

# Fra multispektral billeddannelse til mikroskopisk pigmentanalyse: Naturvidenskabelige metoder i kunstens tjeneste

Mads Svanborg Peters, Newtec Engineering A/S, Jacek Fiutowski og Arkadiusz Goszczak, Mads Clausen Institutet, NanoSYD, Syddansk Universitet

Multispektral billeddannelse kombineret med mikroskopiske og kemiske analyseteknikker giver en unik indsigt i kunstværkers opbygning og skjulte detaljer. Med et specialudviklet kamerasystem, der dækker 400–1700 nm, samt scanningelektronmikroskopi med energidispersiv røntgenspektroskopi (SEM-EDX) og Raman-spektroskopi, undersøges tre værker af Vilhelm Lundstrøm (1893–1950) fra Kunstmuseum Brandts. Analysen afslører underliggende geometrier, pigmentlag og grundstofsammensætning gennem en kombination af billeddannelse og punktbase-rede målinger. Den tværfaglige tilgang demonstrerer potentialet i at integrere ikke-destruktive og mikrodestruktive teknikker i kunsthistorisk forskning og konservering. Undersøgelserne er udført som en del af Interreg-projektet *Technological Enlightenment to Preserve and Explore Regional Cultural Heritage* (TORCH).

I et almindeligt kamera opfanges farveinformationen ved hjælp af et såkaldt Bayer-filter, der er placeret oven på billedsensoren. Dette filter består af røde (R), grønne (G) og blå (B) felter, som muliggør optagelse af et RGB-billede. Hver pixel indeholder tre farveværdier, der afspejler lyset fra det observerede objekt.

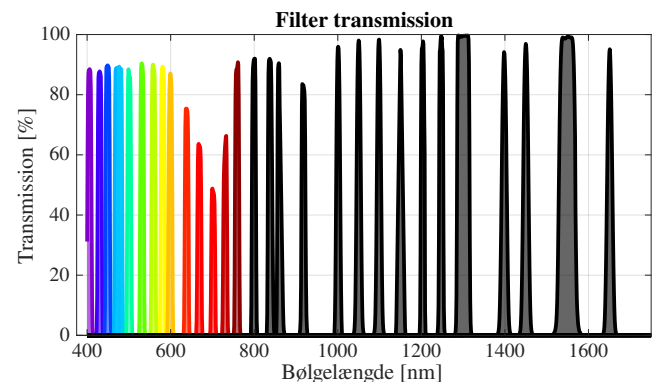
Spektral billeddannelse udvider dette princip ved at registrere lys i mange flere bånd—ofte både i det synlige og usynlige spektrum. I denne artikel anvendes et multispektralt system bestående af et filterhjul med 30 båndpasfiltre, som dækker bølgelængder fra 405 nm til 1650 nm, og et kamera med en Sony SenSWIR IMX990 billedsensor, der er følsom i området 400–1700 nm (figur 1).



**Figur 1.** 3D-rendering af det multispektrale system bestående af filterhjulet med 30 båndpasfiltre og et kamera med en IMX990 billedsensor. Det yderste lag er fjernet, så filtrene kan ses. Et yderligere filter foran hjulet sikrer de ønskede spektrale responser.

Filtrenes transmissionskurver som funktion af bølgelængde er vist i figur 2. Hvert filter har en

båndbredde (full width at half maximum, FWHM) på 10 nm, bortset fra filtrene ved 1300 nm og 1550 nm, som har bredder på henholdsvis 30 nm og 40 nm. For at dække hele spektret fra 400 nm til 1700 nm er det nødvendigt med en særlig billedsensor, da siliciumsensorer kun dækker fra 400 nm til 1000 nm og InGaAs-sensorer fra 900 nm til 1700 nm. Sony IMX990 kombinerer begge teknologier og muliggør dermed kontinuerlig følsomhed over hele området.



**Figur 2.** Transmission af de 30 optiske båndpasfiltre i filterhjulet som funktion af bølgelængde. Filtrene dækker området fra 405 nm til 1650 nm og er farvet efter deres respektive bølgelængder. Ikke-synlige bølgelængder (>750 nm) er vist i sort.

Det multispektrale system genererer en såkaldt spektral datakub, hvor hver pixel indeholder information om, hvordan det afbildede punkt reflekterer lys ved de forskellige bølgelængder. Datakuben kan opfattes som et 3D-billede med to rumlige dimensioner ( $x$ ,  $y$ ) og én spektral ( $\lambda$ ). Ved at analysere spektralkurverne fra forskellige områder kan man identificere pigmentforskelle, skjulte skitser og lagdeling.

Metoden er ikke-destruktiv, da den registrerer reflekteret lys, hvilket gør den ideel til analyser af kunstværker uden fysisk prøvetagning. Især det nærinfrarøde område (>700 nm) er værdifuldt, da mange pigmenter bliver gennemsigtige, hvilket gør underliggende lag synlige [1]. Dog kræver tolkningen forsigtighed, da

pigmenter ofte optræder som blandinger og sjældent i ren form.

For at opnå en mere komplet forståelse af værkernes materialer og opbygning blev de multispektrale analyser suppleret med mikroskopiske og kemiske teknikker. Her giver scanningelektronmikroskopi-energidispersiv røntgenspektroskopi (SEM-EDX) mulighed for at kortlægge grundstofindholdet i mikroskopiske farvesnit, mens Raman-spektroskopi kan identificere organiske og uorganiske pigmenter ud fra deres molekylære signatur. Kombinationen af disse metoder gør det muligt både at lokalisere, kvantificere og kemisk bestemme pigmenterne – og derved koble de store linjer fra multispektral billeddannelse med den detaljerede viden fra punktmålinger.

### Vilhelm Lundstrøms skjulte undertegninger

Den danske modernist Vilhelm Lundstrøm (1893–1950) er kendt for sine enkle og stringente kompositioner, præget af en fri tilgang, hvor objekternes placering ofte er ændret flere gange i løbet af maleprocessen. Men multispektrale analyser af to af hans værker, *Opstilling med kander* (1931) og *Modelbillede* (1928), afslører en overraskende systematik i det skjulte. Farvebilleder af de to værker er vist i figur 3.



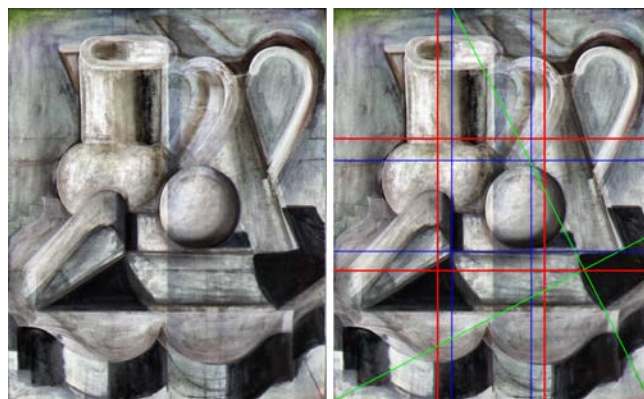
**Figur 3.** Fotografier af Vilhelm Lundstrøms malerier *Opstilling med kander* (venstre) og *Modelbillede* (højre). Fotografierne er fra Kunstmuseum Brandts.

De to værker blev optaget med det multispektrale system hos Konserveringscenter Vejle, hvor de var opmagasineret, og de skjulte detaljer trådte hurtigt frem i analysen af de spektrale datakuber. Allerede ved at kombinere spektralbåndene ved 1200 nm, 1300 nm og 1550 nm til et falsk farvebillede, blev tidligere usynlige skitsetræk og hjælpelinjer synlige. Figur 4 viser til venstre det falske farvebillede, hvor tværgående skitsetlinjer fremstår tydeligt. Til højre er disse linjer farvelagt og fremhævet, hvor skjulte dele er rekonstrueret ud fra de synlige segmenter.

De røde linjer følger *tredjedelsreglen*, som inddeler billedfladen i et  $3 \times 3$ -gitter. De blå linjer markerer *det gyldne snit*, en klassisk harmonisk opdeling i forholdet  $1 : 1,618$ .

De vigtigste kompositionselementer er anbragt langs disse linjer og i deres krydsfelter, hvilket skaber en harmonisk og afbalanceret billedopbygning. Eksempelvis følger kanderne de lodrette skitsetlinjer, mens bogens

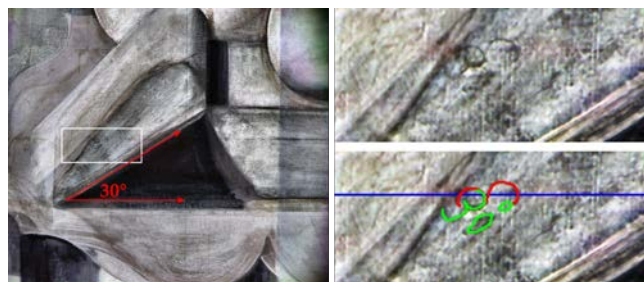
nederste kant ligger langs en vandret linje i det gyldne snit.



**Figur 4.** Falsk farvebillede (kombination af båndpasfiltre ved 1200 nm, 1300 nm og 1550 nm) af *Opstilling med kander*. Skjulte skitser er fremhævet i farve, hvor rød, blå og grøn markerer henholdsvis tredjedelsreglen, det gyldne snit og diagonalen.

Dette er første gang, at undertegninger er blevet dokumenteret i Lundstrøms værker – en opdagelse, der overraskede konservatorerne. Lundstrøms stil forbindes ellers med hyppige ændringer under maleprocessen, hvilket ofte fører til overlappende lag og fremtoning af underliggende figurer – som den ekstra arm i *Modelbillede* (figur 3).

Analyserne viste også tal og vinkelmarkeringer i *Opstilling med kander*, herunder 3-taller placeret på tredjedelslinjerne og en vinkel på præcis  $30^\circ$ , svarende til hældningen mellem bogens ryg og bordet (figur 5). Desuden blev der fundet en kryptisk notation, “5/80 900”, som muligvis henviser til proportioner anvendt under planlægningen.



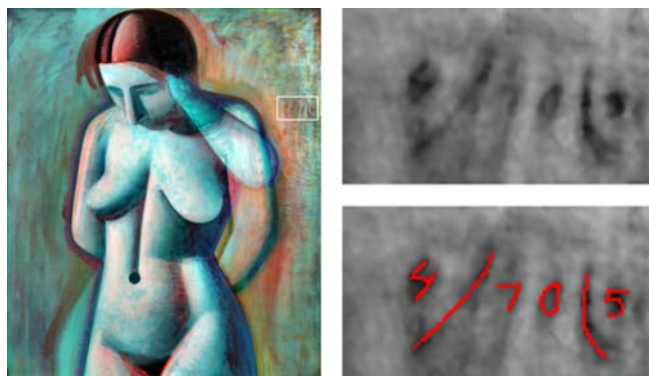
**Figur 5.** Udsnit med tal- og vinkelmarkeringer fremhævet. Bemærk vinklen på  $30^\circ$  (grøn) og 3-tallet (rød) placeret langs tredjedelslinjerne.

I *Modelbillede* blev der ikke fundet skitsetlinjer, men derimod tydelige undertegninger og markeringer. Figur 6 viser et falsk farvebillede (kombination af bånd ved 480 nm, 1200 nm og 1300 nm), hvor kompositionen af kvindekroppen ses at være ændret flere gange — både hoved, arme og underliv er flyttet. I udsnittet markeret med en hvid firkant ses endnu en inskription, “4/70/5”, hvis betydning er uklar, men som vidner om en vis geometrisk planlægning.

### Spektral unmixing: Et sort område, der ikke var sort

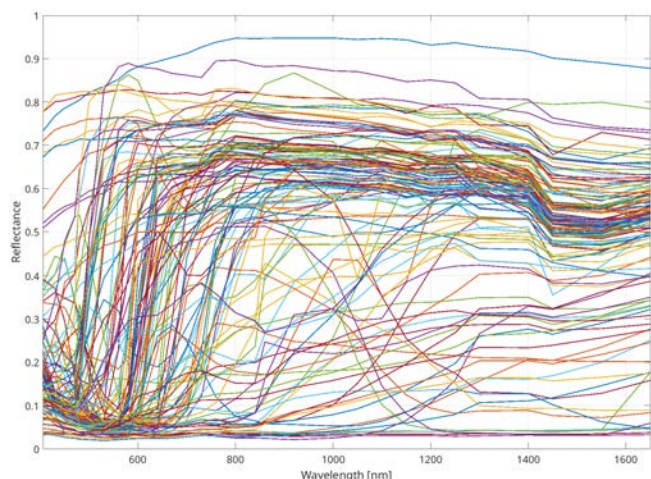
For at undersøge, hvilke pigmenter der er anvendt i *Opstilling med kander*, blev der udført en spektral

unmixing-analyse baseret på multispektrale billeder. Spektral unmixing er en metode, der gør det muligt at identificere, hvilke rene pigmentspektre (kaldet *end-members*) der findes i hver enkelt pixel, samt estimere i hvilke mængder, de optræder [2, 3]. Metoden er særlig nyttig, når pigmenter er blandet eller påført i tynde lag oven på hinanden.



**Figur 6.** Modelbillede. Falsk farvebillede (R: 1300 nm, G: 1200 nm, B: 480 nm) med udsnit omkring en skjult markering, farvelagt og fremhævet i rød.

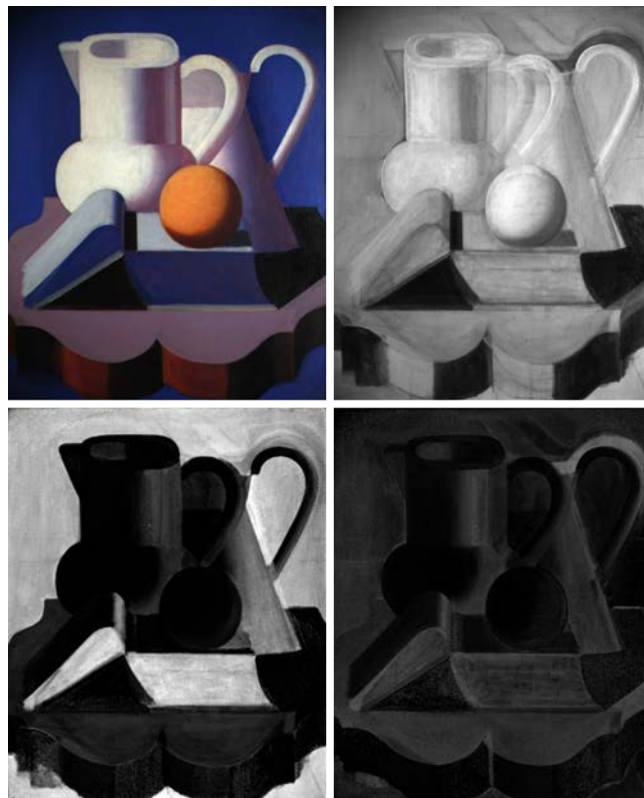
Der findes to typer modeller til unmixing: lineære og ikke-lineære [4]. Den lineære model antager, at det målte spektrum er en vægtet sum af de enkelte pigments spektra. Den virker godt, når pigmenterne er blandet på makroskopisk niveau – f.eks ved siden af hinanden på lærredet. Den ikke-lineære model tager højde for komplekse lysinteraktioner mellem lag og giver ofte bedre resultater, når malingen er påført i flere tynde lag [5]. I denne analyse blev der anvendt en ikke-lineær model med kravet om, at de estimerede mængder af hvert pigment er positive og summerer til én.



**Figur 7.** Reflektans-spektre af de 136 reference-pigmenter fra Pigments Checker v5 og Modern & Contemporary Art målt med det multispektrale system.

Til reference blev der benyttet multispektrale optagelser af Pigments Checker v5 og Pigments Checker Modern & Contemporary Art, som er farvekalibratorer bestående af henholdsvis 70 og 66 kendte pigmenter, anvendt fra oldtiden til moderne tid. Reflektansspektre af de 136 referencepigmenter er afbildet i figur 8. Til selve analysen blev der udvalgt 37 pigmenter, som var i brug og relevante i 1920–1930, da værket blev malet.

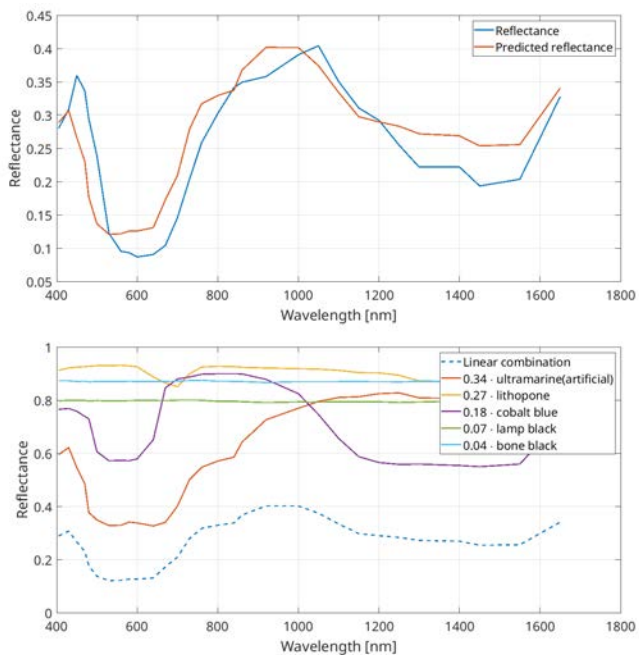
I analysen af *Opstilling med kander* var der flere interessante områder, men området over hanken af den bagerste kande skilte sig markant ud med høj absorption over 1200 nm – selvom området ikke adskiller sig fra baggrunden for det blotte øje. Dette ses i figur 8, hvor der øverst til venstre vises en RGB-visualisering af værket og øverst til højre det infrarøde bånd ved 1550 nm. Den spektrale unmixing resulterer i såkaldte mængde- eller koncentrationskort for hvert pigment i analysen, hvor intensiteten i en given pixel svarer til mængden af pigment. Nederst i figur 8 ses mængdekortene for ultramarin og koboltblå, hvoraf det fremgår, at området over hanken hovedsageligt består af disse to blå pigmenter, og at baggrunden primært består af ultramarin.



**Figur 8.** Sammenstilling af optagelser: (øverst til venstre) RGB, (øverste til højre) infrarødt (1550 nm), (nederst til venstre) mængdekort for ultramarin, og (nederst til højre) mængdekort for koboltblå. Hvide områder angiver høj sandsynlighed for pigmentets tilstedeværelse.

Øverst i figur 9 vises det målte reflektansspektrum (blå) for området over hanken samt kombinationen af de rene pigmentspektre (orange). Nederst ses de rene spektre vægtet med deres koncentration fra unmixing-analysen, samt den kombinerede kurve (stiplet blå), som svarer til det orange spektrum øverst. De estimerede mængder er: 0.34 ultramarin, 0.27 lithoponehvidt, 0.18 koboltblå, 0.07 kønrøg og 0.04 bensort. Koboltblå og ultramarin har overlappende spektrale karakteristika i det synlige spektrum, men adskiller sig i det infrarøde område. Hypotesen blev bekræftet af røntgenfluorescens (XRF)-analyse, som viste tilstedeværelse af kobolt, men ikke tin (som ville indikere cølinblå) i området over hanken. Tilsvarende blev der fundet aluminium, silicium og svovl i områderne med ultramarin. Det tyder på, at Lundstrøm først malede

området med koboltblå og senere overdækkede det med ultramarin, efter at have ændret kompositionen.



**Figur 9.** (Øverst) Middel reflektans-spektrum af området over hanken på den bagerste kande i *Opstilling med kander* samt kombinationen af de rene pigmentspektre fra den spektrale unmixing. (Nederst) Reflektans-spektrum af de rene reference-spektre samt kombinationen af de forskellige pigmenter vægtet med deres mængde/koncentration.

### Farvesnit og mikroskopisk analyse

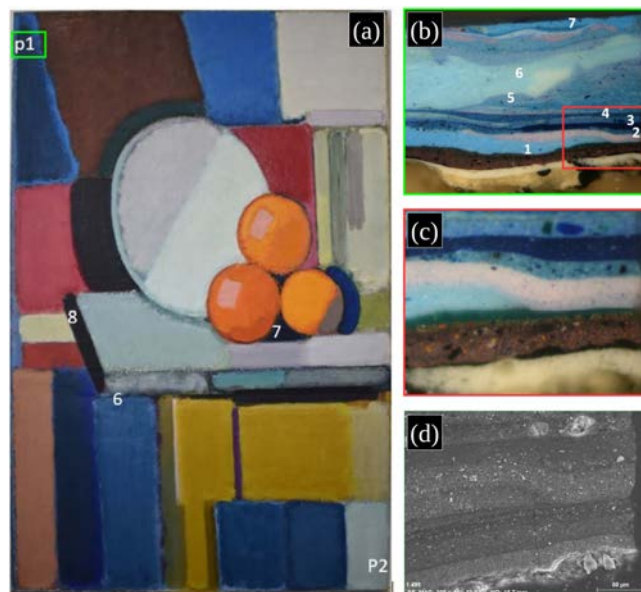
Ud over den multispektrale billeddannelse blev der også anvendt mikroskopiske og kemiske analysemetoder for at opnå en dybere forståelse af farvelagenes opbygning og pigmenternes sammensætning i Lundstrøms værker. Disse analyser omfattede blandt andet SEM-EDX samt Raman-spektroskopi. Metoderne blev anvendt på tværsnit af små farveprøver og bidrager med væsentlig information, der supplerer de ikke-destruktive billedbaserede undersøgelser.

For at undersøge underliggende lag blev der udtaget mikroskopiske prøver, som blev indstøbt og slebet ned til tværsnit. Disse tværsnit blev derefter analyseret med henblik på at identificere pigmenter og lagstrukturer. SEM-EDX og Raman-spektroskopi blev her anvendt som komplementære teknikker.

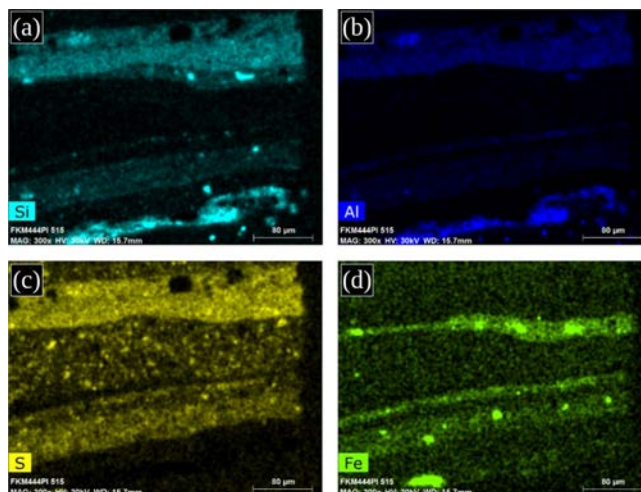
Raman-spektroskopi er en optisk metode, der benytter en fokuseret laser til at fremkalde inelastisk lysspredning (Raman-effekten) i prøvens molekulære bindinger. De målte spektrale frekvensskift er karakteristiske for specifikke pigmenters kemiske strukturer. Metoden er særligt velegnet til identifikation af organiske og visse uorganiske pigmenter, herunder mange blå – dog med undtagelse af koboltblå, som ofte giver svage eller utydelige signaler.

SEM-EDX er en grundstofanalytisk teknik, der tillader både punktmålinger og fuld scanning af hele tværsnittet. Metoden giver detaljerede kortlægninger af grundstofindholdet i de enkelte lag og kan anvendes til pålidelig identifikation af mange uorganiske pigmenter, herunder blå pigmenter. Som det også kendes fra

XRF-analyse, har SEM-EDX dog visse begrænsninger, eksempelvis i detektionen af PB15 (phthalocyaninblå), som derimod er let identificerbar med Raman-spektroskopi selv i lave koncentrationer.



**Figur 10.** (a) Fotografi af Vilhelm Lundstrøms *Nature Morte* (1945) med markering af positionen for farvesnittet. (b) Mikroskopibillede af farvesnittet fra punkt P1, hvor tallene angiver positioner for Raman-målinger. (c) Det samme farvesnit, her vist i det område markeret med et rødt rektangel, hvor de enkelte farvelag fremgår tydeligt. (d) SEM-EDX-billede af området med 300X forstørrelse.



**Figur 11.** SEM-EDX-mængdekort for (a) silicium, (b) aluminium, (c) svovl og (d) jern ved 300X forstørrelse af området vist i figur 10(d) fra *Nature Morte*.

Figur 10(a) viser et fotografi af Lundstrøms *Nature Morte* (1945), hvor der er udtaget et farvesnit i det blå område i øverste venstre hjørne (punkt P1, markeret med et grønt rektangel). Et udsnit af mikroskopibilledet af farvesnittet (figur 10(b)) afslører flere af de i alt 26 farvelag. Tallene på udsnittet angiver Raman-målepunkterne: PB15 blev identificeret i punkt 1, 5, 6 og 7; ultramarin i punkt 3, 4 og 5; samt preussisk blå i punkt 4. Figur 10(c) viser det samme farvesnit, nu med fokus på området markeret med et rødt rektangel, hvor SEM-EDX-analysen blev udført. Figur 10(d) præsenterer et SEM-billede med 300X forstørrelse af dette område.

Grundstofsfordelingen for silicium (Si), aluminium (Al), svovl (S) og jern (Fe) fra SEM-EDX-målingerne er vist i figur 11(a–d), svarende til området i figur 10(d). Tilstedeværelsen af Si, Al og S indikerer ultramarin, hvilket også blev bekræftet ved Raman-spektroskopi. Fe indikerer preussisk blå, som dog ikke kunne bekræftes ved Raman – sandsynligvis fordi målepunktet ikke ramte pigmentpartiklerne direkte. Laget vurderes alligevel at indeholde preussisk blå, da dette pigment blev identificeret ved Raman i et andet lag.

## Konklusion

Som en del af Interreg-projektet TORCH har dette arbejde vist, hvordan en kombination af multispektral billeddannelse, SEM-EDX og Raman-spektroskopi kan give et mere nuanceret billede af et maleris opbygning, end hver enkelt metode kan levere alene. Det multispektrale system med høj spektral opløsning har afsløret skjulte geometriske retningslinjer og ændringer i kompositionen i Vilhelm Lundstrøms værker, mens spektral unmixing har visualiseret fordelingen af specifikke pigmenter i hele billedfladen. SEM-EDX har tilføjet præcis grundstofinformation i specifikke lag, og Raman-spektroskopi har suppleret med pigmentidentifikation – herunder for pigmenter, som ikke kan påvises med SEM-EDX. Eksemplet med *Nature Morte* (1945) viser, hvordan disse metoder tilsammen kan bekræfte og nuancere fund fra den billedbaserede analyse, f.eks. ved at forbinde spektrale signaturer med bestemte pigmenter og lagfølger.

Samlet set illustrerer studiet styrken ved en integreret, tværfaglig tilgang, hvor billedteknologi, mikroskopi og spektroskopi indgår i et samlet analyseforløb. Denne metode rummer et betydeligt potentiale i kunsthistoriske studier, konserveringsarbejde og bevaringsstrategier, hvor forståelsen af både det synlige og det skjulte lag er afgørende.

Resultaterne præsenteret her er en del af Interreg-projektet TORCH, der har til formål at udvikle og anvende avancerede teknologier til bevaring og udforskning af den regionale kulturarv.

## En særlig tak til

Forfatterne ønsker at takke konservatorerne Clara Bratt Lauridsen og Marie Bitsch Christiansen, Konserveringscenter Vejle, for udtagelse af prøver og farvesnit samt kritisk sparring under projektet, Ayoub Laghrissi, SDU, for Raman-spektroskopi, Bjarke Jørgensen, Newtec Engineering A/S, for sparring angående de hyperspektrale analyser, Bjarke Jensen, Newtec Engineering A/S, for fortolkning af XRF-analyser, og ikke mindst museumsinspektør Ellen Egemose, Kunstmuseum Brandts, for at stille værker til rådighed for projektet. Dette arbejde er delvist finansieret af Interreg Deutschland-Danmark og Den Europæiske Union under bevillingsnummer 04-3.2-23 2.

## Litteratur

- [1] J. K. Delaney, E. R. de la Rie, D. L. Palmer, K. A. Doolley, M. Ricciardi og M. B. Palmer (2016) “Visible and infrared imaging spectroscopy of paintings: pigment mapping and improved infrared reflectography”, *Herit. Sci.*, bind 4, artikel 6. DOI: 10.1186/s40494-016-0075-4
- [2] A. Cosentino (2014) “Identification of pigments by multispectral imaging; a flowchart method”, *Herit. Sci.*, bind 2, artikel 8. DOI: 10.1186/2050-7445-2-8
- [3] G. Poldi og G. C. Villa (2006) “Non-invasive pigment analysis on 20th-century paintings by reflectance spectroscopy: a methodological approach”, *J. Cult. Herit.*, bind 7, side 124–131.
- [4] N. Dobigeon, J.-Y. Tournet, C. Richard, J. C. M. Bermudez, S. McLaughlin og A. O. Hero (2016) “Linear and Nonlinear Unmixing in Hyperspectral Imaging”, *Data Handling in Science and Technology*, bind 30, side 185–224. DOI: 10.1016/B978-0-444-63638-6.00006-1
- [5] J. M. Bioucas-Dias, A. Plaza, N. Dobigeon, M. Parente, Q. Du, P. Gader og J. Chanussot (2012) “Hyperspectral Unmixing Overview: Geometrical, Statistical, and Sparse Regression-Based Approaches”, *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, bind 5, nr. 2, side 354–379. DOI: 10.1109/JSTARS.2012.2194696



Mads Svanborg Peters er optisk ingeniør hos Newtec Engineering A/S. Han er uddannet civilingeniør og har en erhvervs-ph.d. i ingeniørvidenskab fra Syddansk Universitet. Han arbejder med udvikling og anvendelse af hyperspektrale billedsystemer.



Jacek Fiutowski er lektor ved Mads Clausen Institutet, Syddansk Universitet, og leder af Nanophotonics-gruppen. Han er uddannet fysiker og har en ph.d. i fysik. Hans forskning fokuserer på nanooptik, avanceret elektron- og ionmikroskopi samt udvikling af sensorteknologier til miljø-, energi- og sundhedsapplikationer.



Arkadiusz Goszczak er specialkonsulent ved Mads Clausen Institutet, Syddansk Universitet. Han er uddannet ingeniør og har en ph.d. i mikro- og nanoteknologi. Hans arbejde fokuserer på mikro- og nanofabrikation, mikrofluidik og udvikling af biomedicinske sensorer.