



Elinkeino-, liikenne- ja
ympäristökeskus



**Euroopan unionin
osarahoittama**

KIELO - Kiertotalousloikka rakennusmateriaalien uudelleenkäytön parantamiseksi Mikkelissä

KUULUMISIA JA TULEVAA BIO- JA KIERTOTALOUESTA

Ympäristöturvallisuuden ja vesiteknologian tutkimusryhmän webinaari 8.4.2025

Projektitutkija Henri Kettunen, Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu

Purkutyömaan kuvaaminen droonilla

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu
South-Eastern Finland University of Applied Sciences

www.xamk.fi



Miksi kuvata purkutyömaata droonilla?

Ilmakuvaus droonilla on helposti käyttöönotettava dokumentointimenetelmä

- Työmaan tilanteen valvonta ja raportointi sidosryhmille visuaalisesti
- Työturvallisuus voi parantua aineistoista tehdyillä huomioilla
- Työjärjestyksen ja logistiikan suunnittelu

Kiertotalousvaatimukset tiukentuvat tulevaisuudessa

- Purkumateriaalien kierrätystarve kasvaa
- Tieto purkumateriaalien määristä on saatava nopeasti
- Dronilla mahdollista arvioida materiaalien tilavuus ja massa jo purkutyön aikana fotogrammetriaa hyödyntäen
 - Tulevaisuudessa ei tarvetta kuljettaa purkumateriaaleja punnittavaksi
 - Purkamisen hiilijalanjälki pienenee



Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu

Drooneja koskeva lainsäädäntö lyhyesti

Avoin toimintakategoria vs. erityinen toimintakategoria

Avoin: Lennätys aina näköyhteydessä (VLOS) ja max 120 m korkeudella (aluekohtaiset rajoitukset huomioiden)

Jos droonissa on kamera, on käyttäjän rekisteröidyttävä Traficomien dronetoimijarekisteriin. A1/A3-verkkoteoriakoe pakollinen, jos massa > 250 g.

Lennättäminen ihmisten lähellä: kevyimmät droonit, A1-alakategoria

- Laitteen massa < 900 g, C0- tai C1-merkintä
- $m < 250$ g (C0) → aina mahdollista lennättää ihmisten päällä (EI ihmisjoukko)
- 250–899 g (C1) → vältettävä toimintaa ihmisten yläpuolella
”Voit lennättää yksittäisten ihmisten lähellä, yli lennättämistä tulisi kuitenkin välttää” (Droneinfo 2025).



Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu

Käytetty laitteisto

Drooni: DJI Mini 3 Pro

- Massa < 250 g → A1-alakategoria
- Kamera 12 megapikseliä / 1/1.3" CMOS-kenno
- Lentoaika yhdellä akulla ~34 min
- Max tuulennopeus 10,7 m/s

Lennonsuunnittelu: Dronelink-sovellus

- Fotogrammetrian mahdollistamiseksi

Kauko-ohjain: DJI RC Pro

- Voidaan asentaa 3. osapuolten sovelluksia!
- Näyttö 1080p / 60 fps / 1000 nits
- Käyttöaika ~3 h

→ Hinta yht. ~2000 €



Purkutyömaiden "vapaa" ilmakuvauus



Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu

Fotogrammetria ilmakuvista

Systemaattisesti kuvaamalla kohteesta voidaan mallintaa erilaisia mittatarkkoja aineistoja

- 2D-aineistot: Ortoilmakuva, digitaalinen pintamalli (DSM)
 - Näkymä ylhäältä alas
- 3D-aineistot: Pistepilvi, mesh (teksturoitu 3D-malli)
 - Näkymä voidaan itse valita

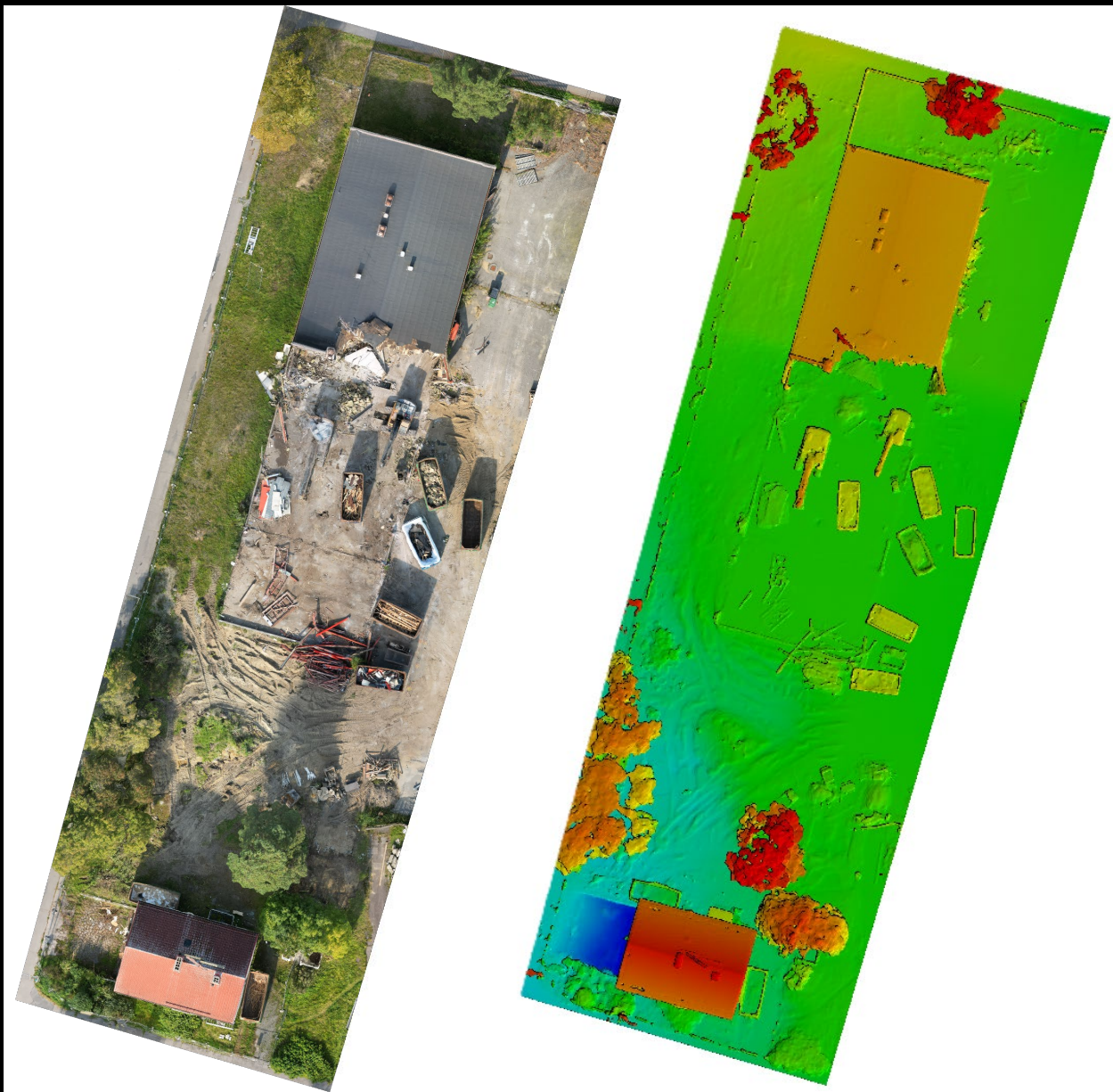
Aineistoista voidaan tehdä erilaisia mittauksia ja käyttää niitä suunnittelun apuna

- Pituudet, pinta-alat, tilavuudet
 - Esim. kattohuopien tai lasi-ikkunoiden pinta-ala, betonikasan tilavuus...
- Työmaa-aitaelementtien määrä ja sijoittelu, logistiikka työmaalla...



Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu

2D-aineistot: ortoilmakuva ja DSM



3D-aineistot: pistepilvi ja mesh



Lennon suunnittelu kuvanhankintaa varten

Perinteisesti double grid-lennätys (DG, skannaus x- ja y-suunnissa)

- Muodostetaan ”ruudukko”, jonka mukaisesti kuljetaan ja kuvataan näkymä asetetuin välimatkoin

Kuvauslennon parametrit:

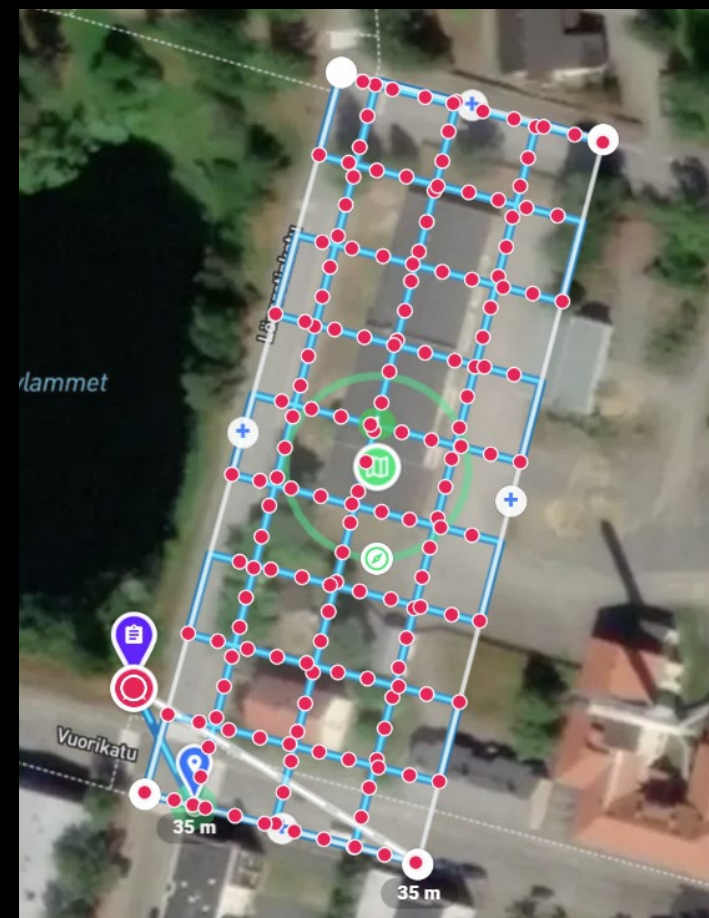
- Overlap/side overlap = kuvien limittäisyys (85 %/75 %)
- Kameran kulma (-65°)
- Korkeus (35–45 m)

Näistä muodostuu GSD-arvo (ground sampling distance)

- Aineistojen resoluutio eli kuvatarkkuus
- Kahden kuvapikselin välinen etäisyys maastossa

Lisäksi huomioitava etenemisnopeus (2,5 m/s)

- Vältetään kuvien heilahdusefekti (motion blur)
- Jos mekaaninen suljin, voidaan edetä nopeammin



Kuvakaappaus Dronelink-sovelluksesta

Vaihtoehto: POI-lennätys (point of interest)

DG-lennätys kestää useita minutteja, riippuen alueen koosta ja käytetystä laitteesta

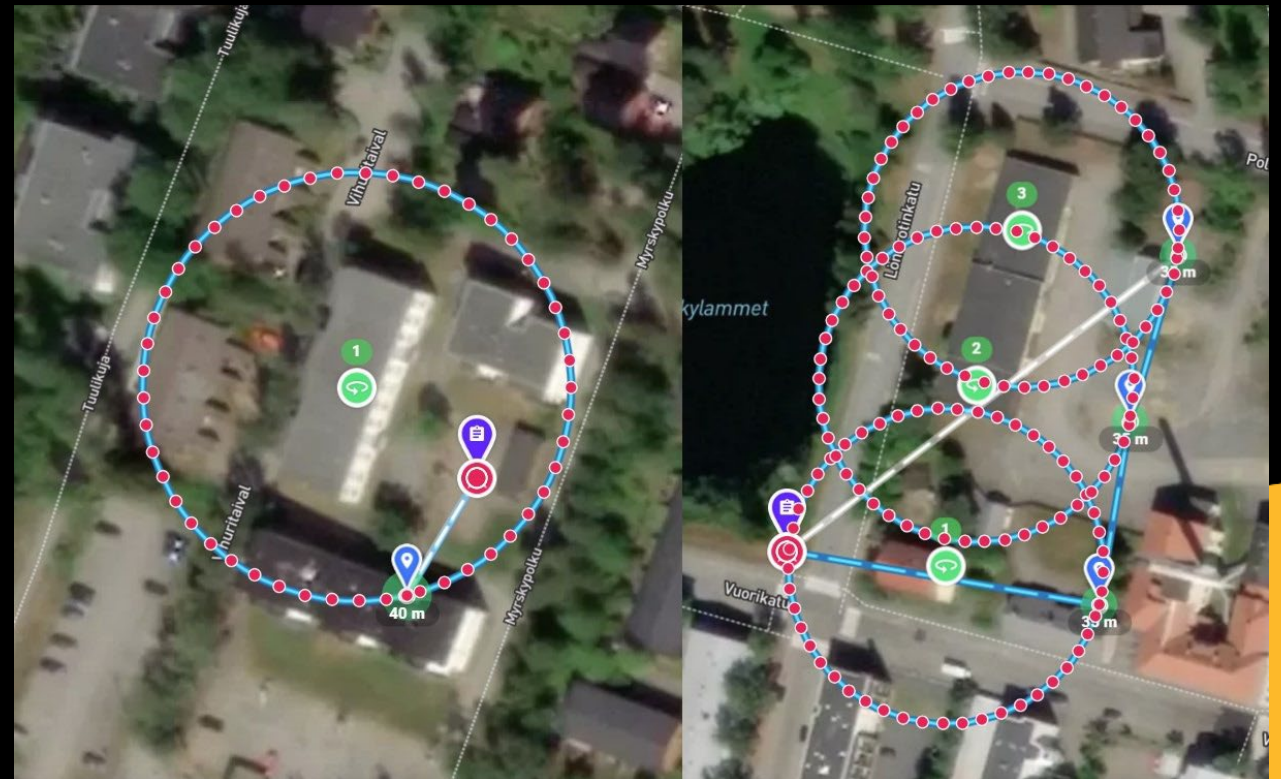
Nopeasti toteutettavaan kuvaukseen voidaan käyttää POI-menetelmää

- Drooni/kamera osoittaa jatkuvasti alueen keskikohtaa ja kiertää sen ympäri

Laajemmalla kohteella voi vaatia useamman POI-ympyrän asettelua

Kuvauslennon parametrit:

- POI-ympyrän säde (40 m)
- Korkeus (35 m...40 m)
- Kameran kulma (-50° ... -55°)
 - Loivempi kuin DG
- Kiertonopeus ($2,5 \text{ m/s} \rightarrow 3,7^{\circ}/\text{s}$)
- Kuvanottoväli (2 s; $7,4^{\circ}$)
 - Noin 50 kuvaa per 360°



Kuvakaappaukset Dronelink-sovelluksesta

Kuvanhankintamenetelmien erot

Vertailtiin kahdella kohteella DG- ja POI-menetelmien käyttöä kuvanhankintaan

	Vihuritaival		ESE-kortteli	
Kuvausmenetelmä	DG	POI (x1)	DG	POI (x3)
Kuvausaika (mm:ss)	7:09	1:38	8:53	5:39
Kuvien määrä (kpl)	102	50	168	153

- POI on huomattavasti DG:tä nopeampi etenkin pienillä kohteilla
- Kerättävien kuvien määrä vähenee jopa puoleen
- Alueen koon kasvaessa sekä kuvaukseen kuluva aika että kuvamäärä lähentyvät DG:n vastaavia
- Molempia keinoja voisi vielä optimoida (overlap-arvoja pienemmiksi)
- POI-kuvat voivat kuitenkin olla pelkkinä kuvina hyödyllisempiä (hyvä yleiskuva alueesta, vrt. vapaakuvaus)

Purkujätelavojen tilavuusmääritykset

Tavoitteena arvioida droonilla kuvatusta aineistosta purkumateriaalin massa lavalla

Tämä on mahdollista määrittämällä lavan tilavuus sen yläpinnasta ja käyttämällä sopivaa irtotiheyskerrointa (lavatiheyskerroin)

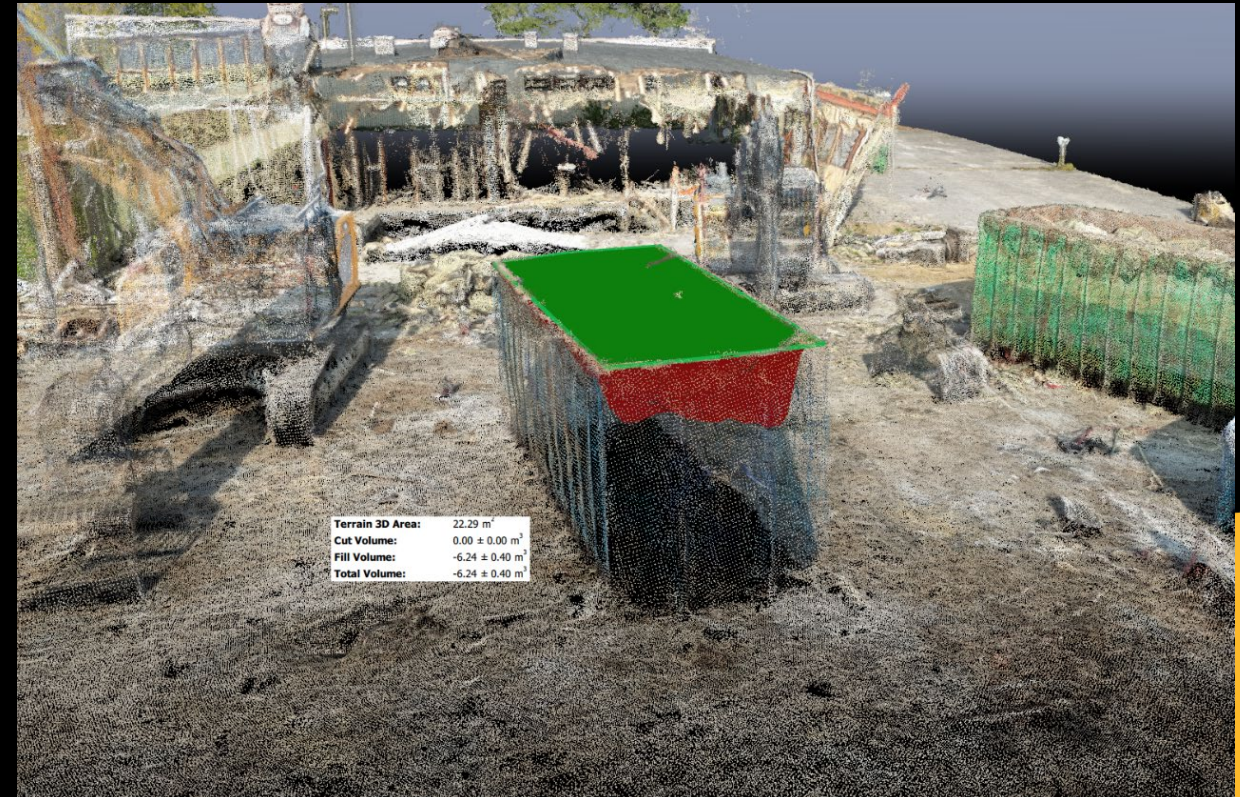
- Tiedettävä tyhjän lavan tilavuus

$$V_{\text{materiaali}} = V_{\text{tyhjä}} + V_{3D}$$

$$m_{\text{materiaali}} = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{irtotiheys}}}{\rho_{\text{materiaali}}} * V_{\text{materiaali}}$$

Hankkeen aikana kuvattiin yhteensä 14 punnittua purkujätelavaa

- 6x purkupuu, 4x sekalainen rakennus- ja purkujäte, 3x metalli, 1x kattuhuopa



Kuvakaappaus PIX4Dmapper-ohjelmasta

Purkujätelavoista kerätyt tiedot

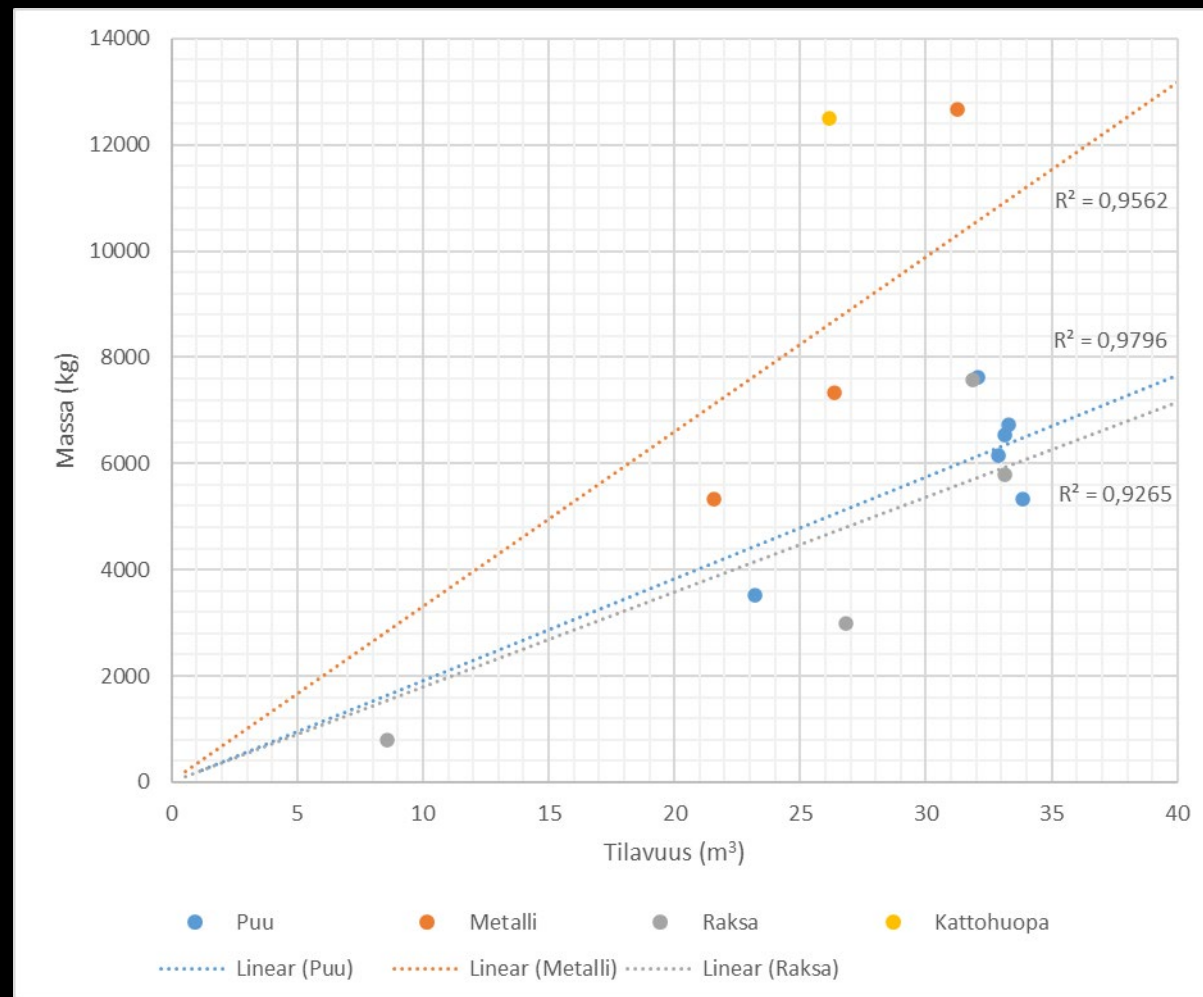
Materiaali	Lavatiheysarvo (kg/m ³)	Keskipoikkeama (± %)
Puu	189	15
Metalli	311	22
Raksa	154	37

Lavan tiivistys kaivurilla aiheuttaa vaihtelua

Hajonta suurta metalleilla ja raksajätteellä

- Metallia = putkia, palkkeja, betoniraudoituksia, peltiä... paljon eri laatuja
- Raksa = sekalaista jätettä alun perin

Dataa tarvitaan enemmän luotettavampien lavatiheysarvojen saavuttamiseksi



Purkujätteiden tunnistaminen ilmakuvista tietokonenäöllä

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu
South-Eastern Finland University of Applied Sciences

www.xamk.fi



Purkumateriaalien tunnistaminen eri sensoreilla

Sensoritasolla purkumateriaalien tunnistamista on tutkittu maailmalla eri menetelmin:

- Multi- ja hyperspektrikamerat, lämpökamerat
 - Aallonpituusriippuvainen reflektanssi → ainekohtainen sormenjälki
- Perinteiset kamerat, RGB-D eli syvyyskamerat
 - RGB-taso/intensiteetti (red, green, blue)
 - HSV-arvot (hue, saturation, value)
 - Näiden liitoshistogrammit ”tunnistuskirjastona”
- Tietokonenäkö edellä mainittuja hyödyntäen
 - Esim. robottikouralla tapahtuva lajittelu liukuhihnalla

Tunnistustulokset olleet hyviä (vrt. asiantuntijan tekemä tunnistus), mutta materiaalit kuvattu läheltä → Miten tunnistus onnistuisi ilmakuvaamalla?

Objektin tunnistusmalli

Hankkeessa testattiin purkumateriaalien tunnistusta ilmakuvaamalla hankituista valokuvista kouluttamalla objektin tunnistusmalli

- Tietokonenäön sovellutus, jossa identifioidaan objekteja ja niiden sijaintia kuvasta

Tunnistusmalli täytyy kouluttaa, jotta tunnistaminen on mahdollista

- Riittävä määrä kuvia tunnistettavasta asiasta
 - Eri kuvakulmista, eri taustaa vasten
- Tarkasteltavat objektit täytyy merkitä ja nimetä (luokitella)

Valmiille mallille syötetään kuva → Malli palauttaa tiedot:

- Mitkä nimetyt asiat kuvassa on havaittu
- Missä ne sijaitsevat
- Mikä on tunnistusten luottamusarvo (0...1)



Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu

Roboflow-sovellus purkumateriaalien tunnistuksessa

Ilmainen internet-selaimella toimiva tietokonenäköpohjainen sovellus, jolle voidaan syöttää valokuvia (datasettejä) ja kouluttaa tunnistusmalli niihin pohjautuen

Kouluttaminen = kuvien annotointi

- Aineistona KIELO-hankkeen ja aiempien hankkeiden ilmakuvia purkutyömailta
- Objektien eli lavojen merkintä, luokittelu jätelajien mukaisesti
- Rajattiin huomioimaan vain lavoille kerätyt purkumateriaalit
- Ei lumipeitteisiä tai muuten epävarmoja materiaaleja
- Yli- ja aliedustavuus: Kuvissa on eräitä materiaaleja huomattavasti enemmän/vähemmän kuin toisia

→ Malli voi suosia päätelmissään enemmän nähtyjä materiaaleja, kun taas vähemmän nähtyjen tapauksessa se epäröi päätelmän luotettavuutta



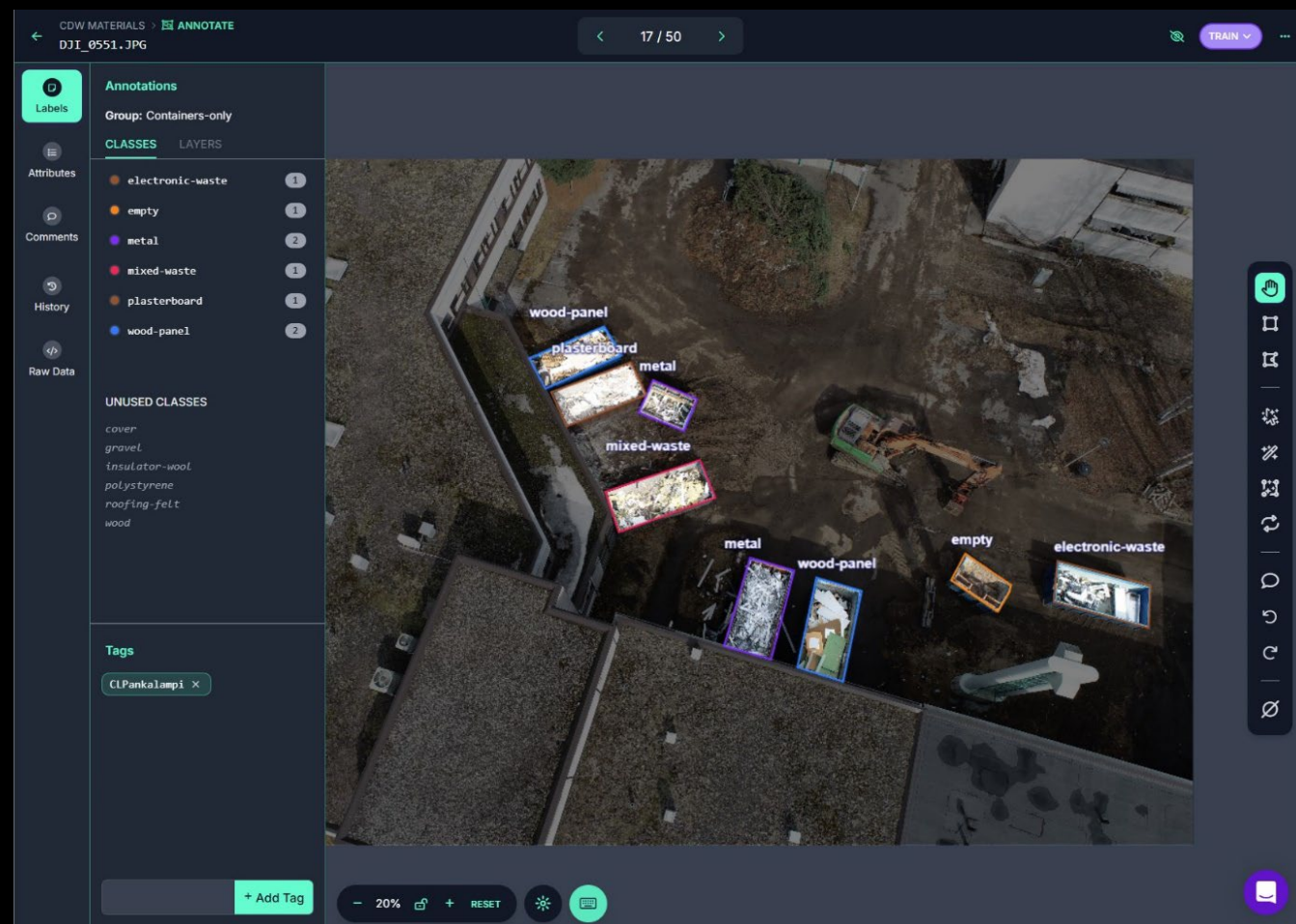
Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu

Kuva-aineisto

Annotointiin yhteensä noin 2200 valokuvaa, joissa taulukon mukainen määrä purkumateriaaleja

Yhdessä kuvassa yleensä useita lavoja

Materiaali	Lukumäärä (kpl)	Osuus kuvista (%)
Peitetty/suojattu lava	213	9,7
SER-jäte	76	3,4
Tyhjä lava	1 147	52,0
Sora/kiviaines	3	0,1
Eristevilla	395	17,9
Metalli	1 333	60,5
Sekalainen jäte	1 132	51,4
Kipsilevy	192	8,7
Styroksi	371	16,8
Bitumikattohuopa	244	11,1
Purkupuu (lautatavara)	1 778	80,7
Muu puuaines	534	24,2



Kuvakaappaus Roboflow:sta

Tunnistusmallin koulutus

Annotointien jälkeen kuva-aineisto jaetaan osa-aineistoihin

- Koulutusaineisto 70 % // validointiaineisto 20 % // testiaineisto 10 %
 - Koulutus: Varsinainen mallin koulutus, säädetään sisäiset painoarvot
 - Validointi: Mallin suorituskvyn seuranta koulutuksen aikana, "hienosäätö"
 - Testi: Koulutuksen jälkeinen testaus (ei käytetä koulutuksessa)

Roboflow:ssa mahdollisuus augmentoida aineistoa ennen varsinaista koulutusta

- Tehdään kuviin pieniä satunnaisia muutoksia, esim. säädetään kirkkautta/saturaatiota/kontrastia, peilataan kuvia x- tai y-suunnassa, muutetaan kuvasuhteita... → Annotoinnit pysyvät kuitenkin paikoillaan
- Parantaa mahdollisesti mallin yleistämiskykyä
- Tässä tapauksessa luotiin vain peilikuvia originaaleista → +1200 kuvaa

Lopullinen aineistojakauma: koulutus 80 % // validointi 13 % // testi 7 %

Varsinainen koulutus Roboflow 3.0 Object Detection Accurate -arkkitehtuurilla

Mallin suorituskykyarvot

Valmiin mallin suorituskykyarvot Roboflow:n ilmoittamana:

- Herkkyys (recall) 97,8 %
 - Tekeekö malli päätelmän silloin kun pitäisi
- Sisäinen tarkkuus (precision) 92,0 %
 - Kuinka usein päätelmä on oikein luokiteltu
- Keskiarvotarkkuus (mAP) 98,5 %
 - Kaikkien luokkien sisäisen tarkkuuden keskiarvo

HUOM. Arvot perustuvat validointiaineistoon
→ Sisältää kuvia samoilta purkukohteilta, joita on käytetty koulutusaineistossa



Kuvakaappaus Roboflow:sta (validointikuva)

Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu

Sekaannusmatriisi

Perustuu testiaineistoon (malli ei ole nähnyt kuvia koulutuksessa missään vaiheessa):

Oikeat päätelmät 94,5 %

Ylimääräiset päätelmät (huti, FP) 3,3 %

Ei päätelmää silloin kun pitäisi (FN) 0,6 %

Suhteessa eniten väärää kipsilevyjen tapauksessa (8 % / 3 kpl)

→ Ehdotti metallia tai sekalaista jätettä

Lähes kaikista luokista huteja, etenkin tyhjiä lavoista

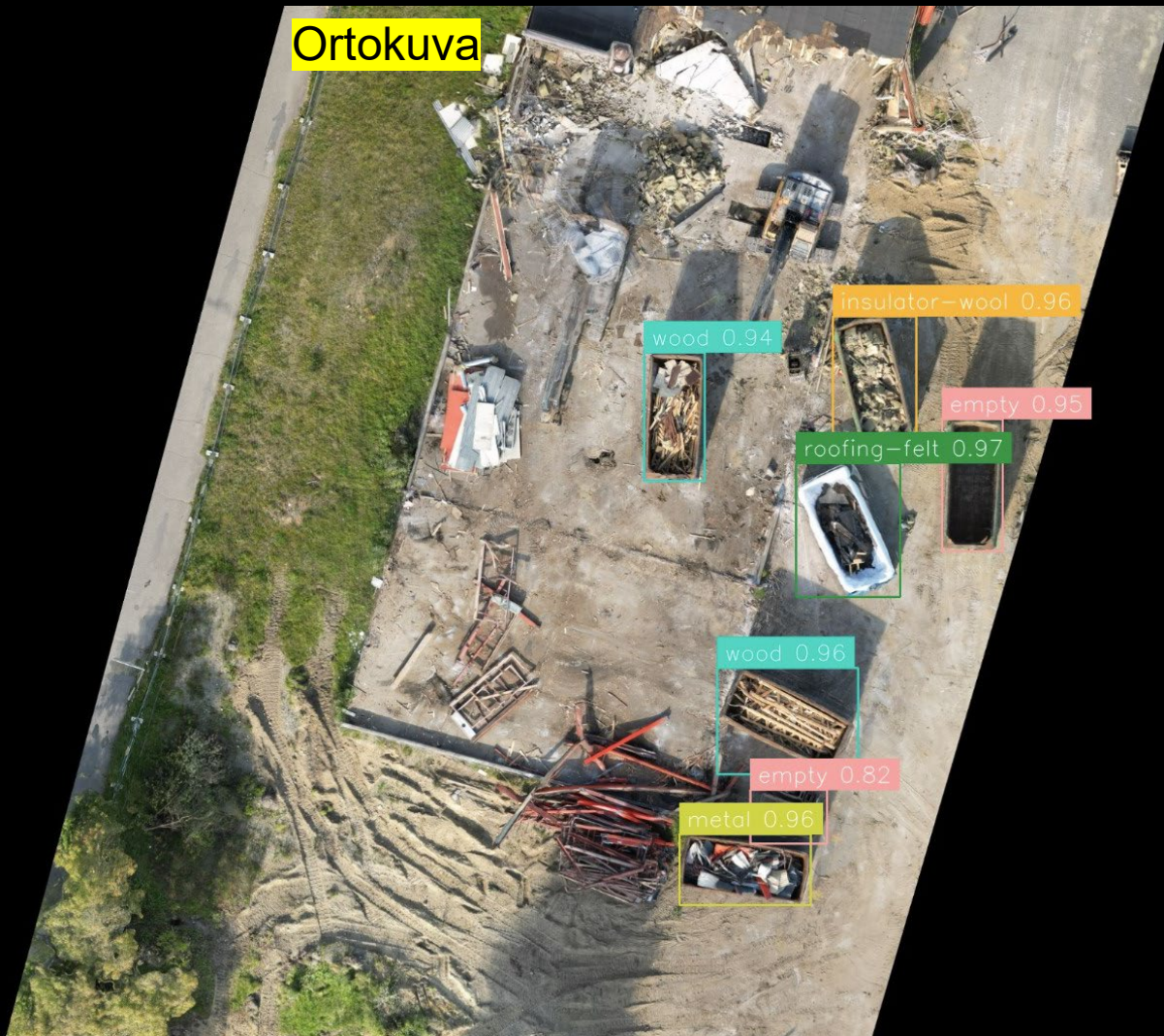
- Helppo kuitenkin havaita vääräksi

		Mallin ennuste												
		Suojapeite	SER-jäte	Tyhjä lava	Sora/kiviaines	Eristevilla	Metalli	Sekalainen jäte	Kipsilevy	Styrox	Kattohuovat	Puu/lautatavara	Puu/muut	False neg.
Todellinen merkintä	Suojapeite	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	SER-jäte	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Tyhjä lava	0	0	106	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1
	Sora/ kiviaines	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Eristevilla	0	0	0	0	32	0	0	0	0	0	0	0	0
	Metalli	0	0	0	0	0	115	0	0	0	0	0	0	0
	Sekalainen jäte	0	0	0	0	0	1	125	0	1	0	1	0	2
	Kipsilevy	0	0	0	0	0	1	1	23	0	0	0	0	0
	Styrox	0	0	0	0	0	0	0	0	40	0	0	0	1
	Kattohuovat	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26	1	0	0
	Puu/ lautatavara	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	186	2	1
	Puu/muut	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	54	0
False pos.		1	1	10	0	1	2	2	0	2	1	5	1	

Todellinen merkintä

Mallin testaus

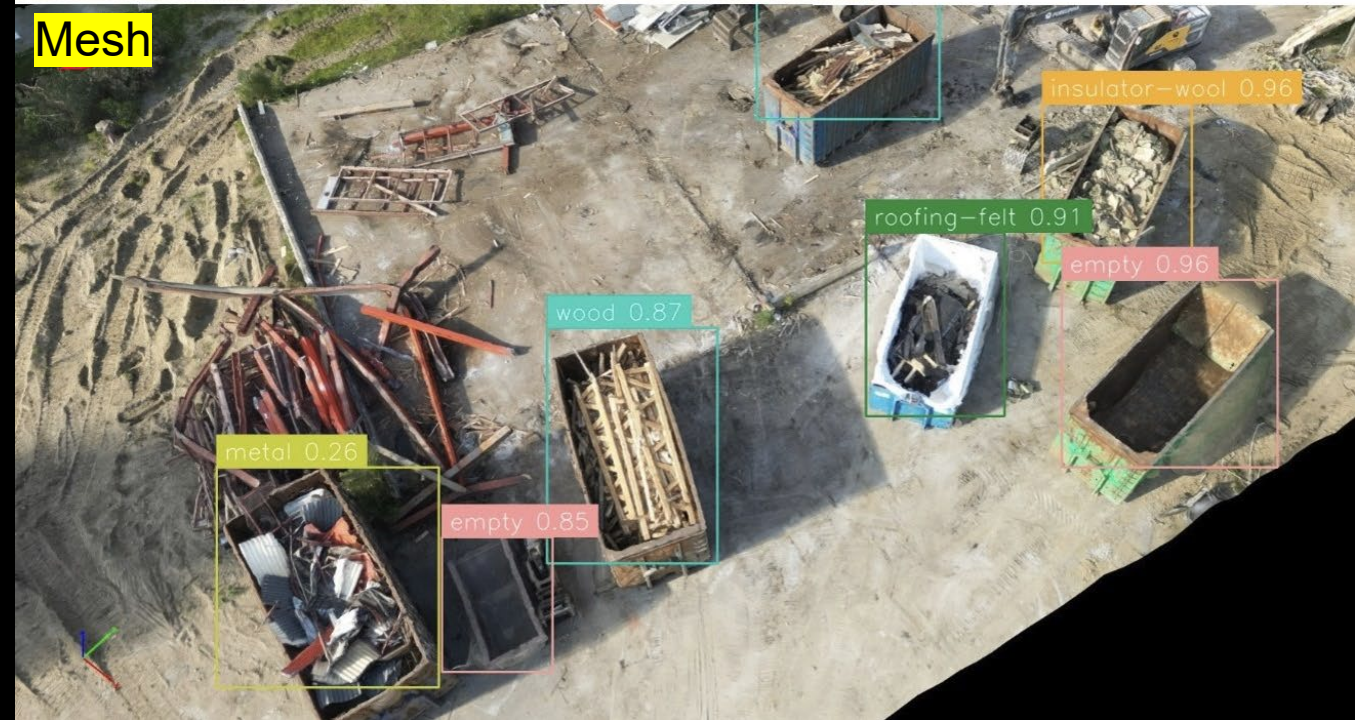
Ortokuva



Pistepilvi



Mesh



Havainnot valokuvilla testauksesta

Kuvan täytyy olla sopivalta etäisyydeltä otettu (vastaa koulutusaineistoa)

- 35–50 m korkeudelta kuvattu

Läheltä vaakatasoa otetut kuvat eivät toimi, vaikka materiaali näkyisi lavan yli

Ylitäytettyjen lavojen tunnistaminen on epävarmaa → Lavan reunat peittyvät?

Tunnistuksen epävarmuuteen saattaa vaikuttaa mm. valaistus ja varjot lavan päällä

Yleistäen: usein itse lavat tunnistetaan, mutta materiaalipäätelmä voi olla väärä



Kuva: Kimmo Iso-Tuisku, käsitelty Roboflow-mallilla

Jatkokehityksen pohdintaa

Purkumateriaalien tunnistaminen ilmakuvista objektin tunnistusmallilla on mahdollista

Mallin jatkokoulutus yhä suuremmalla määrällä eri materiaaleja, eri kohteilta

- Jakeiden luokittelu/nimeäminen jätelainsäädännön mukaisesti
- Myös talvella hankitut kuvat
- Eri materiaalien tasapuolinen edustavuus on haaste työmaaympäristössä

Valmiin mallin hyödyntäminen suoraan droonin kameranäkymästä

- Reaaliaikainen tunnistus purkutyömaan yli lennettäessä

Pidemmän aikavälin visio: Droonipesän yhdistäminen purkutoimintaan

- Automatisoitu lento-/kuvaustoiminta ja materiaalien luokittelu/mittaus
 - Raportti havaituista materiaalmääristä lennon jälkeen
- Vaatii lainsäädännön puolelta vielä paljon selvittelyä

Malli testattavissa vapaasti: <https://universe.roboflow.com/xamk-ymptki/cdw-materials>



Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu



Tunne huomisen.