

SAVONIA



OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN ALA

KELJONLAHDEN VOIMALAITOKSEN POHJATUHKAN ANALYSOINTI KONENÄKÖSOVELLUKSELLA

TEKIJÄ Olli Ratia

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Tutkinto-ohjelma Energiatekniikan tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä Olli Ratia	
Työn nimi Keljonlahden voimalaitoksen pohjatuhkan analysointi konenäkösovelluksella.	
Päiväys 07.04.2025	Sivumäärä/Liitteet 28/1
Toimeksiantaja Jari Ruuska, Alva-Yhtiöt Oy	
<p>Opinnäytetyön tilasi Alva-yhtiöt, jolla oli tarve parantaa kiertopetikattilan petimateriaalin laadunhallintaa. Turpeen polton vähentäminen ja puuperäisen polttoaineen käytön lisääminen aiheuttaa lisää vaatimuksia petimateriaalin laadulle.</p> <p>Opinnäytetyössä tutkittiin konenäkökameran soveltuvuutta pohjatuhkan analysointiin. Pohjatuhkan analysointi konenäkökameralla nopeuttaa reagointia poltossa tapahtuviin muutoksiin. Keljonlahden voimalaitoksen pohjatuhkakuljettimelle on asennettu konenäkökamera, joka analysoi kuljettimella olevaa petimateriaalia. Ohjelman algoritmit merkitsevät tietyt kappaleet eri väreillä ja näin voidaan konenäön avulla helpottaa pohjatuhkan analysointiprosessia. Silloin pohjatuhkan analysointi nopeutuu ja poltossa tapahtuviin muutoksiin voidaan reagoida nopeammin kuin ennen.</p> <p>Opinnäytetyön yksi tavoite on optimoida petihiekan vaihtoa ja näin saavuttaa taloudellisesti säästöä lisäämättä riskejä. Opinnäytetyö aloitettiin tutkimalla kahta eri näytteenottotapaa petimateriaalista ja vertailemalla näitä keskenään. Opinnäytetyöhön liittyy paljon visuaalista tarkastelua ja näin myös kuvamateriaalia tutkittiin paljon.</p>	
Avainsanat agglomeraatio, alkalikloridi, kiertopetikattila, konenäkö, pohjatuhka, sintraantuminen	

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO.....	7
2	ALVA-YHTIÖT OY.....	8
3	KELJONLAHDEN VOIMALAITOS.....	9
3.1	Voimalaitoksen esittely.....	9
3.2	Leijukerrosoltto.....	10
4	PETIMATERIAALI.....	12
5	SINTRAANTUMINEN.....	13
6	KELJONLAHDEN KATTILAN POHJATUHKALAITTEISTO.....	14
7	POHJATUHKAN SEULONTA-ANALYYSI.....	16
8	KONENÄKÖKAMERA JA -SOVELLUS.....	19
9	ANALYYSIT.....	23
10	POHDINTA.....	26
	LÄHTEET.....	28
	LIITE 1: PETIMATERIAALINÄYTTEIDEN KUVAT.....	29

KUVALUETTELO

Kuva 1. Periaatekuva voimalaitosprosessista, jossa on välitulistus (Huhtinen, Korhonen, Pimiä, Urpalainen 2016)	9
Kuva 2. Pohjatuhkalaitteisto DNA-järjestelmässä (Ratia O. Valmet, Alva 2024, CC BY-SA)	15
Kuva 3. Pohjatuhkan seulontalaitteisto Keljonlahden voimalaitoksella (Ratia O. Alva 2024, CC BY-SA)	17
Kuva 4. Seulonta 08.11.24 (Ratia O, Alva 2024, CC BY-SA)	17
Kuva 5. Seulonnan tulokset 08.11.24 (Ratia O. Alva 2024, CC BY-SA)	18
Kuva 6. Seulonnan tulokset 20.02.25 (Ratia O. Alva 2025, CC BY-SA)	18
Kuva 7. Pohjatuhkakuljetin ja konenäkökamera (Ratia O. Alva 2025, CC BY-SA)	20
Kuva 8. Pohjatuhkakuljetin ja konenäkökamera (Ratia O. Alva 2025, CC BY-SA)	20
Kuva 9. Yleiskuva Photoboiler-sovelluksesta 7.4.2025 (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)	21
Kuva 10. Sintterihälytys DNA-järjestelmässä (Ratia O. Valmet, Alva 2025, CC BY-SA)	22
Kuva 11. Näyte 1 (Ratia O. Photoboiler, Alva 2024, CC BY-SA)	25
Kuva 12. Näyte 2 (Ratia O, Alva 2025, CC BY-SA)	29
Kuva 13. Näyte 2 peruskuva (Ratia O, Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)	30
Kuva 14. Näyte 2 analysoitu konenäöllä (Ratia O, Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)	31
Kuva 15. Näyte 2 Photoboiler-algoritmien tulkinat (Ratia O, Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)	31
Kuva 16. Näyte 3 (Ratia O. Alva 2025, CC BY-SA)	32
Kuva 17. Näyte 3 peruskuva (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)	33
Kuva 18. Näyte 3 analysoitu (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)	34
Kuva 19. Näyte 3 Photoboiler-algoritmien tulkinat (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)	34
Kuva 20. Näyte 4 (Ratia O. Alva 2025, CC BY-SA)	35
Kuva 21. Näyte 4 peruskuva (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)	36
Kuva 22. Näyte 4 analysoitu (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)	37
Kuva 23. Näyte 4 Photoboiler-algoritmien tulkinat (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)	37
Kuva 24. Näyte 5 (Ratia O. Alva 2025, CC BY-SA)	38
Kuva 25. Näyte 5 peruskuva (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)	39
Kuva 26. Näyte 5 analysoitu (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)	40
Kuva 27. Näyte 5 Photoboiler-algoritmien tulkinat (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)	40
Kuva 28. Näyte 6 (Ratia O. Alva 2025, CC BY-SA)	41
Kuva 29. Näyte 6 peruskuva (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)	42
Kuva 30. Näyte 6 analysoitu (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)	43
Kuva 31. Näyte 6 Photoboiler-algoritmien tulkinat (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)	43
Kuva 32. Näyte 7 (Ratia O. Alva 2025, CC BY-SA)	44

Kuva 33. Näyte 7 peruskuva (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)	45
Kuva 34. Näyte 7 analysoitu (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA).....	46
Kuva 35. Näyte 7 Photoboiler-algoritmien tulkinnat (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)	46
Kuva 36. Näyte 8 (Ratia O. Alva 2025, CC BY-SA)	47
Kuva 37. Näyte 8 peruskuva (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)	48
Kuva 38. Näyte 8 analysoitu (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA).....	49
Kuva 39. Näyte 8 Photoboiler-algoritmien tulkinnat (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)	49
Kuva 40. Näyte 9 (Ratia O. Alva 2025, CC BY-SA)	50
Kuva 41. Näyte 9 peruskuva (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)	51
Kuva 42. Näyte 9 analysoitu (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA).....	52
Kuva 43. Näyte 9 Photoboiler-algoritmien tulkinnat (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)	52
Kuva 44. Näyte 10 (Ratia O. Alva 2025, CC BY-SA)	53
Kuva 45. Näyte 10 peruskuva (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)	54
Kuva 46. Näyte 10 analysoitu (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA).....	55
Kuva 47. Näyte 10 Photoboiler-algoritmien tulkinnat (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)	55

Käytetyt lyhenteet

bar	paineen yksikkö baari = 100 000 pascal
C	celsiusaste
CHP	combined heat and power, sähkön ja lämmöyhteistuotantolaitos
DNA	Valmet DNA Distributed Control System - automaatiojärjestelmä
kg/s	kiloa sekunnissa
K	kalium
KP	korkeapaine
µm	mikrometri
mm	millimetri
MP	matalapaine
MW	megawatti
Na	natrium
Oy	osakeyhtiö
VP	välipaine

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tilaaja on Alva Yhtiöt Oy (ent. Jyväskylän Energia Oy). Opinnäytetyö keskittyy pohjatuhtakan analysoinnin kehittämiseen konenäkökameran avulla. Konenäön avulla voidaan petimateriaalinen laadun muutoksiin reagoida nopeammin ja polttoaineen laadun muutokset eivät vaikuta kattilan tuotantoon niin suuresti.

Ilmaston lämpeneminen on aiheuttanut ongelmia maailman laajuisesti. Ilmastonlämpenemisen hillintä on laittanut valtiot rajoittamaan kasvihuonepäästöjä. Suomen kansallinen tavoite on olla hiili-neutraali vuonna 2035. Tätä kirjoittaessa vuonna 2025 Suomessa on fossiilisten polttoaineiden käyttöä jo vähennetty ja ollaan siirtymässä osittain pois polttoon perustuvasta energiantuotannosta. Monet energiayhtiöt ympäri Suomea rakentavat sähkökattiloita ja lämpöpumppuja korvaamaan polttoon perustuvia voimalaitoksia. (Guillot 2023)

Fossiilisten polttoaineiden käyttöä, kuten kivihiiltä ja turvetta on vähennetty ja lisätty puuperäisen polttoaineen käyttöä energiantuotannossa. Puuperäisen polttoaineen käytön lisääminen on tuonut mukanaan pieniä ongelmia liittyen polttoprosessiin. Samaan aikaan puun hinta on noussut merkittävästi ja puupolttoaineen laadun ja hinnan suhde on yleinen mietinnän kohde. Puuperäinen polttoaine sisältää alkaleja ja klooria, joka aiheuttaa kuumakorroosiota kattilan tulistinpinnoilla. Alkalit taas aiheuttavat likaantumista petimateriaalina käytettävässä luonnonhiekassa ja kattilan pinnoilla.

Leiju- tai kiertopetikattilan petimateriaalina oleva hiekka on tärkeä elementti polttoprosessissa. Petimateriaalin kuntoa on seurattava mieluiten päivittäin. Jos petimateriaali on huonossa kunnossa ja siinä on paljon alkalikertymää, on mahdollista, että petimateriaalin kvartsipitoinen hiekka sulaa yhteen muodostaen kiteitä eli sintraantuu ja leijuminen loppuu pedissä. Ilmiön kansankielinen nimi on kakun muodostuminen. Opinnäytetyön yksi tavoite on sintraantumisen vähentäminen petimateriaalissa ja mahdollisten tuotantokatkosten estäminen. Mahdollinen tuotantokatkos aiheuttaa taloudellisia menetyksiä. (Alva 2024)

2 ALVA-YHTIÖT OY

Toimeksiantajana opinnäytetyöhöni toimii Alva yhtiöt Oy (entinen Jyväskylän Energia Oy). Alva on Jyväskylän kaupungin omistama yhtiö, jonka toimialaa ovat kaukolämpö, vesi ja sähkö. Alva-yhtiöiden historia ulottuu vuoteen 1902, jolloin Jyväskylän kaupunginvaltuusto perusti kunnallisen sähkölaitoksen 23.4.1902. Jyväskylän Energia muutti nimensä Alvaksi 23.10.2019. Alva Yhtiöiden liikevaihto oli vuonna 2023 182 miljoonaa euroa ja henkilöstön määrä 230. Alva Yhtiöiden toimitusjohtajana toimii Tuomo Kantola ja hallituksen puheenjohtajana Sinuhe Wallinheimo. Alva yhtiöillä on kaksi isoa voimalaitosta Jyväskylässä, Rauhalampi ja Keljonlahti. Alvalla ei ole enää omaa sähkön kuluttajamyyntiä vaan Alvan tuottaman sähkön kuluttajamyynnin hoitaa Väre-yhtiö. Alvalla on oma kaukolämpöverkko ja oma sähkönsiirtoverkko Jyväskylän alueella.

Alvan tavoite on olla hiilineutraali vuoteen 2030 mennessä. Tällä hetkellä yhtiössä on meneillään investoinnit, joilla mennään kohti hiilineutraalia energiantuotantoa. Vuonna 2024 alkoi kahden sähkökattilan ja kaukolämpöakun rakentaminen Rauhalahden voimalaitoksen alueelle. Toinen merkittävä vuonna 2024 käynnistynyt investointi on lämpöpumppulaitos, jolla otetaan lämpöä talteen jätevedestä. Lämpöpumppulaitos sijoittuu Nenäinniemeen Jyvässeudun puhdistamo Oy:n viereen. Sähkökattiloiden yhteisteho on 120 MW ja lämpöpumppulaitoksen noin 50 MW. Uusilla investoinneilla on tarkoitus osittain korvata nykyisen Rauhalahden voimalaitoksen kaukolämmön tuotanto. Ilman merkittäviä investointeja Rauhalahden, kattilan elinkaari päättyy vuoteen 2040 mennessä.

Alva on yhdessä seitsemän muun kaupunkienergiayhtiön kanssa Suomen Hyötytuuli Oy:n omistaja. Osakkaana Alva saa myös omistusosuuttaan vastaavan määrän tuulivoimalla tuotettua sähköä. Suomen Hyötytuuli tuottaa tuulienergiaa yhdeksässä tuulipuistossa (yhteensä 654 MW). (Alva, Hyötytuuli 2025)

3 KELJONLAHDEN VOIMALAITOS

3.1 Voimalaitoksen esittely

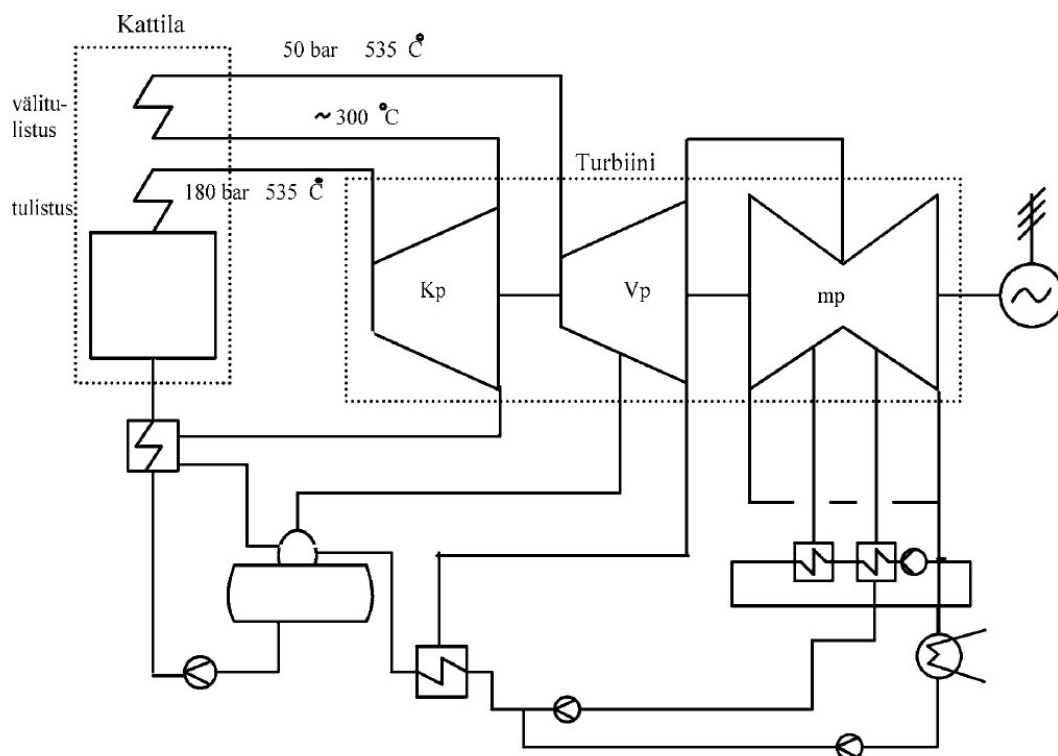
Keljonlahden voimalaitoksen omistaa Jyväskylän Voima Oy, jonka omistaa pääosin Alva yhtiöt 81,4 prosenttiosuudella. Jyväskylän voimalla on myös pienosakkaita.

Keljonlahden voimalaitos on vuonna 2010 valmistunut CHP-laitos (sähkön ja lämmön yhteistuotanto) jonka teho on 495 MW. Keljonlahden kattilan on toimittanut Foster Wheeler, joka toimii nykyään nimellä Sumitomo SHI FW energia. Kattila toimii kiertopetiteknikalla ja siinä on välitulistus turbiinin sähköntuotannon maksimoimiseksi.

Kattila toimii liukuvalla paineella tehotason mukaan ja tuorehöyryn maksimipaine on 163 bar. Välitulistushöyryn maksimipaine on 38 bar. Höyryvirtaus on maksimissaan 164 kg/s korkeapainehöyryä ja 143 kg/s välitulistushöyryä. Höyryn maksimilämpötila on 563 °C.

Turbiinissa on kolme osiota: korkeapaineosa (KP), välipaineosa (VP) ja matalapaineosa (MP).

Puupolttoaineen osuutta on nostettu Keljonlahden kattilassa vuosi vuodelta ja tavoitteena on käyttää laitosta vuodesta 2026 alkaen pelkällä puupohjaisella polttoaineella. (Alva 2024)



Kuva 1. Periaatekuva voimalaitosprosessista, jossa on välitulistus (Huhtinen, Korhonen, Pimiä, Urpalainen 2016)

Turbiinin korkeapaineosan läpi mennyt höyry johdetaan takaisin kattilaan välitulitukseen, josta se palaa takaisin turbiinin välipaineosaan. Sieltä höyry johdetaan taas edelleen matalapaineosaan ja kaukolämmönvaihtimiin. Näissä höyry lauhtuu vedeksi ja se palautetaan kiertoon matalapaine-esilämmittimien kautta syöttövesisäiliöön. Sieltä taas syöttövesi pumpataan korkeapaine-esilämmittimien ja ekonomaiserin läpi kattilan lieriöön. Sieltä vesi lähtee kiertämään kattilassa laskuputkia pitkin ja höyrystyy samalla. Kun vesi on muuttunut höyryksi, se kulkeutuu lieriöstä neljän tulistusvaiheen läpi turbiiniin. Näin toimii lähes suljettu vesi-höyrypiirin kierto. Normaalisissa tuotannossa prosessiin lisättävä lisäveden määrä on erittäin pieni.

Keljonlahden voimalaitoksen sähköteho on maksimissaan 170-210 MW ja kaukolämpöteho maksimissaan 250-300 MW riippuen ajomallista. Kun halutaan tuottaa mahdollisimman paljon sähköä, vähentyy kaukolämmön tuotanto. Tämä toimii myös toistensa päin, kun halutaan tuottaa mahdollisimman paljon kaukolämpöä, vähentää tämä sähköntuotantoa. Tuotantoa suunnataan sähkön pörssihinnan ja kaukolämmön tarpeen mukaan. Kahden voimalaitoksen yhteisajomallissa, kun ajetaan saman aikaisesti Keljonlahden voimalaitoksella ja Rauhalahden voimalaitoksella, voidaan toisella laitoksella tehdä pääasiassa sähköä ja toisella kaukolämpöä tarpeen mukaan. Keljonlahden voimalaitos on suunniteltu sähköntuotantoon, kun taas Rauhalahden voimalaitos on suunniteltu kaukolämmön tuotantoon, koska Rauhalahdessa on savukaasupesuri.

Keljonlahden voimalaitos tuottaa kaukolämpöä Jyväskylän kaupungin kaukolämpöverkkoon ja sähköä valtakunnan verkkoon. (Alva 2025)

3.2 Leijukerros poltto

Leijukerros polttoa on ryhdytty käyttämään energian tuotannossa vasta 1970-luvulla. Se on syrjäyttänyt lähes kokonaan arinatekniikan yli 20 MW:n tehoilla ja on varteenotettava vaihtoehto arinapoltoille pienemmilläkin tehoilla.

Leijukerrostekniikalla tarkoitetaan polttotapaa, jossa polttoaine poltetaan leijutettavan hiekan seassa. Hiekka leijutetaan alaspäin puhallettavalla ilmalla. Leijukerroskattilat jaetaan kerrosleijukattiloihin ja kiertopetikattiloihin. Näiden periaatteellinen ero on käytetyssä leijutusnopeudessa. Kerrosleijukattilassa leijuva hiekka muodostaa kattilan pohjalle 0,4–0,8 metriä paksun kerroksen, jonka pinta on selvästi erotettavissa. Kiertopetikattilassa käytetään hienompaa hiekkaa ja suurempaa leijutusnopeutta, jolloin hiekka poistuu kaasuvirran mukana tulipesästä. Se palautetaan takaisin tulipesään syklonilla, jossa savukaasut ja hiekka erotetaan toisistaan.

Kerrosleijukattilat soveltuvat erityisen hyvin kosteille polttoaineille. Kattilan tulipesään syötetty kostea polttoaine hautautuu kuumaan hiekkaan ja kuivuu siinä syttyen lopulta palamaan.

Kiertopetikattila soveltuu kosteiden polttoaineiden polttamisen lisäksi myös hiilen polttoon. Tulipesästä karkaavat palamattomat hiilipartikkelit saadaan syklonin avulla palautettua tulipesään ja palamattoman polttoaineen häviöt voidaan pitää pieninä. Hiilen poltossa leijukerrostekniikan etuna on se, että sekä typen oksidien että rikin oksidien päästöt voidaan pitää hyvin kurissa varsinkin pienin lisäinvestointikustannuksin. Tämä on mahdollista, kun käytetään alhaisempaa palamislämpötilaa, jolla vähennetään typen oksidien syntymistä. Rikkipäästöt pidetään kurissa savukaasujen rikinpuhdistuksella, joka voidaan toteuttaa syöttämällä kalkkia suoraan tulipesään.

Suomessa kiertopetikattiloita käytetään kaukolämpövoimalaitoksissa, joissa on haluttu varautua myös hiilen polttoon. Maailmalla kiertopetikattiloita käytetään pääasiassa suurten, hiiltä polttoaineena käyttävien lauhdevoimalaitosten kattiloina.

Leijukerroskattilan polttotilalla on korkea lämpökapasiteetti. Polttila muodostuu leijusuutinarinasta, petihiekkakerroksesta ja muurauksista. Kiinteää polttoainetta syötetään pedin päälle yhtä tai useampaa pudotusputkea pitkin. Pienet partikkelit palavat nopeasti leijukerroksen yläpuolella. Suuremmat partikkelit kulkeutuvat petiin, missä ne kuivuvat ja kaasuuntuvat. Jäännöshiili palaa pääasiallisesti leijupedissä, kun taas haihtuvat ainesosat palavat sekä pedissä että sen yläpuolella. Polttoaineen kosteuden vaihtelulla ei ole epäedullista vaikutusta palamiseen. (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2016, 36)

4 PETIMATERIAALI

Kiertopeti- ja leijupetikattiloissa käytetään yleisesti luonnonhiekkaa petimateriaalina. Näissä kattilatyypeissä ei ole kiinteää arinaa, minkä päällä polttoaine palaa vaan palaminen tapahtuu hiekan seassa. Petimateriaali leijuu kattilan tulipesän alaosassa puhaltimen tuottaman ilmavirran avulla ja leijutetun hiekkapatjan päälle syötetään polttoaine.

Luonnonhiekkaa petimateriaalina on ollut käytössä leijupetitekniikan keksimisestä lähtien, mutta siirtyminen pois turpeen poltosta on muodostanut oman haasteen luonnonhiekan käytölle. Puupolttoainetae, kuten kokopuuhaake, on isompi partikkelista kuin turve ja näin puupohjainen polttoaine palaa enemmän pedissä, jolloin petimateriaali kuormittuu enemmän.

Luonnonhiekkaa sisältää kvartsia, joka reagoi biopolttoaineiden sisältämien alkaliain kanssa. Varsinkin kaliumin (K) ja natriumin (Na) kanssa kvartsipitoinen luonnonhiekkaa muodostaa kiderakennetta, agglomeraatiota. (Klasila & Majanen, 2021)

Nykyään on tullut käyttöön kvartsivapaa petimateriaali Gr-Granuli eli masuunikuona. Se on inertti alkaleille ja se ei reagoi niiden kanssa. Kun taas luonnonhiekan sisältämän kvartsin ja alkaliain yhteinen reaktio muodostaa kvartsi-partikkelin pintaan seoksen, jolla on alhainen sulamispiste.

Alva-yhtiöillä on testattu Granulia petimateriaalina molemmissa voimalaitoksissa Keljonlahdessa ja Rauhalahdessa, jossa on ajettu pitkiäkin ajojaksoja Granuli petimateriaalina.

Granulia käytettäessä petimateriaalin vaihtoa voidaan vähentää jopa 80 prosenttia, koska Granuli ei liikaannu eikä reagoi alkaliain kanssa. Esimerkiksi UPM Tervasaaren tehtaan voimalaitoksella päivittäinen petimateriaalin vaihtomäärä on pienentynyt 10-15 tonnista Granulilla 2 tonniin. (Fescon 2024)

Alvalla on vuosien varrelta tutkimustietoa siitä, kuinka paljon erilaiset polttoaineseokset vaikuttavat petimateriaaliin. Jos markkinatilanne muuttuu polttoaineissa ja poltettava seos muuttuu, myös petimateriaalin vaihtomäärään reagoidaan samalla. Mitä enemmän poltetaan puuta luonnonhiekkaa petimateriaalina, sitä enemmän petimateriaalia on vaihdettava. Jos kattilassa poltetaan pelkästään puupohjaista polttoainetta, on järkevä käyttää Granulia petimateriaalina. Kattilan kuormatase vaikuttaa myös siihen, kuinka paljon petimateriaalia on vaihdettava. Polttoainevirta ja sen mukana tuleva alkalimäärä muuttuu minimikuormasta lähes kolminkertaiseksi, jos kattilalla ajetaan täyttä tehoa.

Leijupetikattila on yleisesti sintraantumisherkempi kuin kiertopetikattila. Tämän vuoksi petimateriaalin laadunvalvonta on tärkeämpää leijupetikattiloilla. (Fescon, Alva 2024)

5 SINTRAANTUMINEN

Termeinä agglomeraatio ja sintraantuminen ovat hyvin lähellä toisiaan. Agglomeraatio tarkoittaa yhteen kasautumista ja sintraantuminen on yhteen sulamista. Sintraantuminen on sarja reaktioita, jossa massan hiukkaset sulavat yhteen ja takertuvat toisiinsa. Sintraantumisessa massa tiivistyy ja muuttuu vettä läpäisemättömäksi. Mikäli polttolämpötila ylittää massan sintraantumislämpötilan, alkaa massa sulamaan. Sulava massa muuttuu jähmeäksi liuokseksi, johon alkaa muodostua kuplia kaasuuntuvista ainesosista. (Brinck ym. 2022)

Petimateriaalin riittävä uusiminen estää haitallisten alkalien kertymisen leijupetihiekan pintapartikkeleihin ja näin sintraantumista pyritään estämään. Toinen tärkeä asia polttoprosessin hallinnassa on petilämpötilan säätäminen ilmajaon ja mahdollisen kiertokaasupuhaltimen avulla, ettei hiekkapartikkelit pääse sulamaan.

Leijukerros- ja kiertopetikattiloissa sintraantuminen estää ilmalla tapahtuvan leijutuksen, iso partikkeli ei leiju. Pedin laajamittainen sintraantuminen johtaa kattilan tuotantokatkokseen. Sintraantunutta petiä kutsutaan yleisesti kakuksi, jonka poistaminen kattilasta vie päiviä koska se ei jäähdy sisältä kovin nopeasti, jotta se voitaisiin turvallisesti hajottaa ja siirtää pois kattilasta. Sintraantunut peti on vaihdettava kokonaan riskien pienentämiseksi. Petimateriaali poistetaan kattilasta pohja-aukkojen kautta ja loput kappaleet, mitkä eivät mahdu poistoaukoista rikotaan ja imuroidaan pois kattilasta suurtehoimurilla. (Alva 2024)

6 KELJONLAHDEN KATTILAN POHJATUHKALAITTEISTO

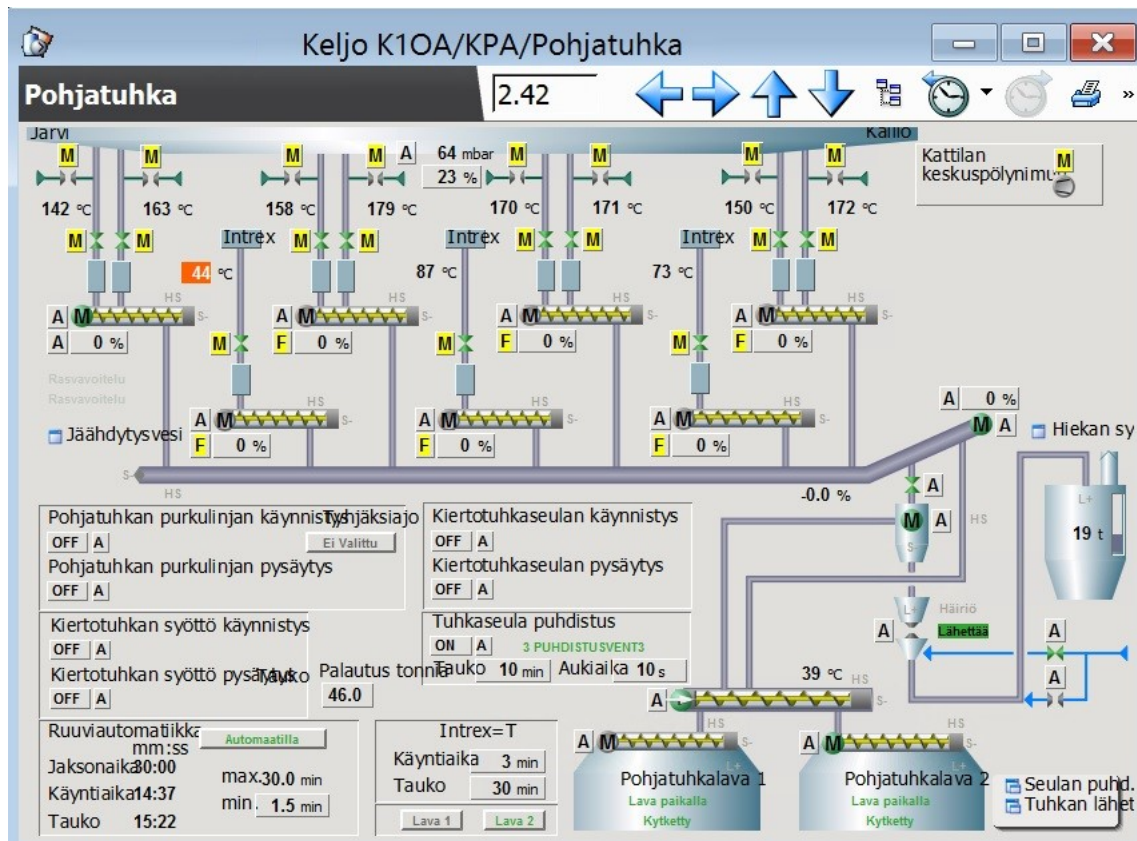
Keljonlahden kiertopetikattila on kokoluokaltaan suuri, joten petimateriaaliakin on kattilassa paljon, noin 150 tonnia. Käytettäessä luonnonhiekkaa seulontaan menee noin 45 tonnia vuorokaudessa. Tästä poistetaan noin kymmenen tonnia karkeaa materiaalia, uutta hiekkaa lisätään suunnilleen saman verran. Polttoaineen mukana tulee kiviä välillä enemmän ja myös tämä näkyy poistettavan karkean osuuden kasvaessa. Pohjatuhka, kattilasta poistettava petimateriaali menee seulontaan. Seulon ylite poistetaan pohjatuhkalavalle ja aksepti palautetaan pneumaattisella kuljettimella kattilan kiertohiekkasiilon. Pohjatuhka voidaan poistaa myös suoraan lavalle, jos ei ole seulontalaitteistoa. Seulon rikkoontuessa tai kiertohiekkasiilon ollessa täynnä, kattilasta poistettava petimateriaali menee seulomatta suoraan pohjatuhkalavalle.

Keljonlahden kattilan pohjatuhkalaitteistoon kuuluu kahdeksan pohjatuhkan poistoaukkoa tulipesän pohjalla, jokaisen kahden aukon poistotorvi johtaa vesijäähdytteiselle pohjatuhkaruuville, joita on neljä kappaletta. Intrex-tulistinkammioissa, joita on kolme kappaletta, on omat petimateriaalin poistoaukkonsa, jokaisessa kammiossa kaksi poistoaukkoa ja niillä omat intrex-pohjatuhkaruuvit joita on kattilassa kolme kappaletta. Yhteensä kattilassa on siis seitsemän pohjatuhkaruuvia. Kun pohjatuhkan kolakuljettimelta otetaan pohjatuhkanäytettä, intrex-pohjatuhkaruuvit asetetaan seis-tilaan ohjauksjärjestelmästä ja odotetaan minimissään 20 minuuttia, jolloin intrex-tulistimien hiekan osuus on poistunut kuljettimelta. Tällöin saadaan tutkittua vain tulipesän pohjatuhkan osuutta.

Pohjatuhkaruuvit siirtävät pohjatuhkan kolakuljettimelle. Pohjatuhkakuljetin kuljettaa pohjatuhkan seulontaan, karkea osuus seulotaan kierrosta pois rumpuseulalla ja aksepti palautetaan pneumaattisella kuljettimella kiertohiekkasiilon. Karkea osuus pohjatuhkasta poistetaan kierrosta ja kuljetetaan ruuvikuljettimella rumpuseulan alta pohjatuhkalavalle, jossa on vielä oma jakoruuvi, joka jakaa materiaalin tasaisesti koko lavan osuudelle. Pohjatuhkalavoja on kaksi kappaletta, kun toinen tulee täyteen, automaattikka kääntää ruuvikuljettimen purkamaan materiaalin toiselle lavalle.

Kiertohiekkasiilosta kiertohiekka annostellaan taas pneumaattisesti takaisin kattilaan kahta eri syöttöputkea pitkin, joita käytetään vuorotellen, tämä jakaa annosteltavan kiertohiekan tasaisemmin tulipesässä oikealle ja vasemmalle. Suurin osa kattilaan annosteltavaa hiekkaa on jo kierrossa ollutta ja vain pieni osa neitseellistä uutta hiekkaa. Suhde on noin neljän suhde yhteen. Uuden hiekan annostelumäärä riippuu pohjatuhkan analyysien tuloksista. Jos peti on hyvässä kunnossa, voidaan uutta hiekkaa annostella vähemmän ja jos peti todetaan olevan huonossa kunnossa, uuden hiekan annostelua lisätään. Pohjatuhkan rumpuseula on tärkeä pitää puhtaana ja ehjänä, näin voidaan estää käyttökelpoisen kiertohiekan poisto pohjatuhkalavalle. Pohjatuhkaseula tukkeentuu käytössä ja seula puhdistetaan määräaikaistoimenpiteenä säännöllisesti. Seulon alla olevalla pohjatuhkan siirto-ruuvilla on lämpötilamittaus, jonka avulla voidaan indikoida, jos pohjatuhkan rumpuseula on tukossa tai siinä on reikä. Käyttökelpoisen kiertohiekan kuljettaminen pois laitokselta lisää kustannuksia kuljetuksen, mahdollisen kaatopaikkamaksun ja turhan uuden hiekan tilauksen muodossa. Hiekan siirrossa autosta siiloon, siilosta kattilaan ja seulonnan jälkeen seulalta kiertohiekkasiilon käytetään pneumaattisia lähettämiä, jotka kuluttavat siirtoputkia merkittävästi. Kunnossapitokustannukset nousivat myös, kun hiekkaa joudutaan siirtämään turhaan.

Molempien Alvan voimalaitosten pohjatuuhka, joka on suurimmaksi osaksi petihiekkaa, hyödynnetään maanrakentamisessa. Hyötykäytössä sovelletaan Valtioneuvoston asetusta 843/2017 eräiden jätteiden hyödyntämisestä maanrakentamisessa. Keljonlahden ja Rauhalahden voimalaitosten pohjatuuhkien laatua valvotaan Ely-keskuksen hyväksymän laadunhallintajärjestelmän mukaisesti. (Alva 2024)



Kuva 2. Pohjatuuhkalaitteisto DNA-järjestelmässä (Ratia O. Valmet, Alva 2024, CC BY-SA)

7 POHJATUHKAN SEULONTA-ANALYYSI

Alvan voimalaitoksilla pohjatuhkaa analysoidaan erilaisin menetelmin. Päivittäin otetaan seulontakoe, jossa määritellään hiekan raekokojakauma. Viikoittain lähetetään näyte ulkopuolisen yhtiön laboratorioon, jossa tehdään petimateriaalin kemiallinen koostumusmääritys. Ulkopuolisen laboratorion tulosten perusteella määritetään hiekan vaihtomäärä. Normaali uuden hiekan lisäysmäärä Keljonlahden laitoksella on 10-15 tonnia vuorokaudessa. Aikaisemmin tehtiin viikoittain myös polttokoe, jossa määritettiin mahdollinen sintraantuminen. Tästä luovuttiin, koska ulkopuolinen yhtiö testaa nykyään laboratoriossaan petimateriaalia. (Alva 2025)

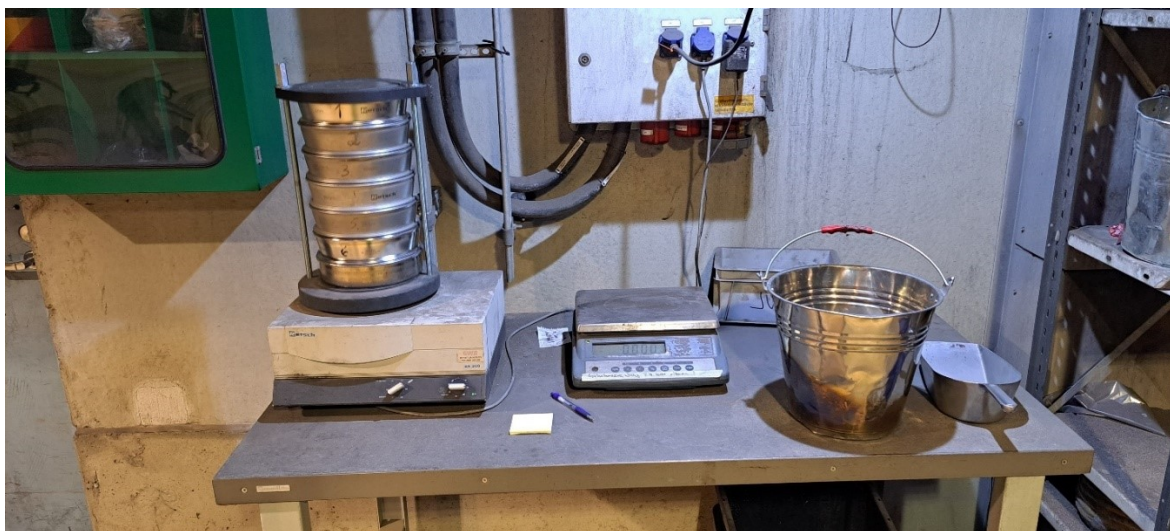
Näytettä otetaan 300 grammaa, joka laitetaan pieneen täryseulaan 30 minuutin ajaksi, eri kokoiset partikkelit erottuvat toisistaan eri kerroksiin. Seula erottelee partikkelit seitsemään eri jakeeseen.

Seulat punnitaan ensin tyhjinä ja kokeen jälkeen hiekan kanssa ja tulosten perusteella määritellään hiekan raekokojakauma. Kuvassa 3 on perinteinen seulontalaitteisto. Laitteistoon kuuluu näyteastia, näytekauha, tarkkuusvaaka, pieni täryseula ja kirjoitusvälineet tulosten kirjaamista varten.

Seurantajakson aikana läpi käydyistä näytteistä vain yhdessä (20.02.2025) seulonnan tulos oli kärkeän rajalla. Muiden päivien tulokset olivat kaikki tavoitealueella

Hiekan seulonta	Seulan numero	Seulan koko
Karkea aines seulojen ylite	1	2 mm ylite
	2	1 mm
	3	500 µm
	4	355 µm
	5	250 µm
	6	125 µm
Hienoaines seulojen alite	7	125 µm seulan alite

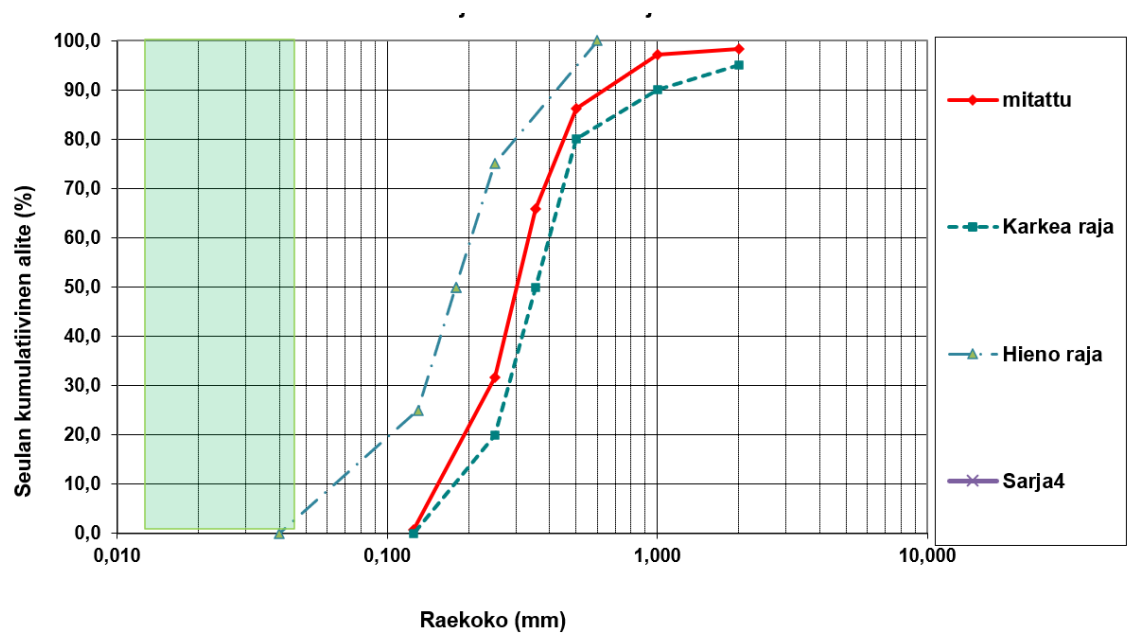
Taulukko 1. Seulan koot (Ratia O. Alva 2025)



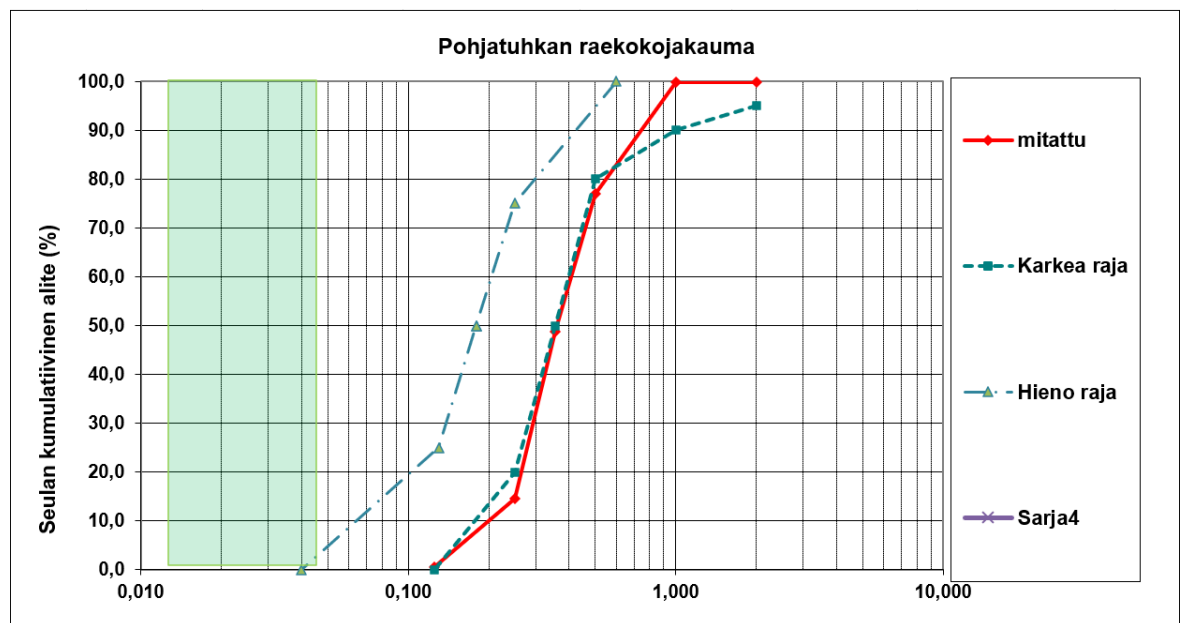
Kuva 3. Pohjatuhkan seulantalaitteisto Keljonlahden voimalaitoksella (Ratia O. Alva 2024, CC BY-SA)

Jyväskylän Voima Oy						
Keljonlahti: CFB 486 MWpa						
Pohjatuhkan raekokoanalyysi						
Päiväys + aika =	8.11.2024.klo 20.00	(kirjoita muodossa pp.kk.vvvv tt.mm)	Tekijä =		1	
Näytteen määrä: 300g			Näytteenoton tiheys: 1x/päivä norm, tarv. 2x/päivä			
Seulonta-aika: 30 min			Näytteenottoaika: pohjatukakuljetin			
Jaksotettu käynti: ON			Näytteenotto: intrex seis 60 min			
Amplitudi: 70 %			ennen varsinaista näytteenottoa			
Seulakoko mm	Näyte g	Osuus %	Keräytyvä osuus %	Karkea raja %	Hieno raja mm	Hieno raja %
2,000	5,0	1,6	98,4	95	0,6	100
1,000	4,0	1,3	97,2	90	0,25	75
0,500	35,0	10,9	86,3	80	0,18	50
0,355	65,0	20,3	65,9	50	0,18	50
0,250	110,0	34,4	31,6	20	0,13	25
0,125	99,0	30,9	0,6	0	0,04	0
Pohja	2,0	0,6		0		
	320	100,0				

Kuva 4. Seulonta 08.11.24 (Ratia O, Alva 2024, CC BY-SA)



Kuva 5. Seulonnan tulokset 08.11.24 (Ratia O. Alva 2024, CC BY-SA)



Kuva 6. Seulonnan tulokset 20.02.25 (Ratia O. Alva 2025, CC BY-SA)

8 KONENÄKÖKAMERA JA -SOVELLUS

Konenäöllä (*machine vision*) pyritään yleensä matkimaan ihmisenäköä tai laajentamaan sen mahdollisuuksia. Konenäköjärjestelmä koostuu valonlähteestä, kohteesta, kamerasta, tietokoneesta ja siinä toimivasta kuvankäsittelyohjelmasta, joka tulkitsee kuvan automaattisesti.

Konenäön ja hahmontunnistuksen tavoitteena on hyödyllisten ja merkittävää lisäarvoa tuottavien sovellusten tuottaminen erityisesti digitaalista kuvankäsittelyä ja kuva-analyysiä hyödyntäen. Konenäkö on tarkka, nopea ja väsymätön rutiinitehtävien suorittaja, jolla voidaan parantaa prosessiteollisuuden tehokkuutta. Sitä käytetään esimerkiksi liukuhihnalla tapahtuvissa tuotetarkastuksissa ja pulonpalautusautomaateissa.

Termejä konenäkö ja tietokonenäkö (*computer vision*) käytetään monesti hieman ristiin. Jälkimmäisellä tarkoitetaan tietokoneiden korkeatasoista digitaalisten kuvien ja videoiden ymmärrystä. Se luokitellaan usein tekoälyn osaksi ja sitä käytetään esimerkiksi lääketieteellisissä kuva-analyyseissä. (Lehto ym. 2019)



Kuva 7. Pohjatuhkakuljetin ja konenäkökamera (Ratia O. Alva 2025, CC BY-SA)



Kuva 8. Pohjatuhkakuljetin ja konenäkökamera (Ratia O. Alva 2025, CC BY-SA)

Konenäkösovellus toimii online-periaatteella eli seuranta on jatkuvaa. Kamera kuvaa pohjatuhkakuljettimella kulkevaa pohjatuhkaa ja kameran signaali luetaan Photoboiler-ohjelmaan. Algoritmit tunnistavat erilaiset kappaleet pohjatuhkan seassa, kuten palamattomat jakeet, kivet ja sintraantuneen hiekan. Konenäön avulla voidaan reagoida nopeammin petimateriaalin muutoksiin ja muuttaa esim. kattilaan syötettävää polttoainejauetta ja vaihtaa petimateriaalia tiheämmin.

Photoboiler-ohjelma on linkitetty prosessinohjausjärjestelmä Valmet DNA:han, jossa tulee hälytys, jos sintterin osuus nousee. Järjestelmään on tehty kaksi eri piiri-ikkunaa, tuhkan sintterin hetkellinen arvo ja yhden tunnin keskiarvo. Asteikko on nolasta viiteen prosenttiin. Arvon noustessa yli kahteen prosenttiin tulee hälytys. Opinnäytetyössä tutkittiin tämän hälytyksen luotettavuutta.



Kuva 9. Yleiskuva Photoboiler-sovelluksesta 7.4.2025 (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)

Kaikista positioista
 Valitusta kuvasta Ominaisuuc

Haettava positio

Positio: Kuvaus: Tyyppi:

Hakutulos

Listanäkymä Tarkennin
 Puunäkymä

Muuttuja	Kuvaus
J1HDA20CQ201:av	TUHKAN SINTTERI
J1HDA20CQ201 1H:av	TUHKAN SINTTERI 1H KA.

Kohteita löydetty: 2

Kiertotul OFF A
 Kiertotul OFF A
 Tuhkase ON A
 Tauko 30 min

Intrex=T
 Käyntiaika 3 min
 Tauko 30 min

Palautus tonnia 46.0

Pohjatuhkalava 1
 Lava paikalla
 Kytetty

TUHKAN SINTTERI 1H KA.
 0.0-5.0 %
 0.04

TUHKAN SINTTERI
 0.0-5.0 %
 0.01

Kuva 10. Sintterihälytys DNA-järjestelmässä (Ratia O. Valmet, Alva 2025, CC BY-SA)

9 ANALYYSIT

Tutkimusosuudessa otettiin kymmenen eri näytettä pohjatuuhakuljettimelta perinteiseen tapaan ja tarkasteltiin näytteitä visuaalisesti. Näytteet valokuvattiin ja niitä verrattiin konenäkökameran muodostamaan kuvaan. Jokaiseen näytteeseen liittyy kaksi tai kolme valokuvaa, yksi normaalilla kameralla otettu, yksi konenäkökameran ottama kuva ja yksi konenäkökameran analysoima kuva, jossa eri partikkelit on merkattu eri värein.

Petimateriaalinäytteitä otettiin pohjatuuhakuljettimelta, samanaikaisesti tallennettiin konenäkökameran kuva ja vertailtiin näitä kahta eri näytteenottotapaa. Tarkoituksena oli tutkia kuinka tulokset korreloivat keskenään, onko yhtäläisyyksiä. Valitsin neljä eri muuttujaa jotka vaikuttavat petimateriaalin laatuun.

Ensimmäinen visuaalinen silmäys petimateriaalinäytteeseen antaa hyvän kuvan siitä missä kunnossa peti on. Jos näyte sisältää paljon kiveä ja agglomeroitunutta hiekkaa, peti on huonossa kunnossa. Näyte, jossa hiekka on juoksevassa muodossa ja raekoko pieni, voidaan todeta hyväksi, jos ei ole käytössä muita tutkimusmenetelmiä. Petihiekan kemiallisen koostumuksen määrittämisen avulla voidaan varmistua, onko visuaalinen havainto riittävä. Tutkimuksen aikana selvisi, ettei visuaalisesti hyvä näyte olekaan kemialliselta koostumukseltaan hyvä, vaan siinä voi olla kertynyttä natriumia ja kaliumia. (Alva 2025)

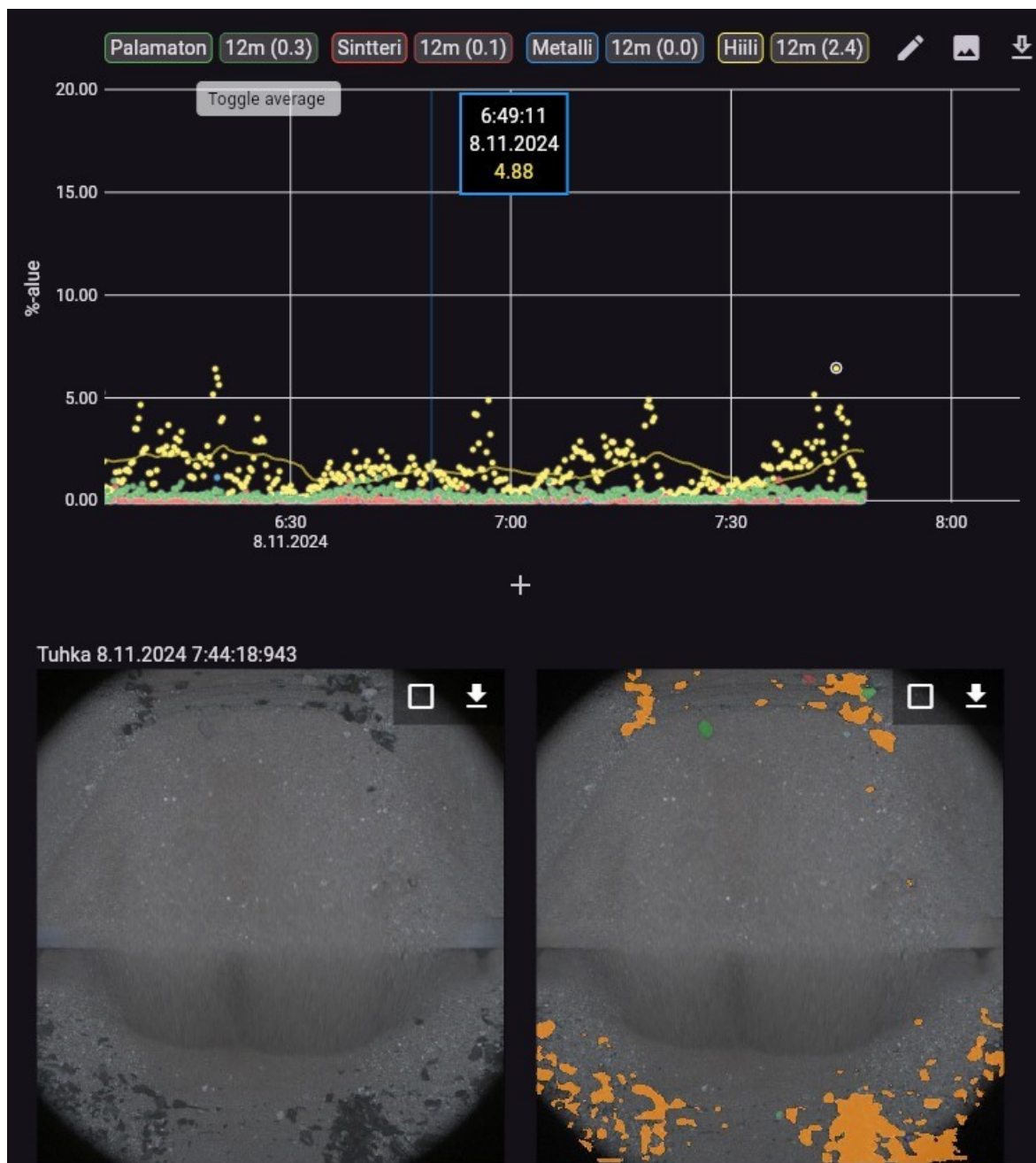
Opinnäytetyön tekemisen aikana sintteri-hälytystä DNA-järjestelmään ei tullut montaa kertaa, koska peti oli hyvässä kunnossa. Ajalla 08.11.24 – 20.2.2025 työtä tehdessä hälytys tuli järjestelmään 12 kertaa. Konenäkökameran datan mukaan ajanjakson sintterin osuus oli kuitenkin vain keskimäärin 0,4 %. Työtä tehdessä ei ollut vielä selkeää ohjeistusta, miten toimia, kun järjestelmä hälyttää, koska laitteet olivat vielä kehityskäytössä. Käytännössä hälytyksen kytkeytyessä päälle olisi ollut hyvä tarkastaa Photoboiler-ohjelman data ja mahdollisesti ottaa käsinäyte kuljettimelta. (Alva 2025)

Näytteenottotaulukko.

Taulukossa 2 esitetään petimateriaalinäytteiden näyteajankohtien prosessiarvot, jotka vaikuttavat petimateriaalin laatuun. Petimateriaalinäytteet ajalta 08.11.2024-20.02.2025.

Näyte numero	Aika	Petilämpötilan keskiarvo C	Kattilan teho	Polttoaineseos turve / bio osuus	Uuden hiekan syöttömäärä t/vrk
1	08.11.2024 klo 07:44	873 C	261 MW	25 / 75 %	10
2	09.02.2025 klo 08:42	850 C	275 MW	24 / 76 %	13
3	10.02.2025 klo 13:03	848 C	490 MW	24 / 76 %	13
4	11.02.2025 klo 10:27	831 C	348 MW	24 / 76 %	13
5	11.2.2025 klo 17:21	845 C	281 MW	24 / 76 %	13
6	13.2.2025 klo 00:08	843 C	302 MW	24 / 76 %	13
7	13.2.2025 klo 05:34	826 C	412 MW	24 / 76 %	13
8	13.2.2025 klo 19:32	850 C	462 MW	24 / 76 %	13
9	20.02.2025 klo 06:14	847 C	332 MW	25 / 75 %	16
10	20.02.2025 klo 11:13	860 C	259 MW	25 / 75 %	16

Taulukko 2. Näytteet. (Ratia O. 2025 Alva)



Kuva 11. Näyte 1 (Ratia O. Photoboiler, Alva 2024, CC BY-SA)

Opinnäytetyöhön liittyvät muut näytekuvat ovat liitteessä 1.

10 POHDINTA

Rinnakkaisten analyysien perusteella konenäkökamerasta on paljon apua petimateriaalin laadunvalvonnassa. Vaikka kamera toimisi ilman kuva-analytiikkaa, siitä on paljon apua havaitsemaan mahdollisia ongelmia petimateriaalissa. Pohjatuhkakuljettimella kulkee myös hienoa pölyä, joten sen seuranta kameran välityksellä on paljon käyttäjäystävällisempää. Konenäkökameran muodostamat värit antavat hyvin tietoa kuinka paljon pedissä on kiveä ja hiiltä. Eri objektit merkataan eri väreillä ja näistä muodostuu helposti luettava graafi. Datankeruun kautta voidaan määrittää kuinka eri partikkelien määrät ovat kehittyneet. Photoboiler-ohjelma luo tietokannan, jota voidaan analysoida jälkikäteen ja vertailla tuloksia prosessin muutoksiin. Lämmityskauden 2024-2025 edetessä lisäsimme hie-man karkeamman biopolttoaineen osuutta. Puupohjaisen polttoaineen keskimääräinen palakoko nousi samassa suhteessa. Tämä muutos näkyi visuaalisesti pohjatuhkanäytteissä omalla silmällä ja myös Photoboilerin havaitsemat palamattomien ja hiilen jakeiden osuudet nousivat hieman.

Ennen näytteiden ottamista mittaisin nykyisen näytteenottopisteen sijainnin verrattuna kameran sijaintiin kuljettimella ja huomioin viiveen, että saadaan samasta kohdasta otettua näyte. Jos näytteenottopisteet olisivat sijoitettu toistensa päin kuljettimelle eli kamera olisi ensin kulkusuunnassa ja sitten vasta näytteenottopiste, niin näytteiden korrelointi keskenään olisi vielä tarkempaa. Tähän en kuitenkaan voinut vaikuttaa. Siinä vaiheessa, kun päätettiin toteuttaa opinnäytetyö aiheeseen liittyen, laitteet oli jo sijoitettu pohjatuhkakuljettimelle. Kameran linssin puhtaana pitämiseksi asennettiin myöhemmässä vaiheessa ilmapuhallus. Ilmapuhalluksen todettiin pölyttävän petimateriaalia liikaa, joten se kytkettiin kuitenkin pois. Mahdollisesti jaksottainen puhallus linssille olisi tähän käyttötarkoitukseen sopiva, ohjataan ilmapuhallus linssille silloin, kun kamera ei kuvaa. Tämä voitaisiin toteuttaa ajastimen ja magneettiventtiilin avulla. Linssin likaisuusaste vaikuttaa hieman kameran tarkkuuteen, ei kuitenkaan merkittävästi. Pohjatuhkakuljettimen pölynpoistoa on tarkoitus parantaa tulevaisuudessa. (Alva 2025)

Analyysien edetessä tein huomion, että kattilan kuorma vaikuttaa suuresti petimateriaalin poistumiseen kattilasta. Kattilan tulipesän pohjalla on kaksi painemittausta, joilla mitataan paine-eroa. Paineero kertoo petipaineen eli sen kuinka paksu hiekkapatja leijuu kattilan pohjalla. Petimateriaalin poiston ohjaus tapahtuu petipainemittauksen perusteella. Kun kattilan teho on iso, myös puhaltimien ohjaus on suurempi ja näin petipaine pienenee ja samalla poisto pienenee. Kattilan tehon eri tasot hie-man vääristävät tilannetta, todellisuudessa kattilassa on sama määrä petimateriaalia eri tehotasoilla, vaikka mittaukset näyttävät muuta.

Tutkimustyön aikana vahvistui käsitys kameran toiminnasta ja siitä, että tulokset ovat järkeviä. Opetimme kameran taustalla toimivaa ohjelmaa toimimaan oikein. Ohjelmaan pystyy merkkamaan mikä objekti on mitäkin ja näin ohjelma kehittyy saadun palautteen perusteella.

Aikaisemmin, kun otettiin pelkästään yksi näyte petimateriaalista vuorokaudessa ja tästä analysoitiin 300 gramman osuus, otanta on todella pieni verrattuna koko kattilan hiekkamäärään. Nyt, kun käytetään kamerapohjaista analysointia, otanta on moninkertainen aikaisempaan verrattuna. Pedin laadun muutoksiin voidaan reagoida paljon nopeammin kuin ennen, kun tietoa on saatavilla lähes reaaliaikaisesti.

Työ tuotti paljon kuvia ja osan joutui jättämään pois opinnäytetyöstä, mutta niitä voidaan hyödyntää jatkotutkimuksissa. Jatkossa, kun kameran toimintaa saadaan varmistettua, voidaan kameran tuottaman datan perusteella mahdollisesti tehdä muutoksia prosessiin, vähentää tai lisätä hiekan vaihtoa kattilassa. Tulevaisuudessa hiekan vaihtomäärän muutokset voisivat mahdollisesti olla automaattisia konenäkökameran datan perusteella. Alkuvaiheessa on hyvä vielä operaattorin seurata miten ohjausmuutokset tapahtuvat.

LÄHTEET

- Alakangas Eija, Hurskainen Markus, Laatikainen-Luntama Jaana & Korhonen Jaana. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. (Verkkojulkaisu) VTT 2016 Vtt:n julkaisu nro 258
- Alva-Yhtiöt <https://www.alva.fi/alva/yhtio/tytar-ja-osakkuusyhtiot/>. Viitattu 25.2.2025
- Alva-Yhtiöt yleisesittely 2023. Alva Yritysesittely. Powerpoint 06.04.2023. Jyväskylä. Alvan sisäinen esittelymateriaali.
- Guillot Jaume Duch. Euroopan parlamentti 2023 https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_fi Ilmastonmuutoksen syyt Viitattu 24.2.2025
- Fescon GR-granuli esite. <https://www.fescon.fi/Download/23099/fescon-esite-granuli.pdf> 2024. Hyvinkää. Viitattu 25.2.2025
- Huhtinen Markku, Korhonen Risto, Pimiä Tuomo & Urpalainen Samu 2016 Voimalaitostekniikka. 3.painos. Keuruu: Otavan kirjapaino OY. ISBN 978-952-13-5426-7 Tekstiosuus ja kuva nro. 1.
- Brinck Jaana, Cortes Camilo, Falin Priska, Halko Saija, Jokinen Eeva, Kerimov Nikolo, Latva-Somppi Aura, Lautenbacher Nathalie, McPartlan Mimi, Palmu Sanna, Pelkonen Tomi, Turkoglu Erin & Visuri Karen. Keramiikan käsikirja (Verkkojulkaisu) Aalto yliopisto 2022 <https://mycourses.aalto.fi/mod/book/tool/print/index.php?id=889567&chapterid=7837>. Viitattu 25.2.2025
- Ruuska Jari 2024. Voimalaitoskemian asiantuntija. Alva-yhtiöt Oy. Keljonlahden voimalaitos. Keskustelut ajalla 01.12.2020 - 20.2.2025
- Klasila Tapio & Majanen Eero. Kemiaimedia 21.10.2021 Petimateriaali kiertää kattilassa <https://www.kemiaimedia.fi/petimateriaali-kiertaa-kattilassa/>. Viitattu 25.2.2025
- Lehto Martti, Neittaanmäki Pekka, Niinimäki Esko, Nyrhinen Riku, Ojalainen Anniina, Pölönen Ilkka, Rautiainen Ilkka, Ruohonen Toni, Tuominen Heli, Vähäkainu Petri, Äyrämö Sami & Äyrämö Sanna-Mari. Tekoölyn perusteita ja sovelluksia (Verkkojulkaisu), Jyväskylän Yliopisto 2019 <https://tim.jyu.fi/view/kurssit/tie/tiep1000/tekoalyn-sovellukset/kirja#teko%C3%A4lyn-perusteita-ja-sovelluksia>. Viitattu 25.2.2025
- Ratia Olli 2025. Pohjatuhkajärjestelmä. Kuva nro. 2. Alva ja Valmet Valokuva 07.02.2025. Jyväskylä: Oma kuvakokoelma
- Ratia Olli 2024 ja 2025. Kuvat nrot: 3-9 Alva ja Photoboiler. Jyväskylä: Valokuvat ajalla 1.12.2024-07.04.2025 Oma kuvakokoelma
- Ratia Olli 2025. Pohjatuhkajärjestelmä. Kuva nro. 10. Alva ja Valmet Valokuva 11.02.2025. Jyväskylä: Oma kuvakokoelma
- Ratia Olli 2024 ja 2025. Kuvat nrot: 11-47 Alva ja Photoboiler. Jyväskylä: Valokuvat ajalla 1.12.2024-20.02.2025 Oma kuvakokoelma

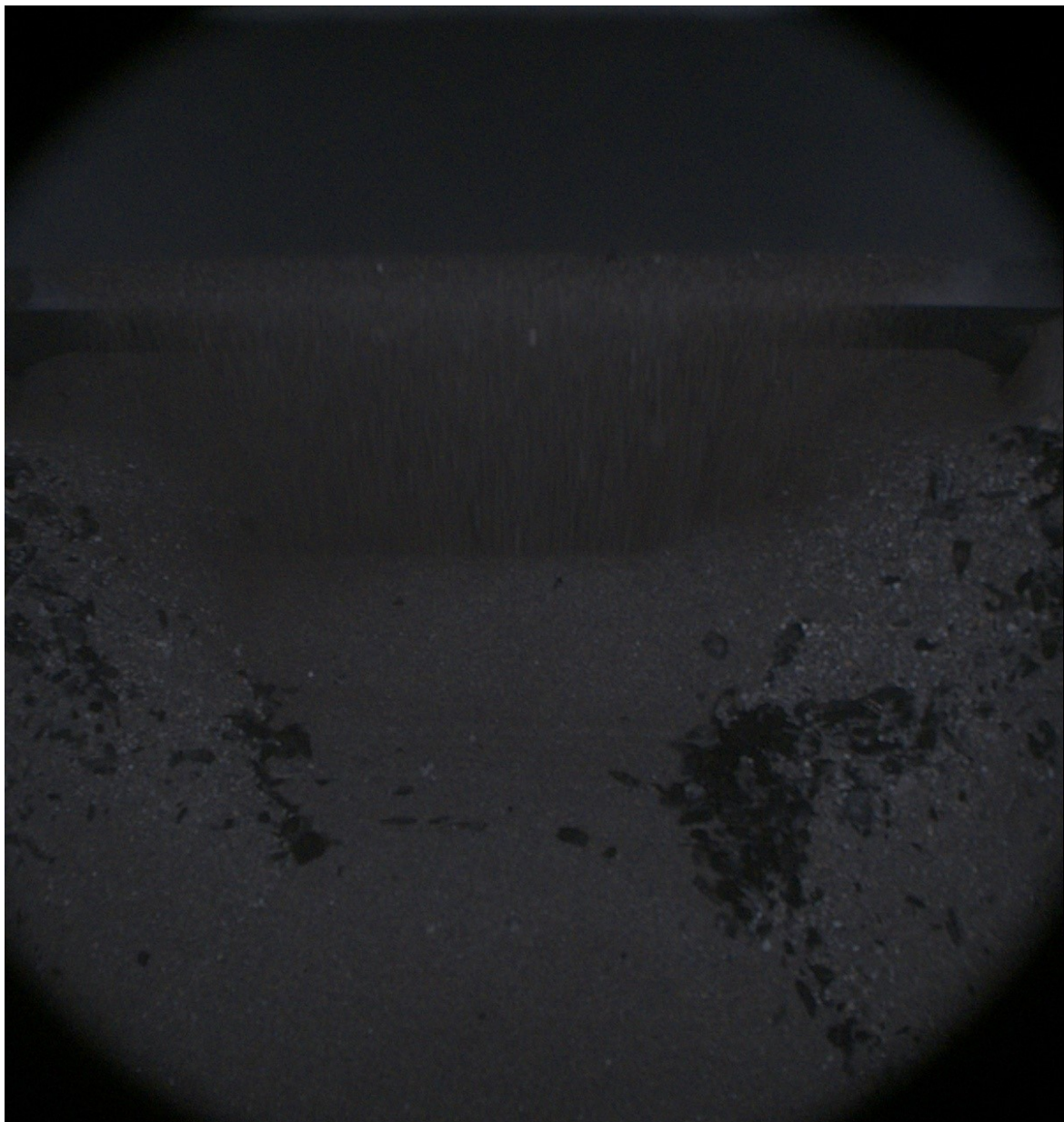
LIITE 1: PETIMATERIAALINÄYTTEIDEN KUVAT

Näytteiden kuvat ajalla 08.11.2024-20.02.2025

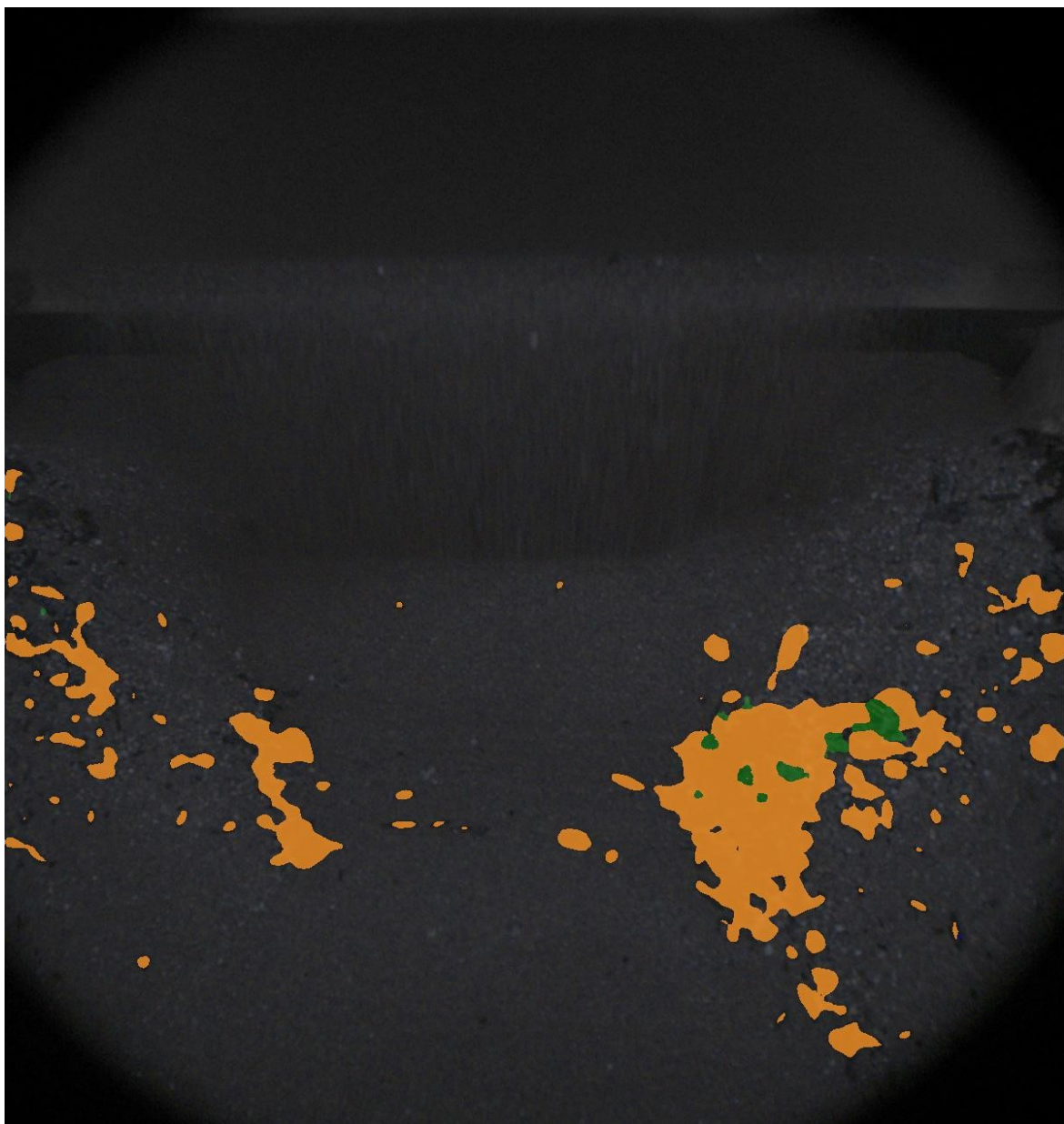
Kuvissa 12-47 esitetään petimateriaalinäytteet ja konenäkökameran algoritmien muodostamat tulkinnot kymmenessä eri näytteessä. Ohjelman merkitsemät värit kuvissa kuvaavat eri partikkeleja, jotka konenäkökamera on tulkinnut sille opetetun tiedon perusteella.



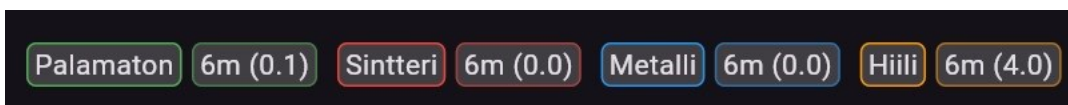
Kuva 12. Näyte 2 (Ratia O, Alva 2025, CC BY-SA)



Kuva 13. Näyte 2 peruskuva (Ratia O, Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)



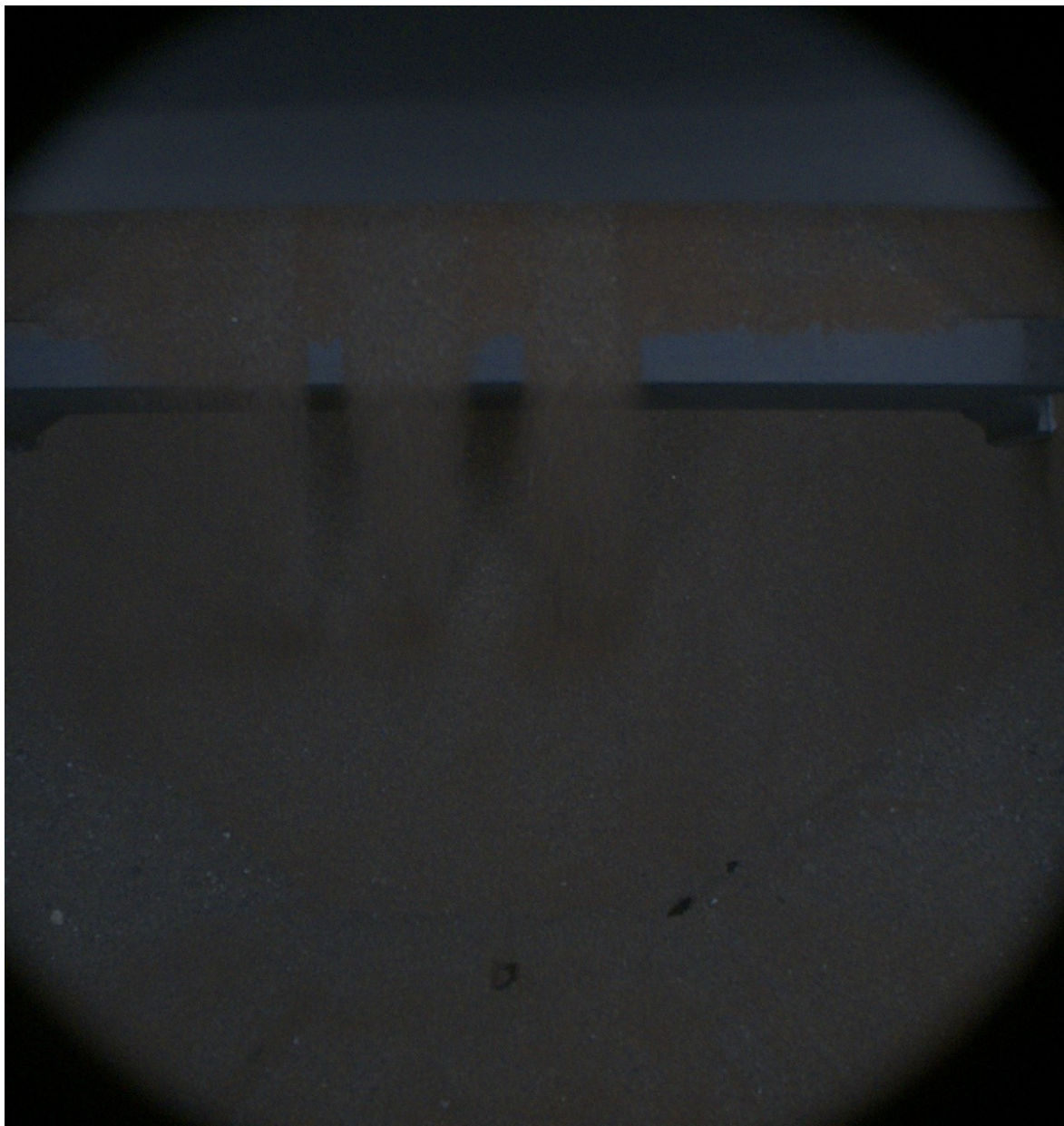
Kuva 14. Näyte 2 analysoitu konenäöllä (Ratia O, Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)



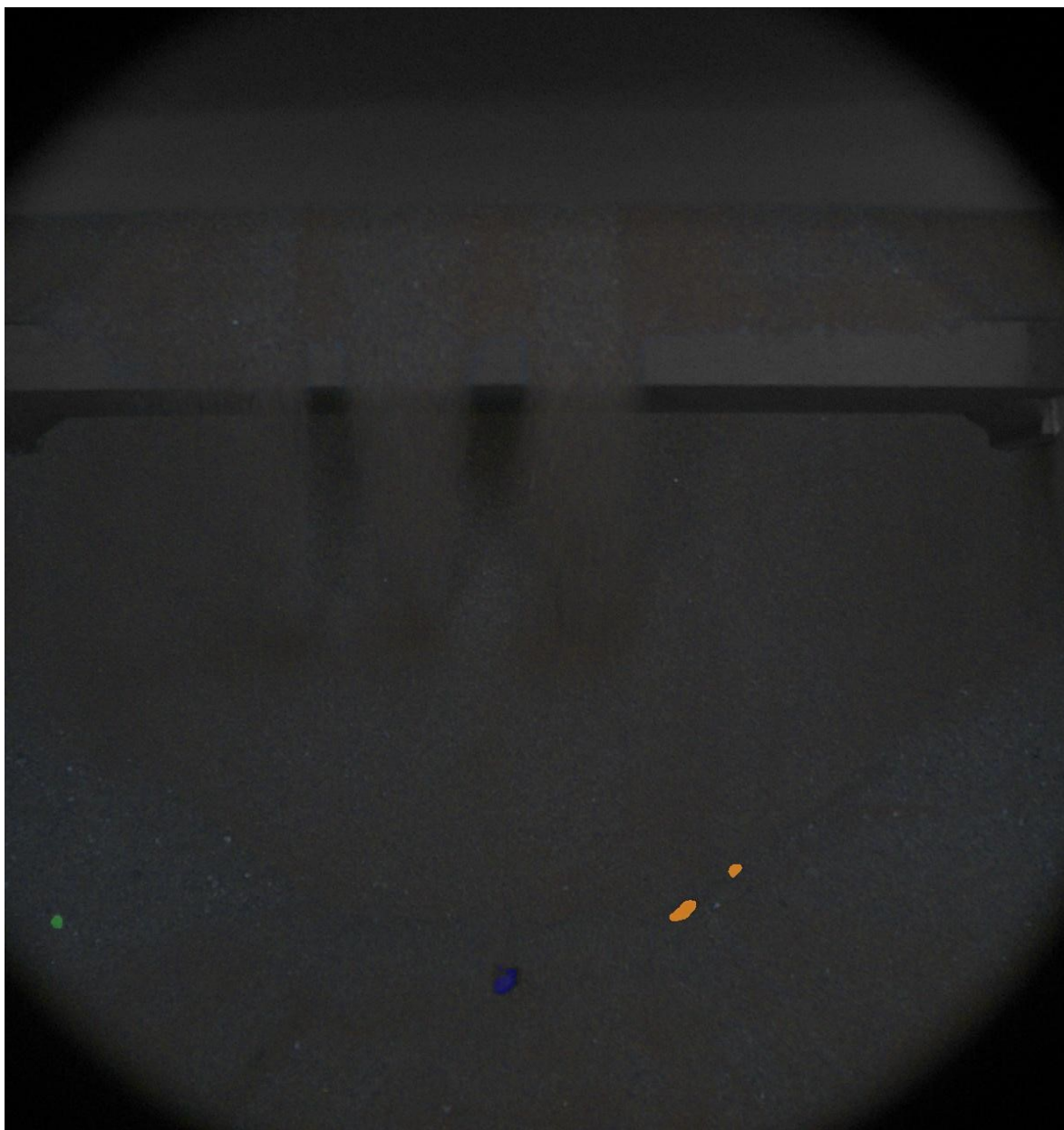
Kuva 15. Näyte 2 Photoboiler-algoritmien tulokset (Ratia O, Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)



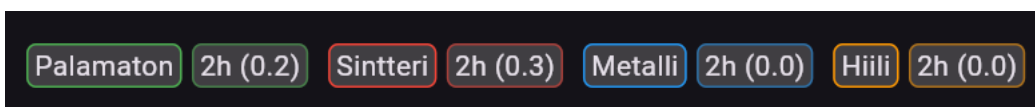
Kuva 16. Näyte 3 (Ratia O. Alva 2025, CC BY-SA)



Kuva 17. Näyte 3 peruskuva (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)



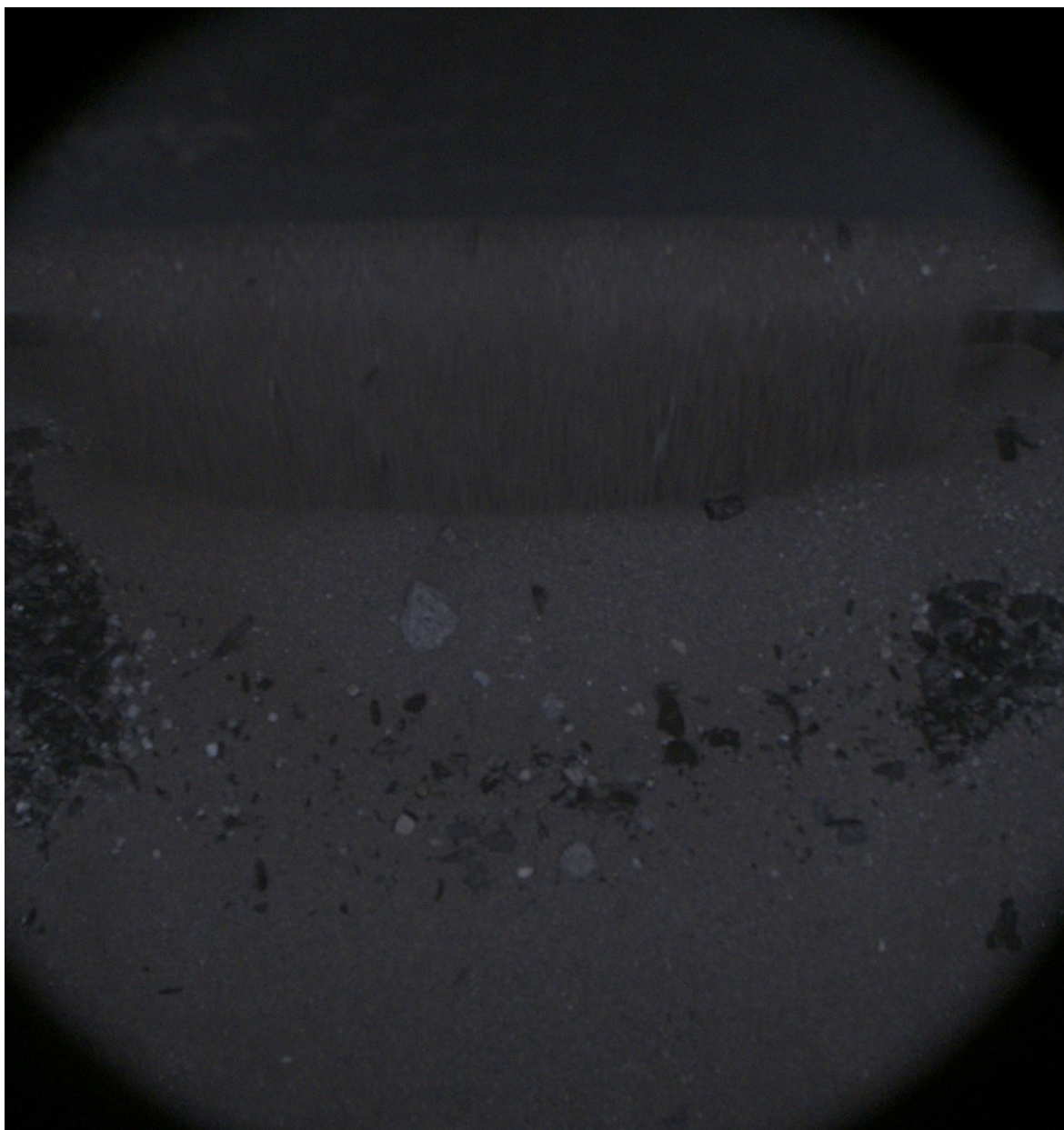
Kuva 18. Näyte 3 analysoitu (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)



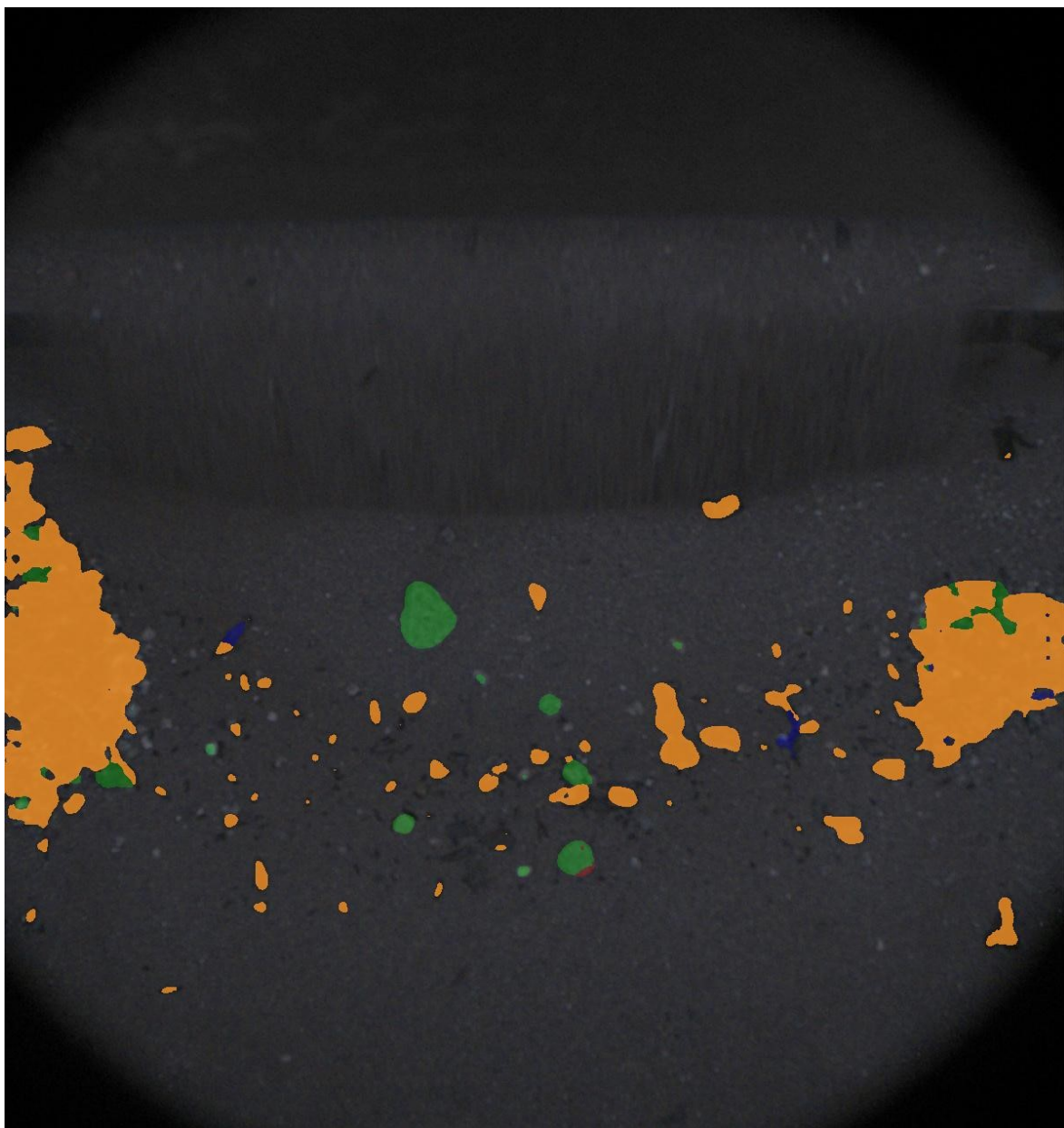
Kuva 19. Näyte 3 Photoboiler-algoritmien tulkinat (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)



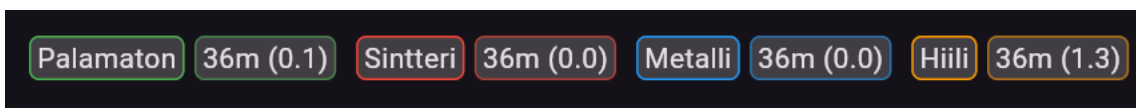
Kuva 20. Näyte 4 (Ratia O. Alva 2025, CC BY-SA)



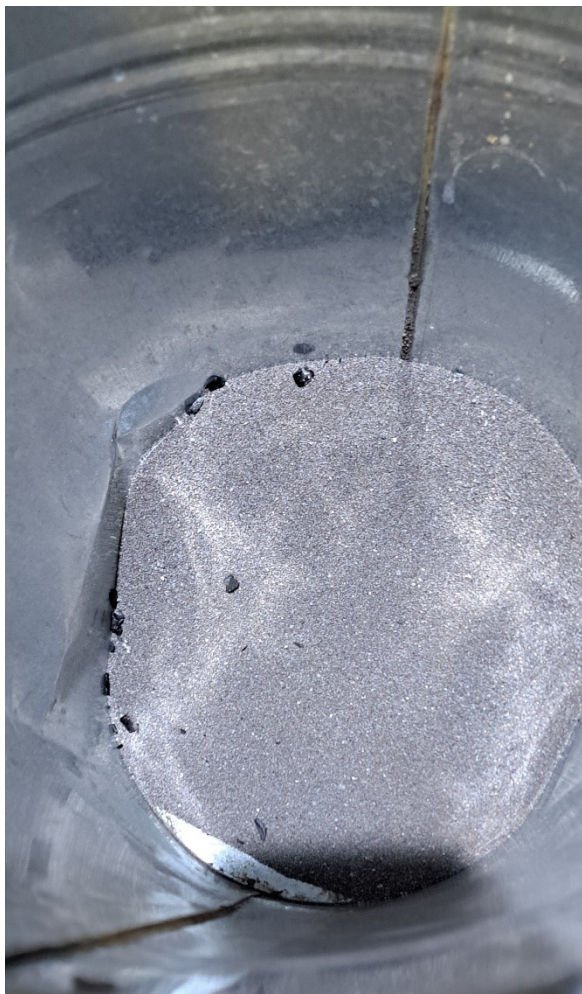
Kuva 21. Näyte 4 peruskuva (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)



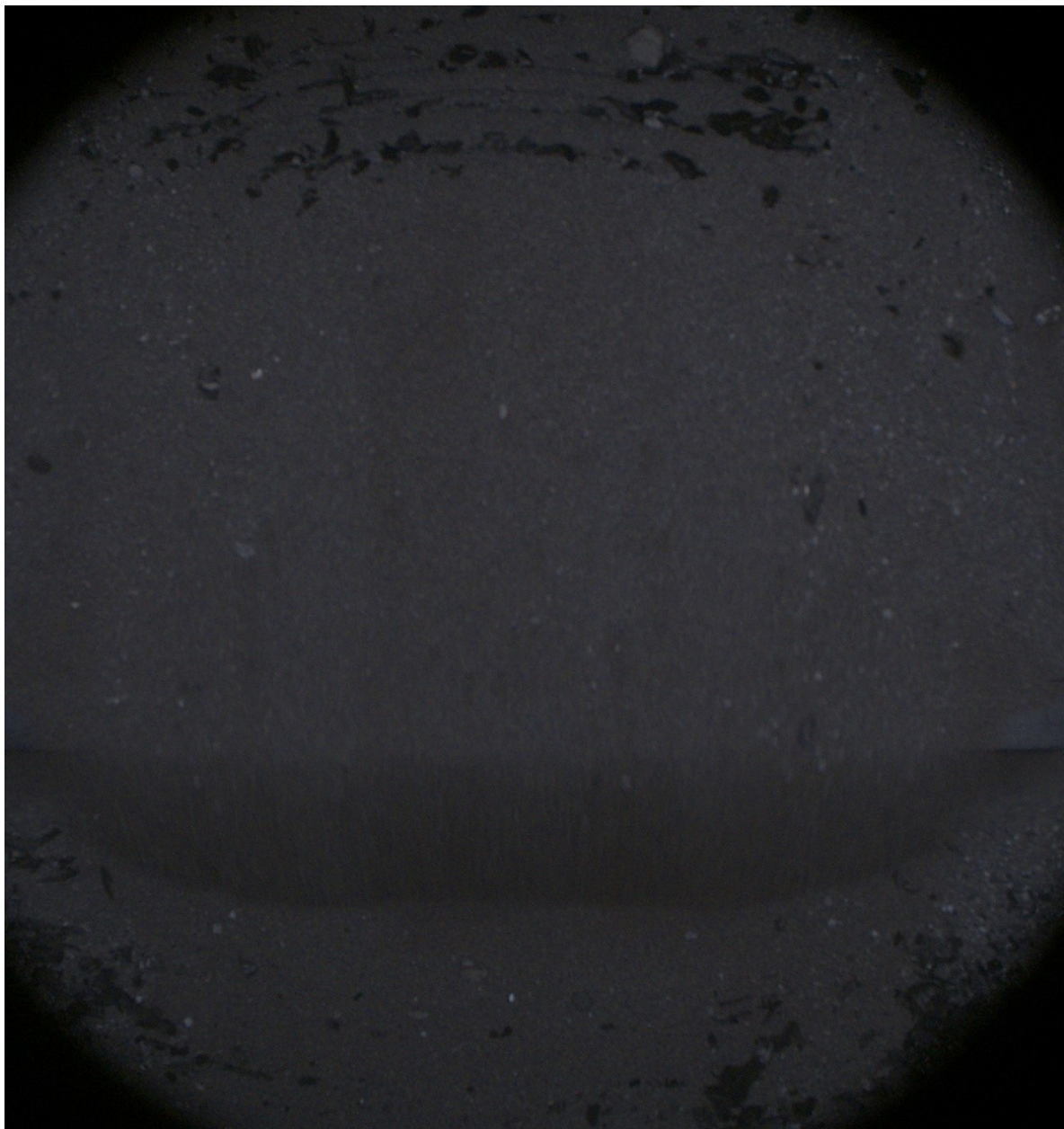
Kuva 22. Näyte 4 analysoitu (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)



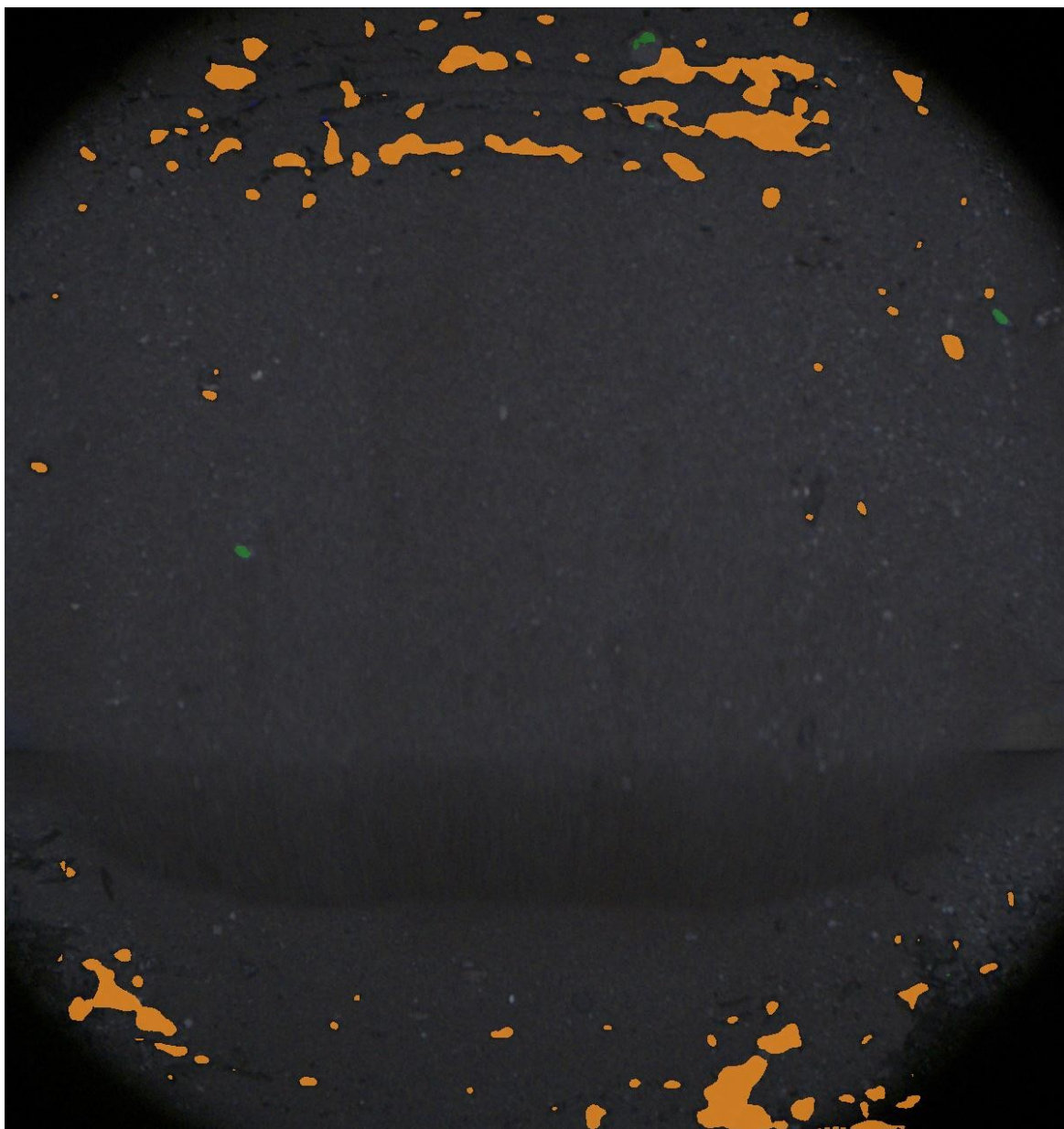
Kuva 23. Näyte 4 Photoboiler-algoritmien tulkinat (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)



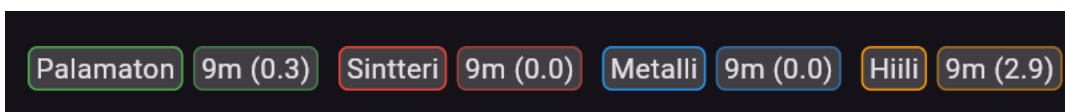
Kuva 24. Näyte 5 (Ratia O. Alva 2025, CC BY-SA)



Kuva 25. Näyte 5 peruskuva (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)



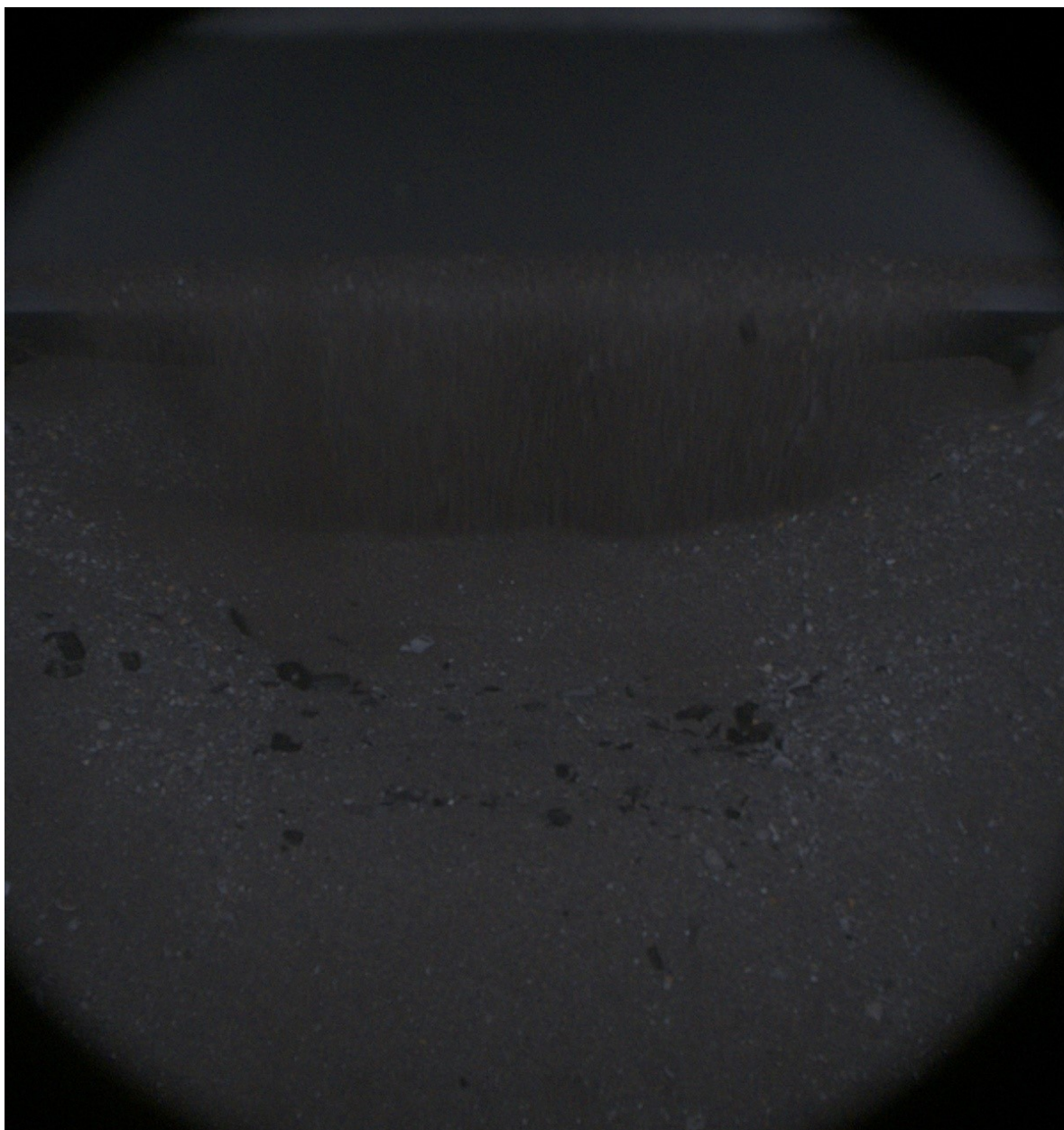
Kuva 26. Näyte 5 analysoitu (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)



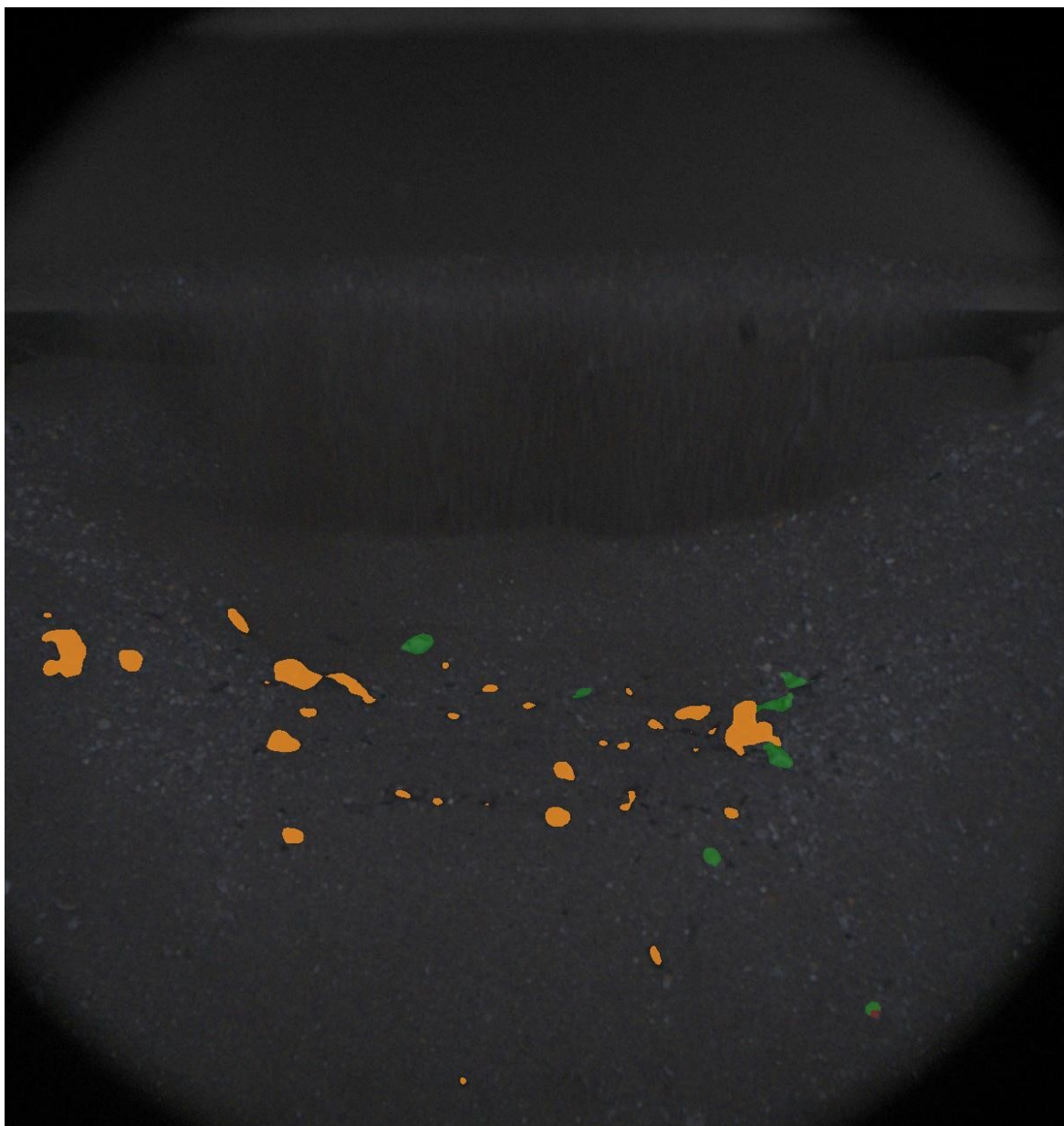
Kuva 27. Näyte 5 Photoboiler-algoritmien tulkinat (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)



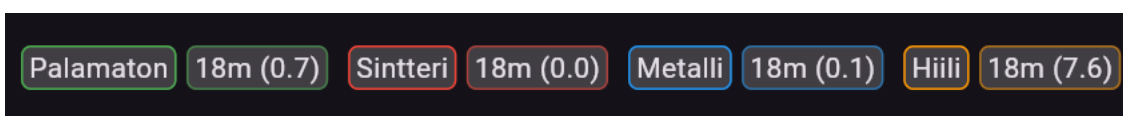
Kuva 28. Näyte 6 (Ratia O. Alva 2025, CC BY-SA)



Kuva 29. Näyte 6 peruskuva (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)



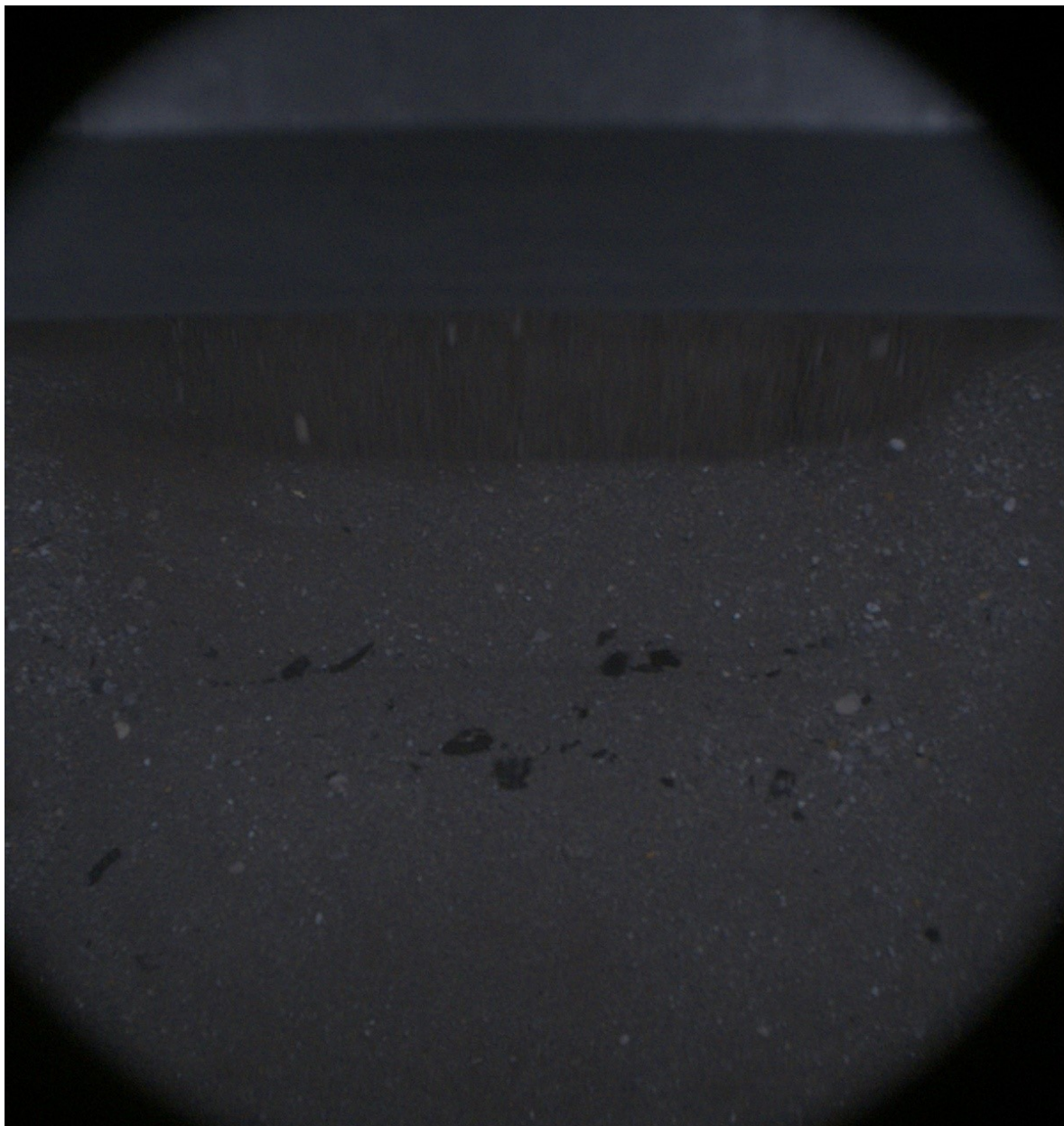
Kuva 30. Näyte 6 analysoitu (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)



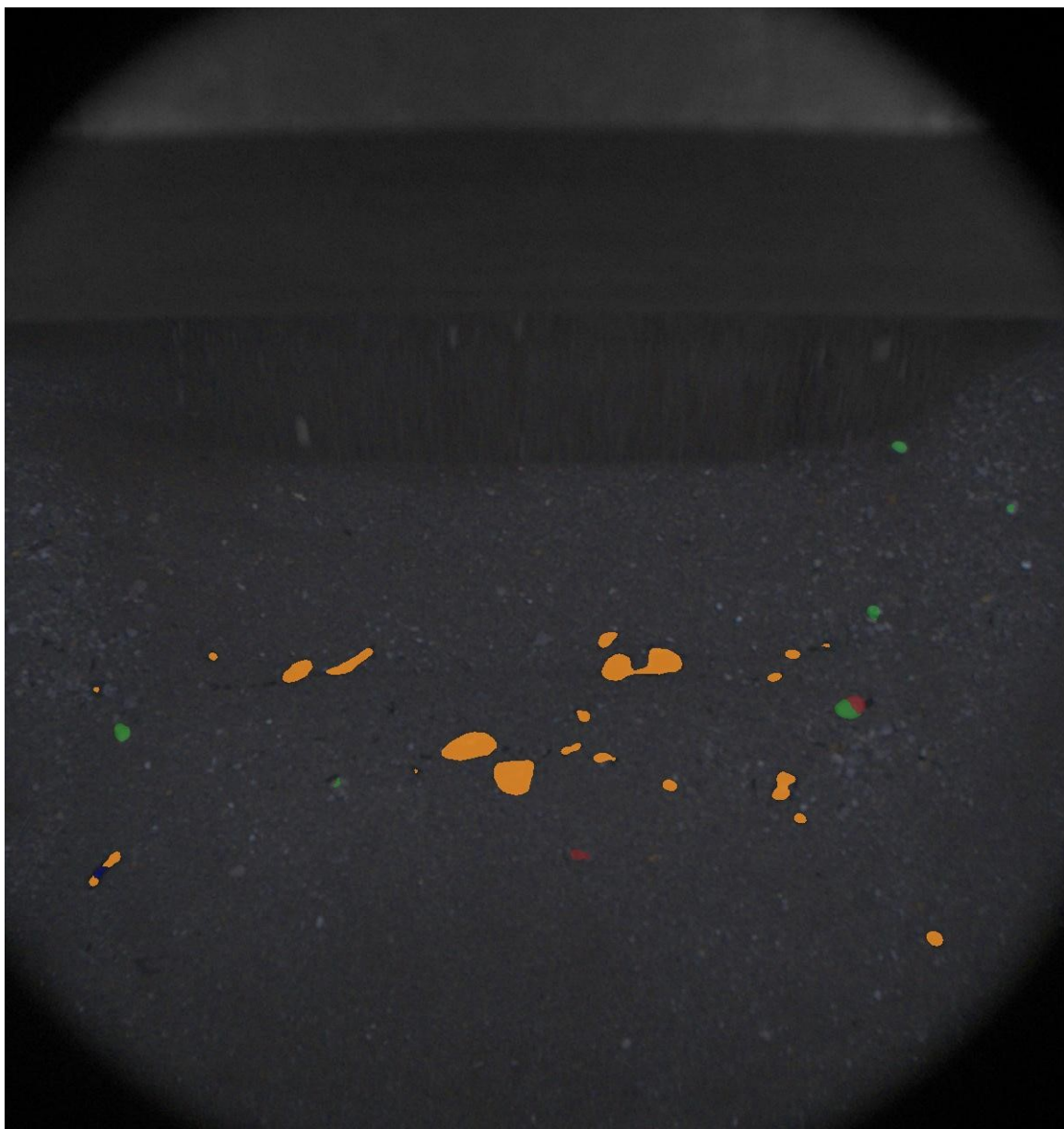
Kuva 31. Näyte 6 Photoboiler-algoritmien tulkinat (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)



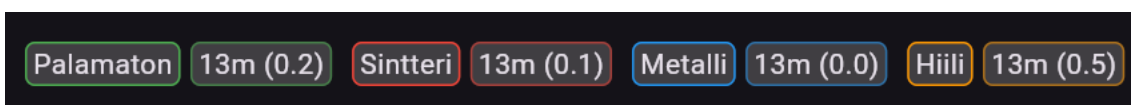
Kuva 32. Näyte 7 (Ratia O. Alva 2025, CC BY-SA)



Kuva 33. Näyte 7 peruskuva (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)



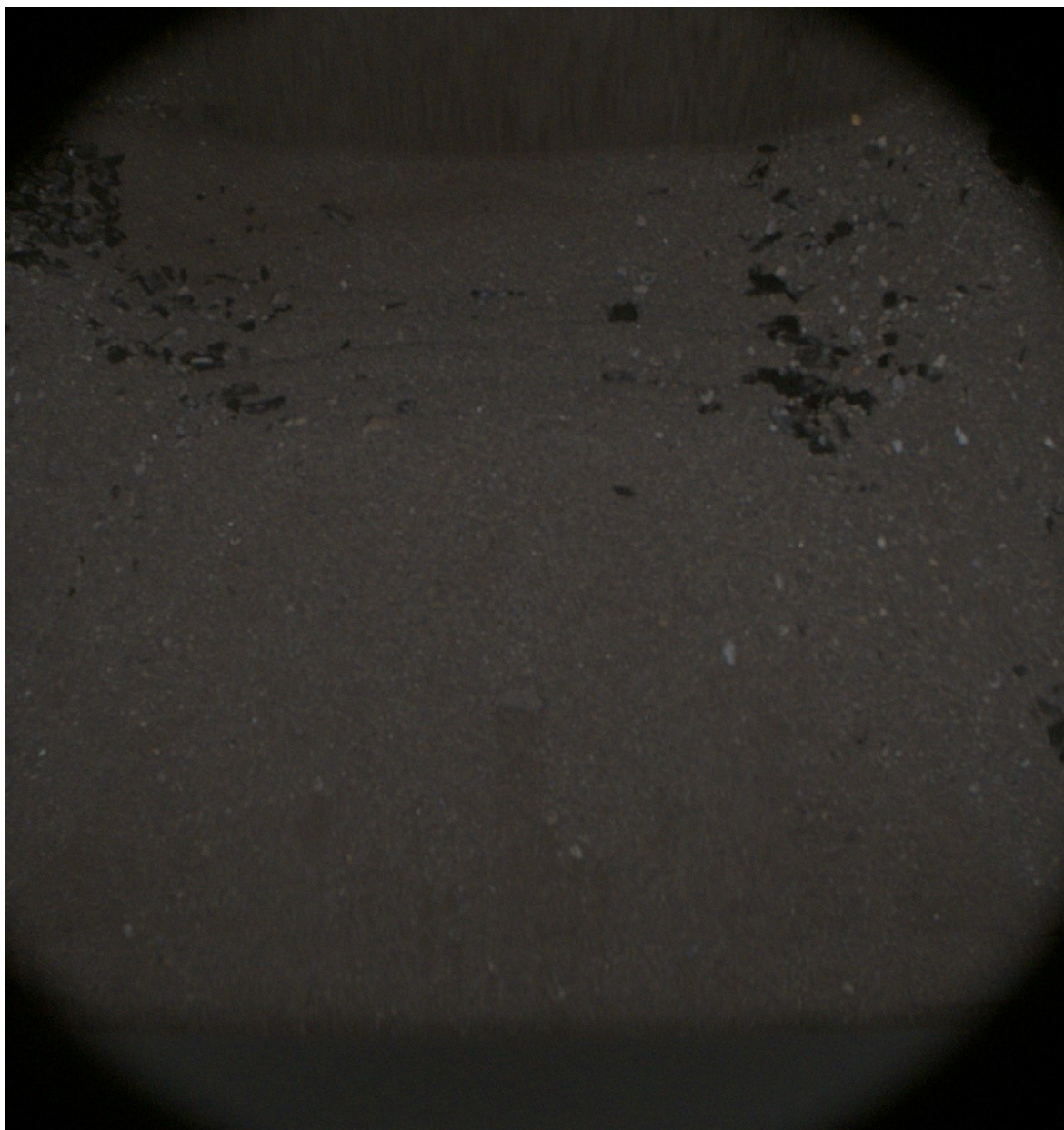
Kuva 34. Näyte 7 analysoitu (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)



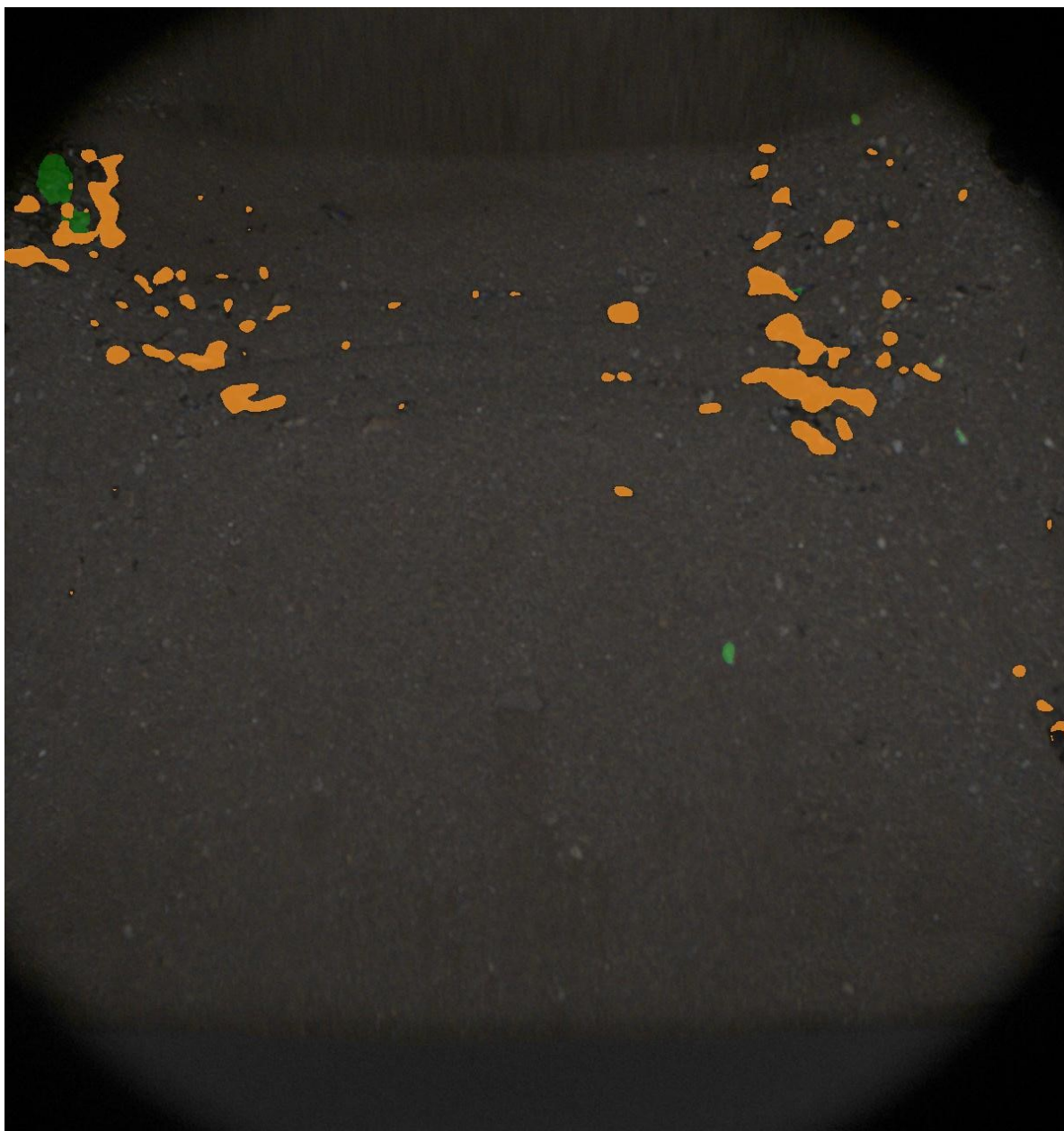
Kuva 35. Näyte 7 Photoboiler-algoritmien tulkinat (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)



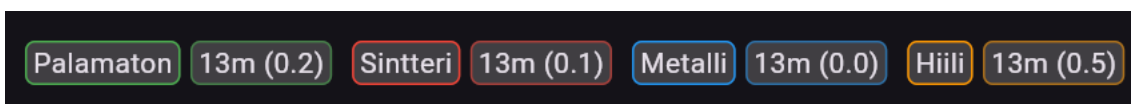
Kuva 36. Näyte 8 (Ratia O. Alva 2025, CC BY-SA)



Kuva 37. Näyte 8 peruskuva (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)



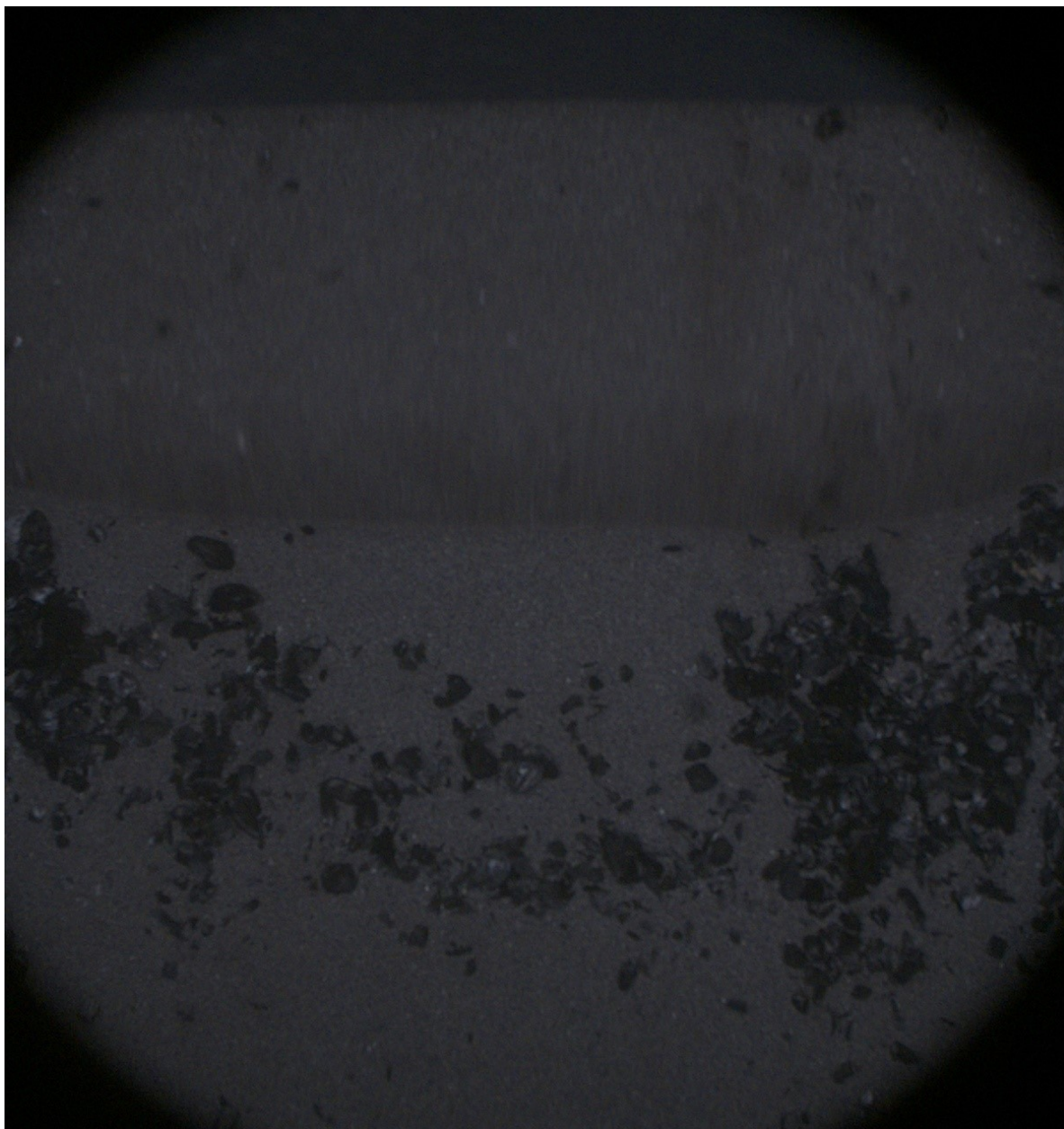
Kuva 38. Näyte 8 analysoitu (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)



Kuva 39. Näyte 8 Photoboiler-algoritmien tulkinnot (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)



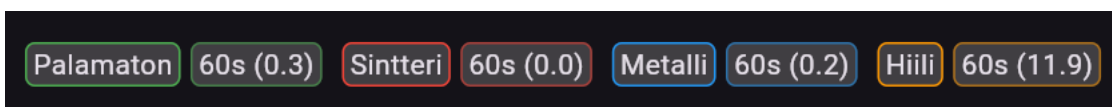
Kuva 40. Näyte 9 (Ratia O. Alva 2025, CC BY-SA)



Kuva 41. Näyte 9 peruskuva (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)



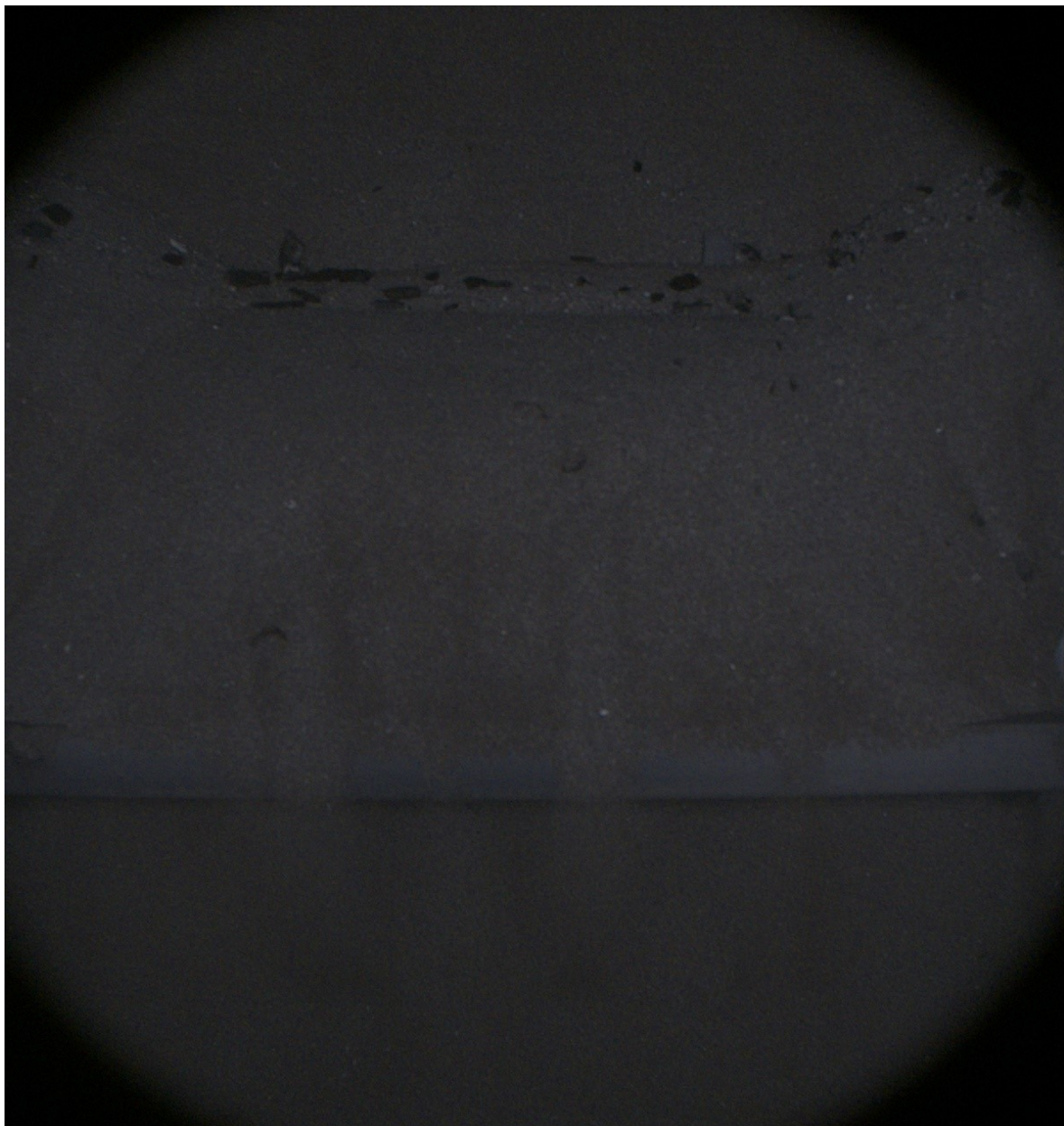
Kuva 42. Näyte 9 analysoitu (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)



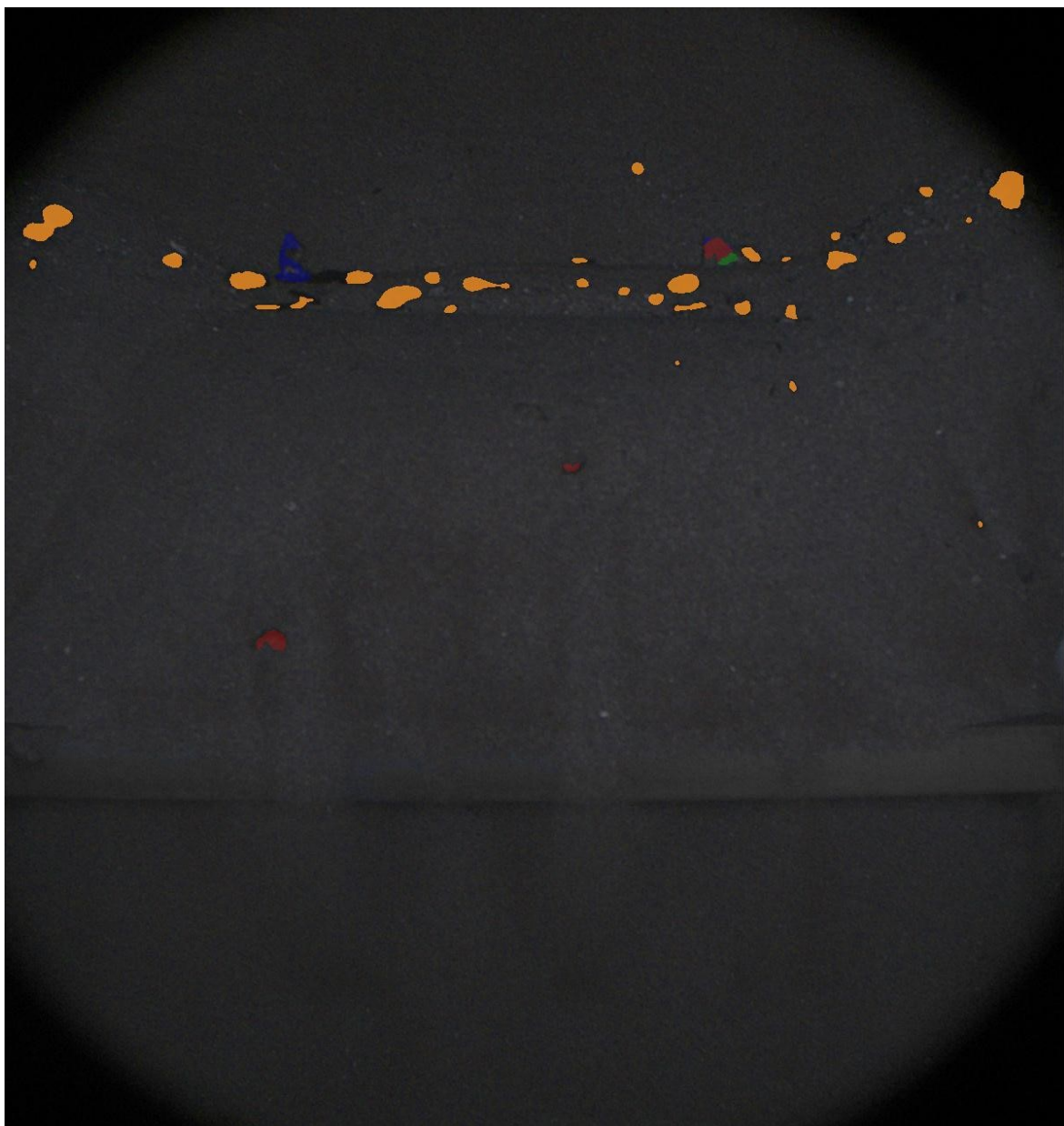
Kuva 43. Näyte 9 Photoboiler-algoritmien tulkinat (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)



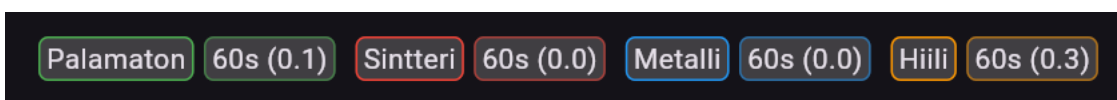
Kuva 44. Näyte 10 (Ratia O. Alva 2025, CC BY-SA)



Kuva 45. Näyte 10 peruskuva (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)



Kuva 46. Näyte 10 analysoitu (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)



Kuva 47. Näyte 10 Photoboiler-algoritmien tulkinat (Ratia O. Photoboiler, Alva 2025, CC BY-SA)