and Applications, 15(1), pp. 18-22. Saatavilla: <https://doi.org/10.1109/38.364957> (linkki tarkistettu 27.02.2026)

Joly-Tonetti, N., Wibawa, J.I.D., Bell, M., Tobin, D.J. 2018. An explanation for the mysterious distribution of melanin in human skin: a rare example of asymmetric (melanin) organelle distribution during mitosis of basal layer progenitor keratinocytes. British Journal of Dermatology, 179(5), pp 1115–1126. Saatavilla: <https://doi.org/10.1111/bjd.16926> (linkki tarkistettu 27.02.2026)

Paustenbach, D. J., Finley, B. L., Long, T. F. 1997. The Critical Role of House Dust in Understanding the Hazards Posed by Contaminated Soils. International journal of toxicology, 16(4-5), pp. 339-362. Saatavilla: <https://doi.org/10.1080/109158197227008> (linkki tarkistettu 27.02.2026).

Reeder, Scott 2022. Prop Dusting. Verkkovideo 13.12.2022. Scott Prop and Roll. 20s. Saatavilla: <https://www.youtube.com/shorts/opDlaiAWft0> (linkki tarkistettu 27.02.2026)

Taylor, M. P., Barlow, C. F., Fry, K., Max, M. G. 2021. What is dust? And where does it all come from? Verkkootikkeli. The Conversation 26.10.2021.

Saatavilla: <https://theconversation.com/what-is-dust-and-where-does-it-all-come-from-168265> (linkki tarkistettu 28.02.2026)

3D-malli. NotAnotherApocalypticCo. 2021. Set of Cardboard Boxes. Saatavilla: <https://skfb.ly/onr6S> (linkki tarkistettu 01.03.2026)

3D-malli. Marsy 2021. Wooden double hung window. Saatavilla: <https://skfb.ly/oo9vK> (linkki tarkistettu 01.03.2026)

Kuvalähteet

Kuva 1. Quintel Geldhof 2023. Who knew house dust could be so interesting!. Kuvakaappaus Instagram-videosta. Saatavilla: <https://www.instagram.com/reels/CuxFzaQLs5h/> (linkki tarkistettu 01.03.2026)

Kuva 4. Harmen Steenwijck 1640. Still Life: An Allegory of the Vanities of Human Life. Maalaus. National Gallery, Lontoo.

Kuva 5. Harry Potter ja salaisuuksien kammio. Iso-Britannia 2002. Ohjaaja C. Columbus. 2h 41min. Kuvakaappaus elokuvasta.

Kuva 6. Playtime. Ranska 1967. Ohjaaja J. Tati. Kuvakaappaus elokuvasta.

Kuva 7. 2001: A Space Odyssey. Yhdysvallat 1968. Ohjaaja S. Kubrick. 2h 29min. Kuvakaappaus elokuvasta.

Kuva 8. Star Wars: Uusi toivo. Yhdysvallat 1977. Ohjaaja G. Lucas. 2h 1min. Kuvakaappaus elokuvasta.

Kuva 9. Shadow of the Tomb Raider 2018. Eidos-Montréal. Kuvakaappaus pelistä.

Kuva 10. Kansallisaarre. 2004. Ohjaaja J. Turteltaub. 2h 11min. Kuvakaappaus elokuvasta.

Kuva 11. Toy Story 2. 1999. Ohjaaja J. Lasseter. 1h 32min. Kuvakaappaus elokuvasta.

Kuva 12. Resident Evil 7: Biohazard 2017. Capcom. Kuvakaappaus pelistä.

Kuva 13. Uncharted 4: A Thief's End 2016. Naughty Dog. Kuvakaappaus pelistä.