

# Microfading som verktyg för att förutse färgförändring av akvarell



**Ellen Heimdal**

**Uppsats för avläggande av filosofie kandidatexamen i  
Kulturvård, Konservatorprogrammet  
15 hp  
Institutionen för kulturvård  
Göteborgs universitet**

**2016:37**





# Microfading som verktyg för att förutse färgförändring av akvarell

Ellen Heimdal

Handledare: Jacob Thomas

Kandidatuppsats, 15 hp  
Konservatorprogram  
Lå 2015/16



Program in Integrated Conservation of Cultural Property  
Graduating thesis, BA/Sc, 2016

By: Ellen Heimdal  
Mentor: Jacob Thomas

Microfading as a Tool to Predict Colour Change of Water Colour Paintings

## ABSTRACT

This study examines microfading as a tool to predict light induced colour change of water colour paintings. Microfading allows direct measurements of the material. By exposing a small area (0,2-0,4 mm) to very intense light while simultaneously measure the colour of the area with a spectrometer, a quick determination of the materials lightfastness can be made. Measurements have been executed on Carl Larssons '*Lisbeth*', 1894 in the collection of Gothenburg museum of art. Further, measurements have been made on samples of indigo in gum arabic on gelatine-sized paper in order to evaluate the impact of spectral distribution of the light source used, the impact of the colour strength of the samples, the impact of angular distribution of the light source and whether reciprocity holds. These factors affect the accuracy of the test. Having them in mind, an estimation of the fading behaviour of the water colour painting can be made. The measured spots on the painting showed a low tendency to light induced colour change, below Blue Wool 3. The most sensitive spots where to be found in the red midtones. Microfading offers data which can be used together with a lighting policy to limit the degree of light damage to paintings on display.

Title in original language: Microfading som verktyg för att förutse färgförändring av akvarell

Language of text: Swedish

Number of pages:58

Keywords: microfading, accelerated aging, colour change, lightfastness, lighting policy

ISSN 1101-3303

ISRN GU/KUV—16/37--SE



## Acknowledgements

I would like to thank my supervisor Jacob Thomas for his great encouragement, positivity and ability to explain. This study wouldn't have been possible without him.

Thanks to Gothenburg museum of art for trusting me with Carl Larssons watercolour drawing *Lisbeth* as the object for this case study. I would also like to acknowledge Mariateresa Pullano and Malin Borin, conservators at Gothenburg museum of art, for taking time to participate in the measurements and for the support and guidance in shaping this study. And also Charlotta Hanner Nordstrand at the Department of Conservation at the University of Gothenburg for reviewing the essay. And at last Tomasz Lojewski, Sr Lecturer Jagiellonian University Dept. Chemistry for trusting me with the microfading equipment.





# INNEHÅLL

1	INLEDNING.....	9
1.1	Bakgrund.....	9
1.2	Problemformulering.....	9
1.3	Frågeställningar.....	10
1.4	Syfte.....	10
1.5	Avgränsningar.....	10
1.6	Teoretisk ansats.....	10
1.7	Källmaterial och källkritik.....	11
2	MICROFADING.....	12
2.1	Introduktion.....	12
2.2	Instrument.....	12
2.4	ISO Blue Wool-standarder.....	16
2.5	Påverkande faktorer.....	17
2.5.1	Ljuskällans spektralfördelning.....	17
2.5.2	Reciprocitetsfaktorn.....	17
2.5.3	Vinkelförhållande till ljuskälla.....	17
2.5.4	Måleriteknik.....	18
2.6	Ljuspolicy.....	18
3	INDIGOSTUDIE.....	21
3.1	Introduktion.....	21
3.1.1	Beskrivning av studieobjekt.....	21
3.1.2	Retroreflekterande microfading-tester 1.....	21
3.1.2	Spektrodensitometer Konica Minolta FD-5.....	25
3.2	Genomförande.....	25
3.2.1	Experiment A) Spektralfördelning.....	25
3.2.2	Experiment B) Färgstyrka.....	26
3.2.3	Experiment C) Spegelreflektion.....	26
3.2.4	Experiment D) Reciprocitet.....	26
3.3	Resultat.....	27
3.3.1	Experiment A) Spektralfördelning.....	27
3.3.2	Experiment B) Färgstyrka.....	27
3.2.3	Experiment C) Spegelreflektion.....	28
3.2.4	Experiment D) Reciprocitet.....	31
4	FALLSTUDIE- CARL LARSSONS 'LISBETH' 1894.....	32
4.1	Introduktion.....	32
4.1.1	Beskrivning av studieobjekt.....	32
4.1.2	Retroreflekterande microfadig-tester 2.....	32
4.2	Genomförande.....	35
4.3	Resultat.....	36
5	DISKUSSION OCH SLUTSATS.....	42
5.1	Indigostudie.....	42
5.2	Fallstudie – Carl Larssons 'Lisbeth' 1894.....	44
5.3	Slutsats.....	45
6	SAMMANFATTNING.....	47
7	KÄLL- OCH LITTERATURFÖRTECKNING.....	49
	BILAGOR.....	52
	Bilaga 1. Uträkning för $\Delta E_{76}$ :.....	52
	Bilaga 2. Uträkning för $\Delta E_{94}$ :.....	52

Bilaga 3. Uträkning för $\Delta E_{00}$ .....	52
Bilaga 4. Resultat av MFT på Carl Larssons 'Lisbeth'. Fullständig tabell.....	54
Bilaga 5. Grafer för färgförändringsbeteende, MFT på Carl Larssons 'Lisbeth' 1894 ...	55



# 1 INLEDNING

## 1.1 Bakgrund

Ett stort orosmoment vid utställning av kulturhistoriska bemålade föremål på museum är den färgförändring som kan ske till följd av exponering för ljus. Vanligtvis grupperas föremål utifrån materialkategori och tilldelas en grad av ljuskänslighet utifrån denna. Det ger en grov uppskattning, att förutse hur ett föremål kommer reagera under belysning är mycket svårt. Flera metoder för att förutse ett föremåls tendens till färgförändring har förekommit. En metod är att identifiera de beståndsdelar som föremålet är uppbyggt av, skapa ett testmaterial med dessa beståndsdelar och utsätta det för belysning. Problemet med metoden är att den kräver att komponenterna identifieras korrekt, vilket kan vara svårt och omständligt. Ett åldrat pigmentprov kan inte heller förväntas ha samma färgförändringsbeteende som ett nytt pigmentprov. En annan metod är att kontinuerligt mäta ett föremåls färg. Detta kan göras med spektrometer eller digital fotografering. På så vis kan tendens till färgförändring upptäckas i tidigt skede och åtgärder kan vidtas. Problemet med denna metod är att föremålet faktiskt behöver genomgå en färgförändring samt att mätningen kan ta mycket lång tid. Ett alternativ till dessa metoder är microfading. Det första microfading-instrumentet uppfanns 1999 av Paul Whitmore, vid tiden föreståndare vid Carnegie Mellon Universitys Art Conservation Research Center. Microfadingtest (MFT) kan utföras direkt på materialet, komponenterna behöver därför inte identifieras. Metoden orsakar ingen skada och en mätning går på mindre än en timma. (Whitmore, Bailie, Pan 1999 sid. 396-397)

Min ingång till ämnet microfading gavs under min praktikperiod, vintern 2015, på Göteborgs konstmuseum. Microfading var ett aktuellt ämne då förberedelser inför ett microfading-seminarium som skulle äga rum på museet var i full gång. Konservator Malin Borin introducerade mig för metoden och tipsade om dess potential som uppsatsämne. Microfading-seminariet sammanföll sedan med starten för mitt arbete och gav en god introduktion i tekniken och användandet av microfading i Sverige och i världen.

## 1.2 Problemformulering

Museets primära uppgifter är att tillgängliggöra och bevara sin samling. I det uppdraget ligger ett dilemma. I konservatorns roll ligger tyngdpunkten naturligt på bevarandet, denne får därmed förespråka restriktioner i tillgängliggörandet genom lägre belysningsstyrkor och kortare utställningstider. Till stöd för konservatorns sak ligger litteratur huvudsakligen baserad på observationer om materialkategoriers benägenhet till färgförändring. Materialkategorier som vanligen klassas som ljuskänsliga är till exempel textilier, akvareller och fotografier. Denna litteratur ger en grov uppskattning om ett verks ljuskänslighet, men många verk faller utanför ramarna för det färgförändringsbeteende som väntas av dem. I denna studie undersöks om microfading kan användas för att minimera den värdeförlust som otillräcklig belysningsstyrka, otillgängliggörande av kulturhistoriska bemålade föremål och

färgförändring av kulturhistoriska bemålade föremål innebär. För att göra det studeras metodens validitet samt hur resultatet kan användas tillsammans med en värdebaserad ljuspolicy.

### 1.3 Frågeställningar

Denna studie är indelad i två experimentserier. Efter okulär undersökning tycks indigo finnas i föremålet för fallstudien, därför väljs indigo som testmaterial.

Indigostudie:

- Hur påverkar ljuskällans spektralfördelning färgförändringen av indigo vid MFT?
- Hur påverkar pigmentets färgstyrka den utlästa färgförändringen vid MFT?
- Påverkar innehåll av spegelreflektion den färgförändring som mäts vid MFT?
- Var bryts reciprocitetsfaktorn för indigo vid MFT?

Fallstudie – Carl Larssons akvarell *Lisbeth* GKM F75, 1894:

- Vilka punkter är verkets mest ljuskänsliga?
- Kan microfading användas för att ge mer faktabaserat underlag till beslut om riktlinjer för ljusexponering av akvareller av Carl Larsson på Göteborgs konstmuseum?

### 1.4 Syfte

Syftet med studien är att genom att belysa ett antal aspekter som har inverkan på det resultat som kan mätas med microfading ge underlag för att kunna diskutera metodens tillförlitlighet och möjlighet att applicera på föremål i museimiljö.

### 1.5 Avgränsningar

I denna studie kommer microfading på akvarell på papper, och de frågor som är relevanta vid tillämpningen på just detta material, att studeras. Vid tillämpning på andra material, till exempel pastosa oljemålningar, ställs vi i viss mån inför en annan problematik. I denna studie används genomgående uträkningen för  $\Delta E_{00}$ . Dessa resultat går att konvertera till  $\Delta E_{76}$ . Syftet med studien är att undersöka i vilken utsträckning (eller hur) microfading kan användas som underlag till diskussionen kring utställning av Carl Larssons akvareller på Göteborgs konstmuseum, inte att dra några slutsatser kring hur utställningen bör utformas.

### 1.6 Teoretisk ansats

Denna studie är kvantitativ. Resultat av de experiment som har utförts har tolkats deduktivt. För att stärka uppsatsens validitet har experimenten utformats i enlighet med tidigare forskning. Mätningar har gjorts med flera upprepningar för att öka reliabiliteten i resultaten (Davidsson & Patel 2011 ).

## **1.7 Källmaterial och källkritik**

Det källmaterial som har använts består till stor del av vetenskapliga artiklar publicerade från år 2000 fram till idag. Stor vikt har lagts vid artiklar skrivna av Paul Whitmore (Carnegie Mellon University/ Yale University), Bruce Ford (National Museum of Australia), Jim Druzik (Getty Conservation Institute) och Agnes Brokerhof (Cultural Heritage Agency of the Netherlands) då dessa är aktiva i diskussionen kring användandet och utvecklingen av microfading. Detta material hänvisar till mer traditionell litteratur inom museisfären av b.la. Thomson, Russell och Abney samt Bunsen och Roscoe, därför utgör också dessa författare en del av källmaterialet.

## 2 MICROFADING

### 2.1 Introduktion

Microfading är en analysmetod för att mäta ett materials ljuskänslighet. Det är en accelererad åldringsmetod där en mycket liten punkt på det undersökta objektet, ca 0,3-0,4 mm i diameter, utsätts för intensiv belysning för att provocera fram en färgförändring. Det reflekterade ljuset mäts under testet med en spektrometer vilket gör att färgförändringen går att följa i realtid. Mjukvaran till spektrometern konverterar spektral data till färgkoordinater i CIE L\*a\*b\* Colour Space och genom att beräkna distansen mellan de första insamlade färgkoordinaterna och de sista får färgförändringen ett nummervärde som betecknas  $\Delta E$ . Metoden orsakar ingen skada på materialet eftersom ljuspunktens storlek är minimal och färgförändringen är kontrollerad och stoppas innan den går att uppfatta med mänskligt öga. Detta tillåter mätning direkt på materialet och pigmentidentifiering är därför inte nödvändigt för att undersöka dess benägenhet till färgförändring.

Parallellt vid ett microfading-test utförs tester på Blue Wool-standarder. Detta för att kontrollera att instrumentet fungerar som det ska. Faktorer som omgivande ljus och relativ luftfuktighet kan påverka graden av färgförändring, dessa faktorer är föränderliga och kan variera från dag och plats, därför används Blue Wool för att sätta dessa omständigheter i relation till graden av färgförändring av denna standard som en slags kalibrering.

Syftet med microfading var från början att erbjuda snabba mätningar av de färger närvarande på ett föremål för att upptäcka pigment med extrem ljuskänslighet (Whitmore, Bailie, Connors 1999 sid. 200). Senare har metoden kommit att användas för att förutse färgförändring till följd av ljusexponering under särskilda utställningsförhållanden. Den belysningsdos som föremålet har exponerats för under mätningen räknas då om till motsvarande luxtimmar och kan översättas till motsvarande museidagar eller museiår i ett visst utställningsklimat. Det finns dock flera faktorer som påverkar hur korrekt en sådan översättning blir, resultatet kan annars redovisas som relativ grad av färgförändring relaterat till Blue Wool-standarder.

### 2.2 Instrument

Idag finns en rad olika varianter och konstruktioner av microfading-instrument. Instrumentens mest fundamentala beståndsdelar är en ljuskälla och en spektrometer.

#### *Ljuskälla*

Instrumentet behöver en ljuskälla som kan producera ljus med hög intensitet men som är relativt kompakt. Ljuskällans intensitet behöver vara stabil och dess spektralfördelning bör gå att reglera. Vanligtvis används en xenonlampa. Xenon är utvecklad för att simulera dagsljus och har ett starkt vitt ljus med visst innehåll av UV. Vid microfading-test behöver belysningen anpassas för ändamålet, det görs med filter. Water-filter och hot mirror-filter skär av de infraröda våglängderna och reducerar den termiska strålningen ifrån ljuskällan och UV-filter

reducerar våglängder under 400nm. Spektrumet motsvarar då ungefär dagsljus inomhus. Xenon är instabil i sin intensitet och behöver därför någon form av intensitetskontroll. LED-lampor förekommer även ibland som ljuskälla vid microfading. LED avger dock inte lika kraftfull belysning som xenon men är mer stabil i sin intensitet. Ljuset behöver transporteras från lamphuset till punkten för belysning. Till detta ändamål används en optisk fiber.

### *Spektrometer*

Det ljus som reflekteras från den belysta punkten behöver samlas och transporteras till en spektrometer och även då används en optisk fiber. Spektrometern bryter ljuset och mäter dess intensitet vid varje våglängd och denna information ger ett reflektionsspektrum som berättar om punktens färg. Till spektrometern används en mjukvara som konverterar reflektionsspektrumet till färgkoordinater i CIE  $L^*a^*b^*$  Colour Space. Reflektionsspektrum sparas kontinuerligt för att följa färgförändringsbeteendet. Efter avslutat test beräknas distansen mellan de första och sista insamlade färgkoordinaterna och förändringen får då ett nummervärde som betecknas  $\Delta E$ .

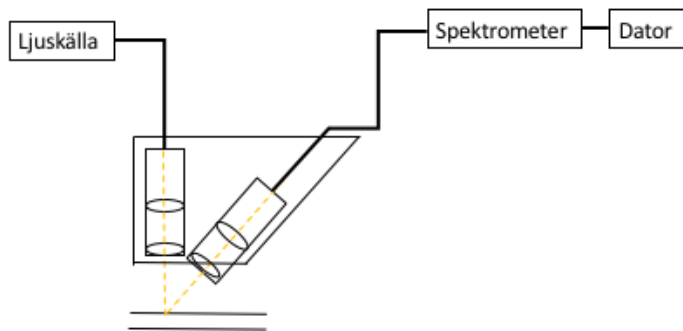
### *Konstruktionsvarianter*

Det första microfading-instrumentet, konstruerat av Paul Whitmore använder sig av två linsrör; ett för belysning och ett för insamling av reflekterat ljus (se figur 1. Schematisk bild microfading-tester). Ljuset förs från lamphuset med en optisk fiber till det första linsröret där ljuset fokuseras med linser och sänds ned mot provet. Det ljuset som reflekteras från provet samlas genom det andra linsröret där det fokuseras med linser och förs med en optisk fiber till spektrometern. Linsröret för belysning är placerat med  $0^\circ$  vinkel och linsröret för insamling av reflekterat ljus är placerat med  $45^\circ$  vinkel i förhållande till belysningen.

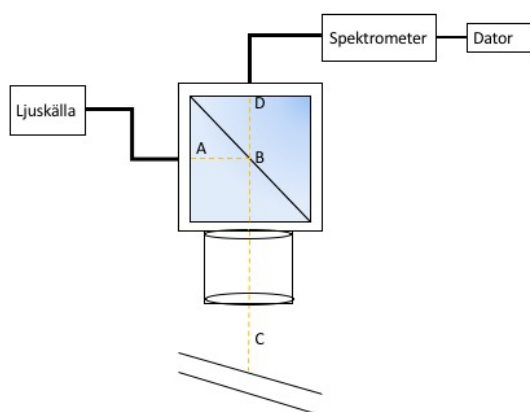
Senare har retroreflekterande microfading-instrument konstruerats. Till dessa används samma linsrör för belysning och insamling av reflekterat ljus (se figur 2. Schematisk bild retroreflekterande microfading-tester). Ljuset förs från lamphuset med en optisk fiber till en stråldelare (2A). Stråldelaren bryter ljuset (2B) och sänder det genom linsröret ned mot provet. Det reflekterade ljuset (2C) samlas genom samma linsrör och sänds genom stråldelaren mot ytterligare en optisk fiber (2D) genom vilken det transporteras till spektrometern.

Det finns också portabla instrument vilket kräver en tredje typ av konstruktion där instrumentets huvud placeras direkt på ytan för mätning. En optisk fiber går då från ljuskällan till instrumenthuvudet och riktas mot en bollins. Det reflekterade ljuset samlas genom bollinsen och transporteras med en optisk fiber till spektrometern.





Figur 1. Schematisk bild microfading-tester



Figur 2. Schematisk bild retroreflekterande microfading-tester

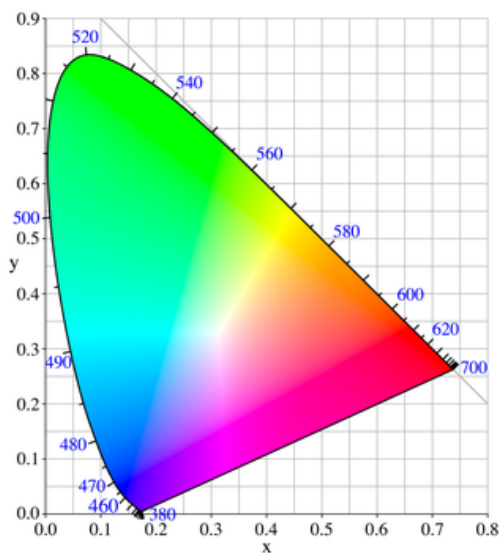
## 2.3 CIE Colour Space

Commission Internationale l'Eclairage (CIE) har sedan 1900-talets början arbetat med att kvantifiera och systematisera färg. Genom att ge en färg koordinater som placeras i en färgrymd så kan vi lättare och mer exakt kommunicera färg. CIE-systemet bygger på trikromateorin, alltså att ögat har receptorer för tre primärfärger; blått, grönt och rött och med hjälp av dessa tre kan vi uppfatta övriga färgerna i det synliga spektrumet.

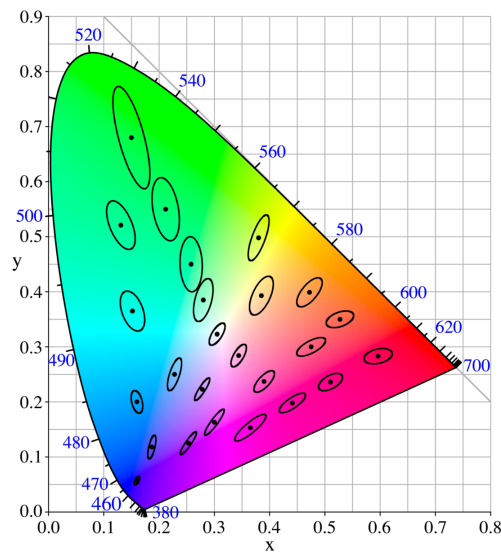
Guild och Wrights forskning om färgmatchning är av stor vikt för CIE-systemet. De genomförde under tidigt 1900-tal experiment med tanken att man genom additiv färgblandning kan få vilken färg som helst genom att blanda de tre primärfärgerna blått, grönt och gult, likt ögat med sina tre receptorer. En testgrupp fick se en färg genom ett hål som tillät 2° brett synfält. Med hjälp av tre ljuskällor i blått, grönt och rött fick de i uppgift att matcha den givna färgen genom att justera intensiteten hos de tre ljuskällorna vilka kunde tilldelas värden (Wright 1981 sid. 3-18). Människans förmåga att se färg kan variera och testgruppen användes för att ge en bild av människans genomsnittliga färgseende. Det visade sig dock att alla färger inte gick att matcha på detta vis. För att överbygga problemet överfördes en av

ljuskällorna till testfärgen, denna färg gick då att matcha med övriga ljuskällor och den överförda testfärgen fick ett negativt värde.

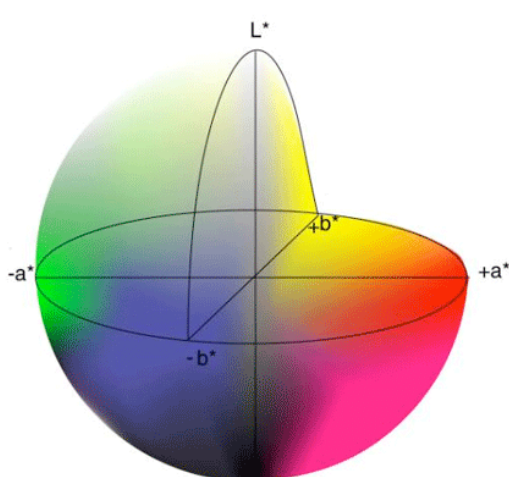
Då CIE XYZ 1931 Color Space (se figur 3) utvecklades övergavs tanken med de tre färgade ljuskällorna och istället kom de tre variablerna X, Y och Z att användas. De representerar inte primärfärgerna. Y uttrycker ljusreflektion från provet vägt mot ögats känslighet mot de olika spektrallinjerna, denna koordinat ger information om provets ljushet. X och Z ger information om provets kulör. Med detta system får prov med samma värden på X-, Y- och Z-koordinaterna alltid samma färg. Dock med behållningen att de belyses på samma sätt (Sisefsky 1994 sid 100-106). Färgrymdens hästskeformade yttre kanter utgör gränsen för vårt färgseende och rymmer alla färger som kan uppfattas med mänskligt öga. Utifrån en placering i hästskon kan en linje dras genom den vita mittpunkten för att hamna på komplementfärgen till utgångspunkten. Men fördelningen i färgrymden är ojämn.



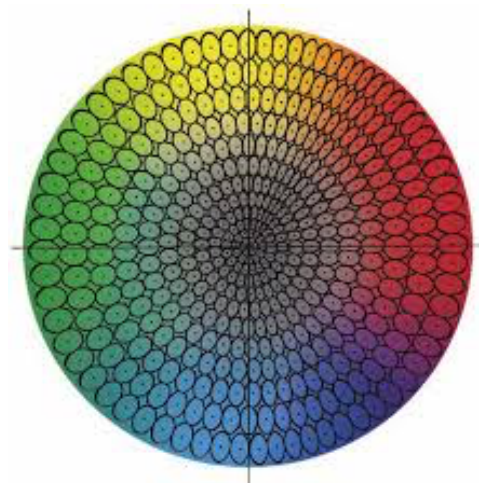
Figur 3. CIE 1931 XYZ Colour Space



Figur 3. MacAdams ellipser, CIE 1931 XYZ Colour Space



Figur 5. CIE 1976 L\*a\*b\* Colour Space



Figur 6. Toleranssfärer CIE 1976 L\*a\*b\* Colour Space

MacAdams ellipser markerar dessa ojämnheter i fördelningen av färger i färgrymden (se figur 4). 25 punkter testades på en grupp standardåskådare för att se hur stort området är inom vilket märkbar färgförändring ej går att urskilja. Resultaten visade sig bli ellipser och dessa varierar i storlek beroende på var i färgrymden vi befinner oss (MacAdam 1942).

Markeringarna i det gröna området är störst, då vi talar om färgförändring och om att mäta denna så medför ojämnheten stora problem. Avståndet mellan två färgkoordinater kan innebära olika mycket faktisk färgförändring beroende på var i färgrymden vi befinner oss.

1976 skapas en ny färgrymd baserad på CIE 1931 XYZ. Denna kallas CIE  $L^*a^*b^*$  och är ett försök att matematiskt räkna om färgrymden och på så vis göra den mer homogen (se figur 5).  $L^*$  anger ljushet,  $a^*$  anger rödhet/grönhet och  $b^*$  anger gulhet/blåhet. Toleranssfärerna i denna färgrymd varierar fortfarande i storlek beroende på var i rymden vi befinner oss men variationerna har minskat avsevärt (se figur 6). Senare har ytterligare omräkningar av CIE LAB gjorts; 1996 och 2000.

Färgförändring, alltså distansen mellan två färgkoordinater benämns som  $\Delta E$ . Beräkningen av  $\Delta E$  skiljer sig beroende på vilken färgrymd som används. Se bilaga för uträkning för  $\Delta E_{76}$ ,  $\Delta E_{94}$  och  $\Delta E_{00}$ .

En förutsättning för att ett provs färgkoordinater ska kunna jämföras är att de belyses på samma sätt. CIE har därför tagit fram ett illuminant som används som standard vid färgmätning, denna kallas D65 och är framtagen för att efterlikna solljus.

## 2.4 ISO Blue Wool-standarder

Blue Wool (BW) är antagen som standard av ISO (International Organisation for Standardisation), Recommendation R105 och British Standard BS1006 (1961) och finns att köpa som färdiga kort. BW-standarder består av ett kort med åtta prover av färgad ull. Varje prov motsvarar en grad av ljuskänslighet, där BW1 är mycket ljuskänsligt och BW8 är mycket ljusäkta. Grovt sagt tar det dubbelt så lång tid för BW2 innan samma färgförändring sker som för BW1 och BW3 kräver dubbelt så lång tid som BW2 (Thomson 1978 sid. 174-175).

Till microfading används BW1-3. Föremål som är mer ljusäkta än BW3 anses inte löpa någon risk för färgförändring i ett kontrollerat museiklimat (Ford & Druzik 2013 sid. 55). Som tidigare nämnts utförs mätningar på BW-standarder (1-3) parallellt med microfading-test av ett okänt material. Färgförändringen av det okända materialet kan då sättas i relation till färgförändringen av BW-standarder som blekts under samma förutsättningar.

Det finns både brittiska och amerikanska tillverkare av BW-kort, dessa har olika standarder och går därmed inte att jämföra med varandra. Det har noterats att variationer i färgförändringsbeteende förekommer, till och med mellan prover från samma tillverkare. Detta tyder på att proverna kan vara ojämnt färgade (Ford 2011, sid. 59). Andra nackdelar för tillämpning av BW som standard vid microfading är att det är en vävd textil och därför tredimensionell. Då punkten för mätning vid microfading är mycket liten kan resultatet

variera beroende på om det är en topp eller dal i texturen som mäts. Ljuset reflekteras på olika sätt och ger därmed olika färgkoordinater.

## **2.5 Påverkande faktorer**

Följande faktorer har inverkan på det resultat som mäts med microfading:

### ***2.5.1 Ljuskällans spektralfördelning***

Spektralfördelningen för den ljuskälla som används vid microfading-test påverkar graden av färgförändring av materialet. En ljuskällas spektralfördelning beskriver hur mycket energi som avges vid varje våglängd. Fotonernas energi varierar med våglängd och kortare våglängder avger mer energirik strålning. Russell och Abney undersökte under 1800-talet relationen mellan våglängd och nedbrytningsförmåga. De fann att blått- och nära UV-ljus har störst nedbrytningsförmåga (Russell & Abney 1888), något som idag ses som en förenkling. För att förutse nedbrytning av ett material till följd av exponering för en bestämd ljuskälla behöver ljuskällans spektralfördelning tillsammans med materialets aktiva spektrum studeras. Det aktiva spektrumet berättar vilken mängd ljus som absorberas vid varje våglängd (Thomson 1978 sid. 156-159).

### ***2.5.2 Reciprocitetsfaktorn***

Reciprocitetsfaktorn utforskades på 1800-talet av Bunsen och Roscoe. De forskade kring ljusets nedbrytningsförmåga av fotografiskt material och utförde experiment där materialet exponerades för ljus enligt olika modeller. Slutsatsen som drogs var att den fotokemiska reaktion som följde var en produkt av den totala energin som absorberats av materialet. De två faktorer som påverkar den totala energin är strålningseffekt och exponeringstid. De fann att den fotokemiska reaktionen var oberoende av dessa faktorer så länge den totala dosen var densamma (Bunsen & Roscoe 1859). Liksom de flesta accelererade åldringsmetoderna är microfading baserat på reciprocitetsfaktorn. Hög strålningseffekt under kort exponeringstid kan likställas med låg strålningseffekt under lång exponeringstid så länge den totala energin som absorberats är densamma. Det är dock inte en självklarhet att reciprocitetsfaktorn håller då ljuskänsliga material som exponeras för hög strålningseffekt löper större risk att hamna utanför den (del Hoyo-Meléndez & Mecklenburg 2011 sid. 52-61). En vanlig grafisk framställning av reciprocitetstest är att placera in färgförändringsdatan i en graf med logaritmen för fotorespons på X-axeln och logaritmen för intensitet på Y-axeln. Om datan hamnar i en rak linje med en lutning på 1 så håller reciprocitetsfaktorn (Martin et al. 2003 sid. 294).

### ***2.5.3 Vinkelförhållande till ljuskälla***

Föremålets ytstruktur påverkar hur ljuset reflekteras från föremålet och därmed hur vi upplever färgen. När det infallande ljuset studsar från ytan i samma vinkel men spegelvänt får vi spegelreflektion (se figur 7). Detta sker i större utsträckning på blanka. Spegelreflektionen kan få färger att upplevas mer mättade och klara. Då det infallande ljuset splittras och sprids i

alla riktningar när det träffar ytan får vi diffus reflektion. Grova och irreguljära ytor ger en större mängd diffus reflektion. Den diffusa reflektionen kan få färger att upplevas omättade och dova. Två föremål bemålade med samma färg men med olika ytstruktur kan upplevas ha helt olika färger. Vid färgmätning med t.ex. spektrometer är det standard att använda den diffusa reflektionen. Resultatet blir då mer överensstämmande med hur vi upplever färgen eftersom ytstrukturen tas med i beräkning. Då spegelreflektionen mäts ges föremålets ”sanna” färg. Samma färg skulle mätas hos de ovanstående två bemålade föremålen trots att de inte upplevs som lika (Konica Monolta 2016:1).



Figur 7. Spegelreflektion/diffus reflektion

Vilken reflektion som mäts beror på vinkeln i förhållande till belysningen. Då det reflekterade ljuset samlas i 10-45° vinkel från det infallande ljuset utesluts den största delen av spegelreflektion. I vilken vinkel föremålet blir belyst har också visat sig ha en mindre inverkan på den fotokemiska nedbrytningen. Belysning nära 0° tycks ha störst nedbrytningsförmåga eftersom vinkeln tillåter optimal penetrering av ljuset i materialet (Whitmore, Bailie, Connors 1999 sid. 203).

#### 2.5.4 Måleriteknik

Hur ett pigments färgförändring upplevs hos en målning kan relateras till flera orsaker. Två punkter med samma pigment men olika färgstyrka kan med microfading-test få skilda resultat, trots att samma kemiska reaktion sker. Huruvida ett färgområde är uppbyggt av ett rent eller en blandning av pigment påverkar färgförändringsbeteendet. För att få en uppfattning om punkten som testas bleks eller skiftar nyans (till följd av att t.ex. en komponent blekts) studeras dess LAB-värden.  $\Delta L$  ger information om provet har blekts eller mörknat (+ har blekts, - har mörknat).  $\Delta a$  ger information om förändringar i grön-/rödhet (+ blivit mer rött, - blivit mer grönt) och  $\Delta b$  ger information om förändringar i blå-/gulhet (+ blivit mer gult, - blivit mer blått).

## 2.6 Ljuspolicy

Microfading-data används i allt större utsträckning tillsammans med en ljuspolicy på museum. Att förhindra färgförändring och samtidigt låta ett föremål ställas ut och exponeras för ljus är ett omöjligt uppdrag. Att kontrollera föremålets färgförändring är ett rimligare mål och detta görs bäst med en ljuspolicy.

*”The goal of the heritage profession is to organize best access to optimal values(s) of cultural heritage and to pass it on to next generations with optimal significance and accessibility.”*  
(Brokerhof 2013 sid. 4)

Ur detta citat av Brokerhof, (konservator och forskare från Netherlands Institute for Cultural Heritage) kan vi utläsa tre mål; att tillgängliggöra samlingen, att ställa ut den under förhållanden som ger en god upplevelse av samlingen och att lämna vidare samlingen till nästa generation i sådant skick att dess värde inte förvanskats.

Föremål som klassas som ljuskänsliga ställs vanligtvis ut i 50lux. Detta betraktas som den lägsta belysningsstyrkan under vilken ögat fungerar väl inom hela färgseendets intervall. Michalski (forskare från Canadian Conservation Institute) menar dock att det finns omständigheter som gör att denna belysningsstyrka inte är tillräcklig. För varje sådan faktor (se tabell 1) behöver belysningsstyrkan tredubblas för att ge en visuellt stimulerande upplevelse av föremålet (Michalski 2016).

Tabell 1. Justeringar för att ge god visuell återgivning, efter Michalski 2016

Utgångsvärde, rimlig visuell återgivning för yngre åskådare:	50 lux
För mörka ytor:	upp till 3x 50 lux
För detaljer med låg kontrast :	upp till 3x 50 lux
För fina detaljer:	upp till 3x 50 lux
För äldre åskådare:	upp till 3x 50 lux

Collections Council of Australia har givit ut en guide i att tilldela museiföremål värde. Deras förhållningssätt baseras på ICOMOS ”Burra Charter” (ICOMOS 1999) och värdebegreppet bryts här ned i fyra övergripande kategorier; historiskt värde, estetiskt värde, forskningvärde och socialt/spirituell värde. Inom dessa kategorier rankas föremålet i förhållande till dess proveniens, representativitet, sällsynthet, skick och tolkningsbarhet (Russell & Winkworth 2009 sid. 10-21). Med hjälp av dessa begrepp kan vi diskutera hur stor värdeminskning en färgförändring av föremålet skulle innebära och hur stor färgförändring inom ett givet tidsspänn ägarinstitutionen skulle finna acceptabelt. Detta bevarandemål utgör ramen för en ljuspolicy. När ett bevarandemål är satt kan belysningsstyrka och exponeringstid budgeteras för att ge så god tillgänglighet under så bra belysningsförhållanden som möjligt inom dessa ramar.

National Museum of Australia (NMA) har med hjälp av microfading tagit fram en värdebaserad ljuspolicy. Den bygger på tidigare riktlinjer framtagna på Victoria and Albert Museum under 90-talet (Ashley-Smith et al 2002) men här har den kategori för mest ljuskänsliga föremål (med färgförändringsgrad likvärdig BW1-4) tack vare den data microfading erbjuder kunnat styckats upp i fyra kategorier för mer välgrundade beslut. NMA

använder sig dessutom av ovanstående värdebegrepp för placera in föremål i belysningsramarna. NMA har ett bevarandemål på 1JND (Just noticeable difference) på 50 år. Microfading-test utförs på föremål som kan representera en större grupp föremål och delas därefter in i fyra kategorier utifrån den ljuskänslighet som mäts (se tabell 2). I varje kategori har rutiner för belysningsstyrka och exponeringstid definierats. Alla föremål kommer inte med samma sannolikhet att ställas ut och löper därmed inte lika stor risk för färgförändring. Föremålets värde diskuteras därför utifrån ovanstående värdebegrepp för att delas in i en kategori för högt eller lågt användande. Med denna modell kan en övergripande indelning av samlingen göras för att minimera eventuell värdeförlust vid utställning (Ford & Smith 2011).

Tabell 2. NMA:s värdebaserade belysningsramar, efter Ford och Smith 2011

ISO (BW#)	< about BW2	about BW2 –3	about BW3 –4	> about BW4
	about 50 lux	50-100 lux*	50-150 lux*	100 -250 lux*
Exposure of high significance (high use) objects	individually decided	2 years/decade	5 years/decade	life of exhibition
Exposure of average significance (lower use) objects	Individually decided	5 years/decade	life of exhibition max 10 years	life of exhibition max 10 years

## 3 INDIGOSTUDIE

### 3.1 Introduktion

I följande studie utförs fyra experiment på ett testmaterial av indigo i gummi arabicum på papper. Experimenten undersöker ljuskällans spektralfördelning, provets färgstyrka, innehåll av spegelreflektion samt reciprocitetsfaktorns inverkan på det resultat som mäts med microfading. Materialet är tänkt att likna det i Carl Larssons akvarell 'Lisbeth' och därmed kunna användas som underlag för att diskutera resultatet av microfading-testen på akvarellen. Tidigt i arbetet görs en okulär undersökning av 'Lisbeth' och det blå pigmentet i matta och stol tycks vara indigo, därför väljs just detta pigment som testmaterial.

#### 3.1.1 Beskrivning av studieobjekt

Indigo från företaget Kremer pigmenter och gummi arabicum i lösning från Winsor & Newton används. Pigmentet mals i gummi arabicum och späds med vatten till tre olika pigmentkoncentrationer för att visuellt matcha de färgstyrkor funna i Carl Larssons akvarell 'Lisbeth'. Färgen späds till en ljus, en medium och en mörk färgstyrka. De stryks därefter ut med pensel bredvid varandra på ett papper med storleken 10 x 8 cm. Pappret är tillverkat för att efterlikna det papper som ofta användes av 1800-talets akvarellkonstnärer. Det är ett handgjort gelatinbehandlat vitt papper innehållande ca 60% linfibrer och 40% långfibrigt bomullsfibrer, tillverkat vid Ruscombe Mill, Frankrike (Church 1905 sid 7-8; Lerwill et al. 2015 sid. 17)

#### 3.1.2 Retroreflekterande microfading-tester 1

Microfading-test utförs med detta instrument (se figur 10). Det är konstruerat och ägs av Jacob Thomas. Det är en retroreflekterande modell där instrumenthuvudet är monterat på en vinkelskiva, vilket tillåter justering av vinkeln från 0°-45°. Vanligtvis används 10°, då undviks större delen av spegelreflektion.

Två ljuskällor finns att tillgå; xenon och LED. Xenonlampan är en HXP-2000 från Ocean Optics driven med 35W. Dess spektralfördelning regleras med filter. Hot mirror-filter skär av de våglängder som finns i UV- och IR-regionerna. Intensiteten regleras med Neutral Density (ND)-filter (20, 10, 0.5 samt 0.3). Se figur 8 och 9.

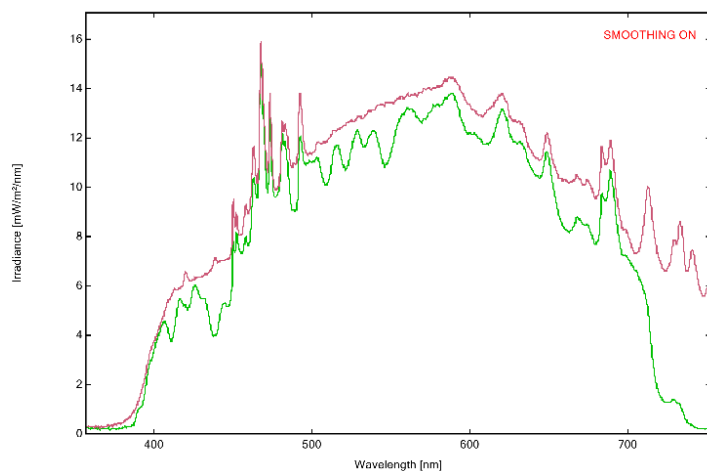
LED-lampan är en Mightex Multi-Wavelength Fiber-Coupled LED. Den har fyra kanaler; en för vitt, en för rött, en för blått och en för nära UV-ljus. Spektralfördelningen regleras genom att justera intensiteten hos en eller flera av dessa kanaler. Ljuset förs från ljuskällan med en 600µm kiselfiber till en stråldelare. Där bryts det och skickas mot linsröret. I röret sitter två linser placerade inom brännviddsavstånd från varandra. Den yttersta linsen är utbyttbar, utbytbara linser i 30, 50 och 75µm finns att tillgå. Det reflekterade ljuset samlas genom samma linsrör, sänds igenom stråldelaren och förs med en 200µm kiselfiber till spektrometern.



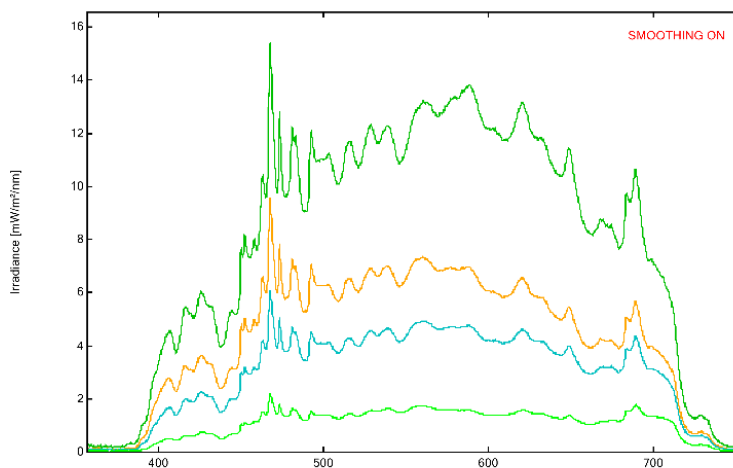
Spektrometern är en Qstick. Den är kopplad till mjukvaran *Waves* som används för att kontrollera spektrometern och att analysera data. Innan ett test genomförs anges inom vilka tidsintervall spektrum ska samlas och hur lång tid testet ska pågå. *Waves* konverterar spektrumet med CIE (1976)  $L^*a^*b^*$ -ekvationen för  $2^\circ$  standardåskådare under standardbelysningsmedel D65. Tre filer utvinns ur ett test, en med värden för förfluten tid/ $L^*$ , en med värden för förfluten tid/ $a^*$  och en med värden för förfluten tid/ $b^*$ . Dessa tre filer öppnas i programmet Excel där de sammanfogas. Genom att jämföra distansen mellan det första insamlade  $L^*a^*b^*$ -värdet och de senare insamlade så kan  $\Delta L$ ,  $\Delta a$  och  $\Delta b$  beräknas och därur  $\Delta E$ . I denna studie har ekvationen för  $\Delta E_{00}$  använts. Med värdena för förfluten tid/ $\Delta E_{00}$  kan en graf för färgförändring/tid skapas.

Spektrometern behöver kalibreras före användning och därefter varje timma. Detta görs med en referens för vitt och för bakgrund. Som vit referens används bariumsulfat och som mörk referens används den utzoomade bakgrunden.

Instrumentet fokuseras genom att föra sondhuvudet upp eller ned. När intensitetskurvan, som går att följa i *Waves*, är maximerad är instrumentet i fokus (Thomas 2013).



Figur 8. Spektralfördelning för xenon med hot mirror-filter (grön) och utan hot mirror-filter (röd)

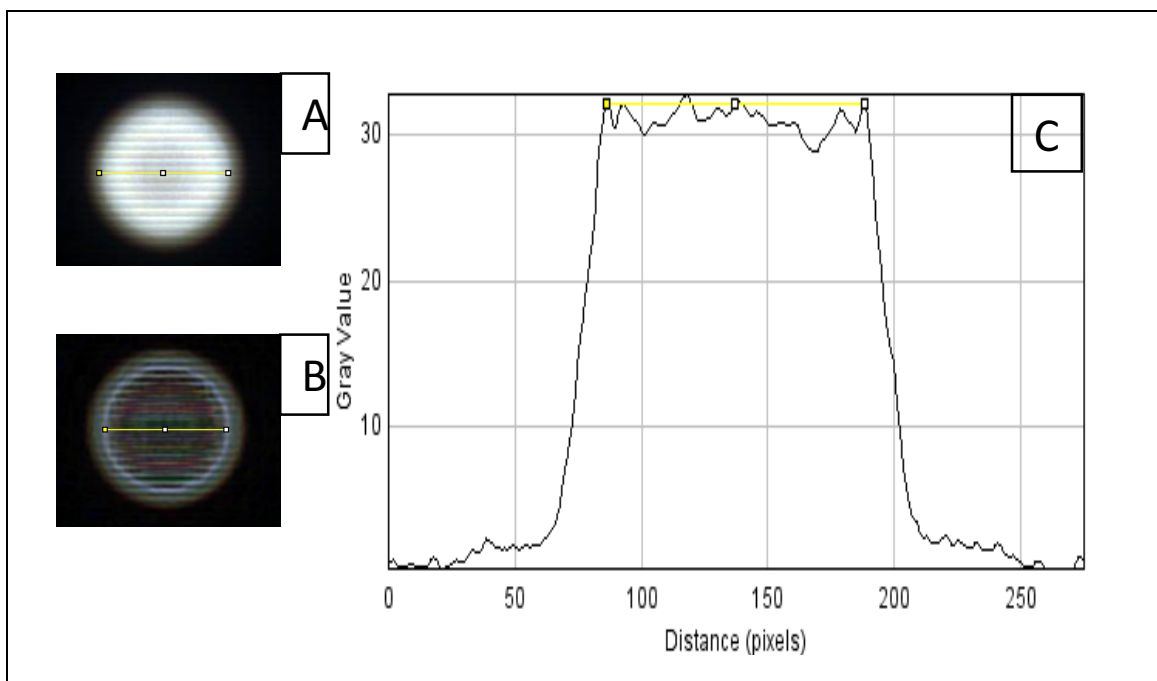


Figur 9. Spektralfördelning för xenon med ND-filter 0,2 (ljusgrön), 1,0 (cyan), 0,5 (gul) och 0,3 (mörkgrön)

### Ljusbildning och dosberäkning för Retroreflekterande microfading-tester 1

Den energi som koncentreras i belysningspunkten beror på och varierar med ljuskällans intensitet och belysningspunktens storlek. Det är även noterat att intensiteten i punkten inte är jämt fördelad, de centrala 0,2mm blir exponerade för något högre intensitet än ytterkanterna (Whitmore, Bailie, Pan 1999 sid. 401). För att räkna ut energin koncentrerad i belysningspunkten behöver alltså punkten mätas och den rumsliga fördelningen av energi i punkten undersökas.

Punktens storlek beräknas genom att placera en bildsensor (CMOS eller CCD) under ljusstrålen. Ljusstrålen fokuseras och fotograferas därefter (se figur 11A). Bilden öppnas i mjukvaran *ImageJ* där den behandlas för att öka kontrast och finna yttre kanter. En linje dras genom punktens mitt (se figur 11B). För att kartlägga punktens profil skapas en graf över gråvärde (se figur 11C), denna skapas ur markeringen genom punkten i figur 11B. I grafen undersöks fördelningen av energi i punkten, ett lågt gråvärde innebär att pixeln har låg ljusintensitet. Det område med högst gråvärde är det område där energin är störst. Detta område markeras, pixlarna angivna används för att beräkna belysningspunktens diameter.



Figur 11. Undersökning av belysningspunkt. 11 A: bild av belysningspunkten på bar CMOS-detektor. Diametern markerad med gult. 11B:samma bild som 11A, här bearberad i ImageJ för att förtydliga kontrast och hitta yttersta kanter. Diameter markerad med gult. 11C: kartläggning av belysningspunktens profil med graf för gråvärde. Ur diametern markerad i 11B. Pixlar markerade med gult används för att beräkna punktens diameter.

Då förhållandet mellan pixlar och  $\mu\text{m}$  på datorn i fråga är känt så kan punktens diameter beräknas i mm.

Då punktens storlek är känd (se tabell 3) mäts ljuskällans intensitet. Till detta används en fotometer och radiometer. Fotometern ger oss värden i lux och radiometern i  $\text{w/m}^2$ .

Tabell 3. Beräkning av belysningspunktens area

Lins (mm)	Punktens diameter (pxl)	$\mu\text{m}/\text{pixel}$	Punktens diameter( $\mu\text{m}$ )	Punktens diameter (mm)
30	101	3,60	363,3	0,36

Sensorerna placeras en åt gången under belysningspunkten som justeras tills kanterna precis täcks av ljus, varpå mätning påbörjas. Då sensorerna beräknar ett genomsnitt är det viktigt att hela ytan täcks av ljus. Belysningens intensiteten minskar då avståndet ökar och därför är det viktigt att inte täcka mer än nödvändigt av sensorytan. Sensorernas diameter mäts.

För att beräkna den intensitet som koncentreras i belysningspunkten används ”multiplieringsfaktorn”. Denna beräknas genom att dividera sensorns area med belysningspunktens area (se exempel i tabell 4).

Tabell 4. Multiplieringsfaktor

	Diameter	Radie	$\pi$	Area ( $\text{mm}^2$ )	Multipliseringsfaktor
Ljuspunkt	0,36	0,18	3,14	0,10	6792,66*
Lins	30	15	3,14	706,84	1

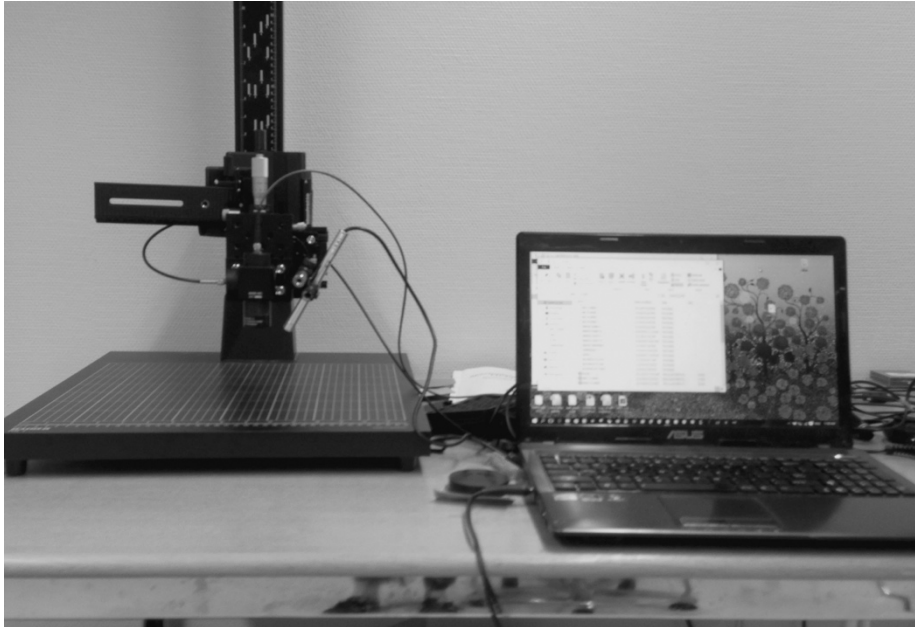
\* $706,84 / 0,10 = 6792,66$

Med multiplieringsfaktorn kan intensiteten i belysningspunkten beräknas utifrån värdena mätta med radio-och fotometern. Se exempel i tabell 5.

Tabell 5. Beräkning av intensitet i belysningspunkt

3,41 $\text{w}/\text{m}^2$	x	multiplieringsfaktor = 23129,01 $\text{w}/\text{m}^2$ (6792,66)
812,0 lux	x	multiplieringsfaktor = 5515639,92 lux (6792,66)

I ovanstående exempel har en lins på  $30\mu\text{m}$  använts. Då annan lins används förändras belysningspunktens storlek och därmed dess intensitet.  $75\mu\text{m}$ -linsen genererar en större slutlig ljuspunkt än  $30\mu\text{m}$ -linsen. Vid byte av lins behöver en ny uträkning göras. Ljuskällans intensitet är föränderlig, därför upprepas ljusmätningarna varje timma och en ny uträkning görs.



Figur 10. Retroreflekterande microfading-tester 1

### **3.1.2 Spektrodensitometer Konica Minolta FD-5**

I denna studie används en spektrodensitometer till ett experiment. Detta är ett portabelt instrument som möjliggör mätning av färg, densitet och belysning. I detta sammanhang används funktionen för färgmätning. Innan mätning kalibreras instrumentet mot en vitreferens som sitter på instrumentets understycke. Därefter lossas spektrofotometern från understycket och placeras mot ytan för mätning. Efter mätning kan data för  $L^*$ ,  $a^*$  och  $b^*$  utläsas på displayen. I instrumentet används LED för belysning och  $0^\circ/45^\circ$  vinkel för belysning/insamling av reflektion. Spektrofotometern samlar reflektionsspektrum inom våglängdsområdet 360-730nm. Punkten för mätning har en diameter på 3,55mm (Konica Minolta 2016:3)

## **3.2 Genomförande**

### **3.2.1 Experiment A) Spektralfördelning**

Test genomförs på Göteborgs universitet, institutionen för kulturvård 2016.04.18-2016.05.27. Retroreflekterande microfading-tester 1 används med en  $30\mu\text{m}$ lins. I experimentet jämförs två ljuskällor; xenon och LED. Med radiometer mäts de båda ljuskällornas strålningseffekt. Xenons intensitet regleras med filter ND 0,3 vilket ger en strålningseffekt likvärdig med den för LED med full intensitet. ND 0,3 släpper igenom 30% av xenons fulla intensitet. Belysningsstyrka för de båda ljuskällorna mäts med fotometer.

Test utförs på indigoprova med färgstyrka medium och varje test pågår i 10 minuter. Tre upprepningar görs för var ljuskälla. Efter avslutat test jämförs ljuskällornas nedbrytningsförmåga. Spektralfördelningen för de båda ljuskällorna jämförs i mjukvaran *Waves*.

### **3.2.2 Experiment B) Färgstyrka**

Test genomförs på Göteborgs universitet, institutionen för kulturvård 2016.04.18- 2016.05.27. Retroreflekterande microfading-tester 1 används med en 30 $\mu$ m-lins. Ljuskällan som används är LED med full intensitet och varje test pågår i 10 minuter. I experimentet undersöks varje färgstyrka (ljus, medel, mörk) samt underlagets (gelatinbehandlat lin- och bomullsfiberpapper) tendens till färgförändring. Tre upprepningar görs för varje prov. Test på BW1-3 görs varje timme för att kunna relatera testmaterialets färgförändring till BW-standarder samt för att kontrollera att instrumentets funktion.

### **3.2.3 Experiment C) Spegelreflektion**

Test genomförs på Göteborgs universitet, institutionen för kulturvård 2016.04.18- 2016.05.27. Retroreflekterande microfading-tester 1 används med en lins på 30 $\mu$ m. Ljuskällan som används är LED med full intensitet. I experimentet undersöks hur resultatet av microfading-test kan skilja sig beroende på innehåll av spegelreflektion. Varje test pågår i 10 minuter. Test utförs på tre färgstyrkor av indigo (ljus, medel, mörk) med insamling av reflekterat ljus i 10°, tre upprepningar för varje färgstyrka görs. Genomsnitt av de tre första L\*a\*b\*-koordinaterna beräknas för varje färgstyrka. Med detta vinkelförhållande beräknas färgkoordinater ur den diffusa reflektionen. Därefter regleras vinkeln för insamling av reflekterat ljus till 0° och test utförs på samtliga färgstyrkor (ljus, medel, mörk) med tre upprepningar för varje styrka. Genomsnitt av de tre första insamlade L\*a\*b\*-koordinaterna beräknas för varje färgstyrka. Med detta vinkelförhållande beräknas färgkoordinater ur spegelreflektionen. Med spektrodensitometer (Konica Minolta FD-5) samlas L\*a\*b\*-koordinater från de tre färgstyrkorna (ljus, medel, mörk) av indigo. Tre upprepningar görs för varje styrka och ett genomsnitt av dessa beräknas.

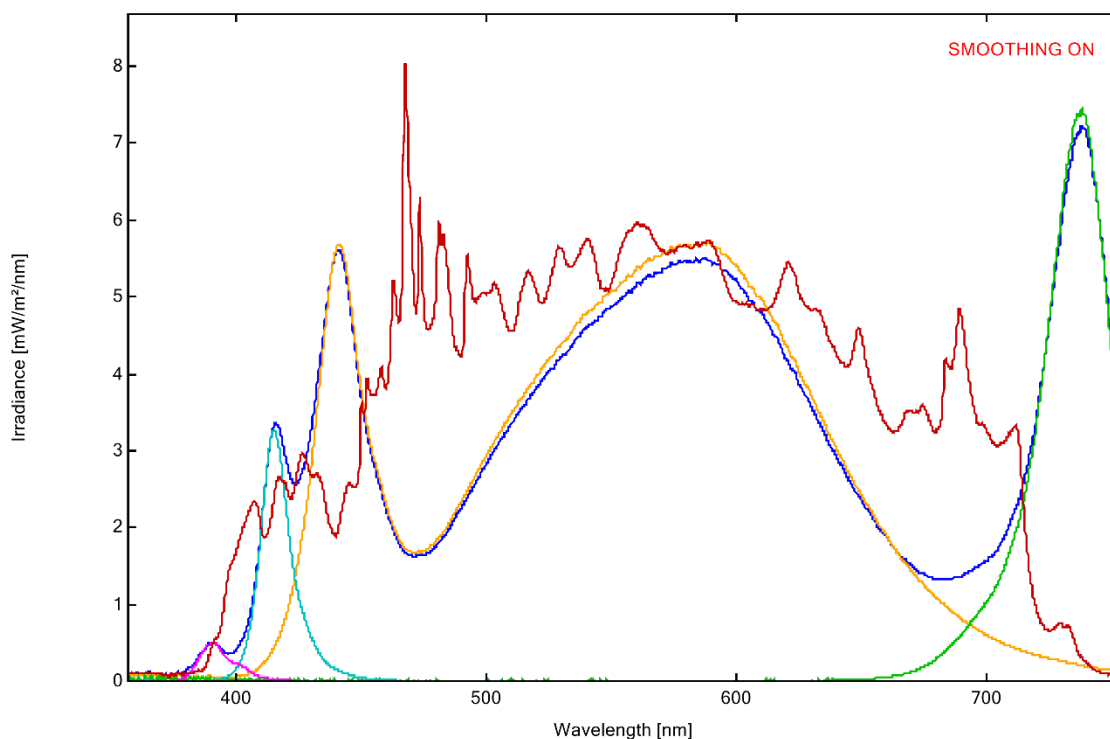
### **3.2.4 Experiment D) Reciprocitet**

Test genomförs på Göteborgs universitet, institutionen för kulturvård 2016.04.18- 2016.05.27. Retroreflekterande microfading-tester 1 används med en lins på 30 $\mu$ m. I detta experiment undersöks vid vilken dos reciprocitetsfaktorn bryts för indigo. Test utförs på indigo med medelfärgstyrka. Belysningens intensitet och tid för exponering regleras för att underundersöka om graden av färgförändring förhåller sig linjärt till dessa faktorer. LED testas med full intensitet (100%) i 10 minuter. I nästa test sänks intensiteten till 50% och pågår i 20 minuter. Slutligen sänks intensiteten till 25% och testet pågår i 40 minuter. Test med Xenon genomförs med hot mirror-filter. I första testet används xenons fulla intensitet (100%) och pågår i 10 minuter. I nästa test regleras intensiteten med filter ND 0,3 till 30% och pågår i 10 minuter.

### 3.3 Resultat

#### 3.3.1 Experiment A) Spektralfördelning

I figur 12 visas spektralfördelningen för LED och xenon. Strålningseffekt, belysningsstyrka och  $\Delta E_{00}$  efter 10 min sammanfattas i tabell 6.  $\Delta E_{00}$  efter 10 min är ett genomsnitt av de tre upprepningar som gjorts för varje ljuskälla.



Figur 12. Spektralfördelning för LED och xenon. Röd linje: xenon med ND 0,5 och hot mirror-filter. Blå linje: LED med samtliga kanaler 100%. Orange linje: LED varm vit 100%. Cyan linje: LED 420nm 100%. Magenta linje: LED 385nm 100%. Grön linje: LED 755nm 100%.

Tabell 6. Ljusbildning och färgförändring för LED och xenon

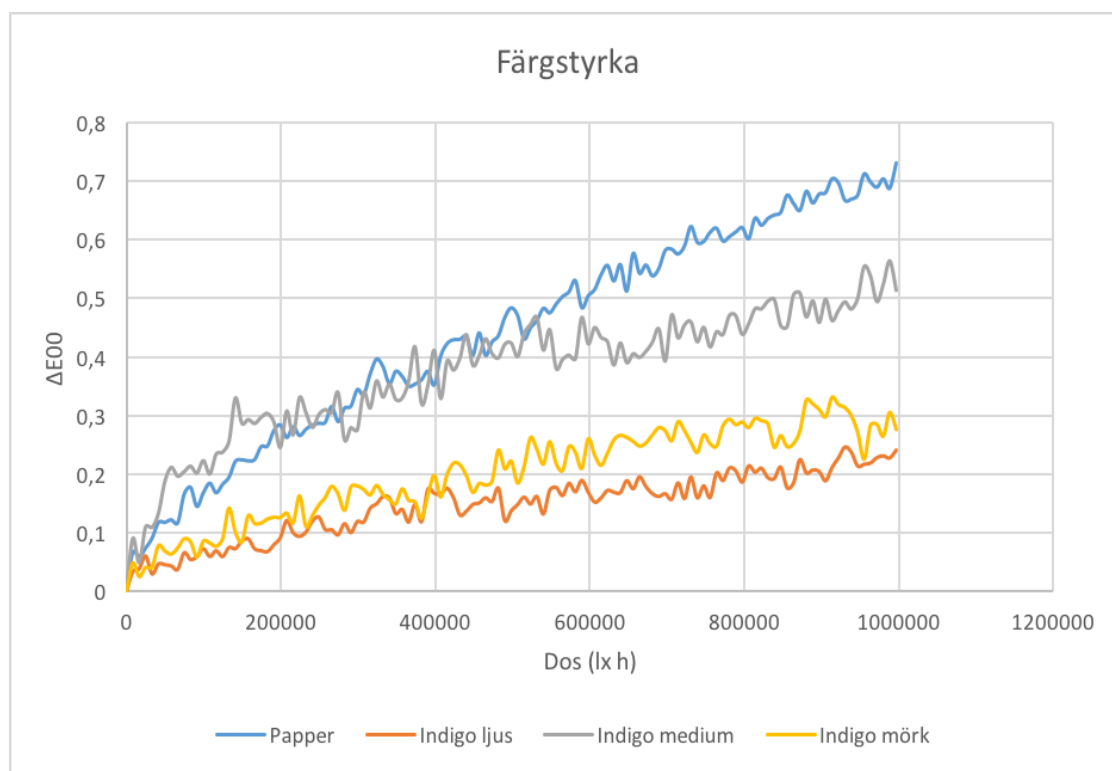
	Strålningseffekt (w/m <sup>2</sup> )	Belysningsstyrka(lx)	$\Delta E_{00}$ efter 10 min
LED 100%	3,52	876,3	0,52
Xenon 30%	4,88	1848	0,56

Då xenons och LED:s strålningseffekt har matchats står det klart att xenons nedbrytningsförmåga är aningen större eftersom ett högre  $\Delta E_{00}$  nås. Efter ljusbildning ser vi att ljuskällornas strålningseffekt är mycket lik. Belysningsstyrkan ger dock vitt skilda värden.

#### 3.3.2 Experiment B) Färgstyrka

Tre färgstyrkor samt underlaget (gelatinbehandlat lin- och bomullsfiberpapper) testas med microfading och resultatet redovisas i figur 13. Varje kurva är genomsnitt av tre upprepningar. Vi kan här se att störst färgförändring sker hos pappret och därefter hos indigo medium.

Indigo mörk genomgår mindre färgförändring och indigo ljus minst. Pappret genomgår en blekning, vilket framkommer i det stigande L-värdet samt i b-värdet som rör sig från gult mot blått (se tabell 7).



Figur13. Färgförändring relaterat till färgstyrka

Tabell 7.  $\Delta L$ ,  $\Delta a$ ,  $\Delta b$ -värden för prov

	$\Delta L$	$\Delta a$	$\Delta b$
Papper	0,75	0,22	0,60
Ljus	0,16	0,05	0,24
Medel	0,18	0,30	0,78
Mörk	0,19	0,11	0,24

### 3.2.3 Experiment C) Spegelreflektion

I figur 14-16 redovisas resultat från microfading-testen med kurvor för färgförändring av indigo med eller utan innehåll av spegelreflektion. Varje färgstyrka redovisas för sig och kurvorna är genomsnitt av de tre upprepningar som gjorts för varje koncentration.

Distansen mellan CIE  $L^*a^*b$ -koordinaterna mätta med spektrodensitometer och CIE  $L^*a^*b$ -koordinaterna mätta vid microfading-test med innehåll av spegelreflektion och utan innehåll av spegelreflektion redovisas i tabell 8-10. Varje färgstyrka redovisas för sig.

De färgkoordinater insamlade med spektrodensitometer betraktas som mest korrekta då spektrodensitometern använder en större yta för beräkning av färgkoordinater.

Vi kan i tabell 8-10 se att färgkoordinaterna beräknade med innehåll av spegelreflektion (insamling av reflekterat ljus i  $0^\circ$ ) har störst distans till färgkoordinaterna hämtade med spektrodensitometern, medan dem utan innehåll av spegelreflektion har mindre distans. Av

denna data kan slutsatsen dras att mer reproducerbara färgkoordinater beräknas utan innehåll av spegelreflektion, alltså med 10° vinkel för insamling av reflekterat ljus. Indigo med ljus färgstyrka (tabell 8) är dock ett undantag. Det är överlag svårt att mäta färg med ljus färgstyrka, speciellt hos akvarell då pigmentdistributionen är mer ojämn och pigmentkornen kan ligga glest. Då punkten för mätning vid microfading-test är mycket liten är det svårt att finna en representativ punkt. Vid en av upprepningarna med mörk färgstyrka (tabell 10) mättes färgkoordinater vitt skilda från övriga upprepningar. Troligtvis hamnade punkten för mätning på ett pigmentkorn. Detta understryker vikten av upprepningar vid microfading-test. Då denna upprepning utesluts ur datan ges ett mer överensstämmande resultat.

Tabell 8. Indigo ljus färgstyrka

	$\Delta L$	$\Delta a$	$\Delta b$	$\Delta E00$
fd-5 vs fd-5	0	0	0	0
fd-5 vs 0°	8,00	0,96	3,27	5,76
fd-5 vs 10°	21,12	0,47	2,86	15,32

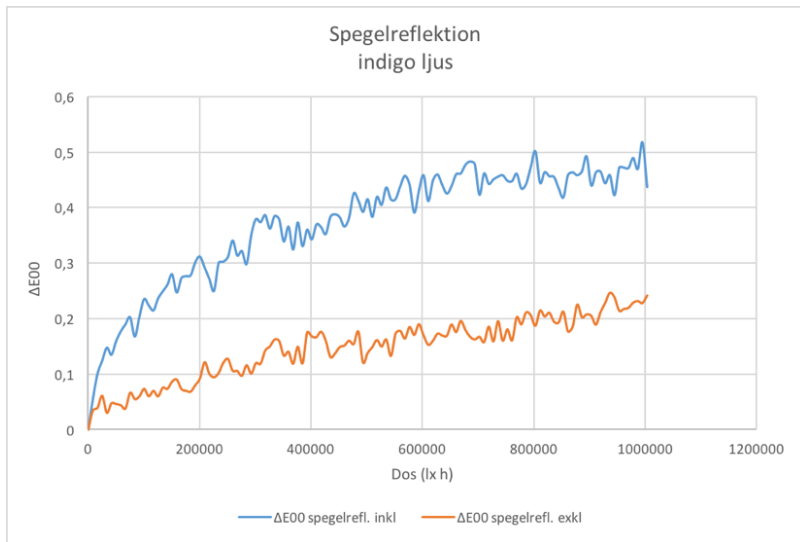
Tabell 9. Indigo medelfärgstyrka

	$\Delta L$	$\Delta a$	$\Delta b$	$\Delta E00$
fd-5 vs fd 5	0	0	0	0
fd-5 vs 0°	10,94	1,98	3,96	9,24
fd-5 vs 10°	11,75	0,38	0,50	8,88

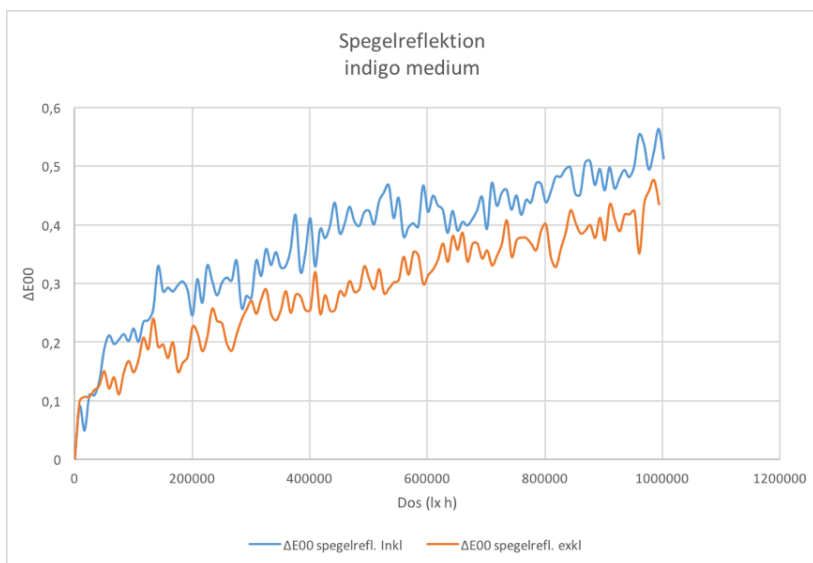
Tabell 10. Indigo mörk färgstyrka

	$\Delta L$	$\Delta a$	$\Delta b$	$\Delta E00$
fd-5 vs fd-5	0	0	0	0
fd-5 0° alla prov	12,73	3,34	4,43	12,99
fd-5 vs 10° alla prov	5,57	0,18	1,85	5,69
fd-5 vs 10° prov 2 exkluderat	0,82	0,26	3,56	2,80

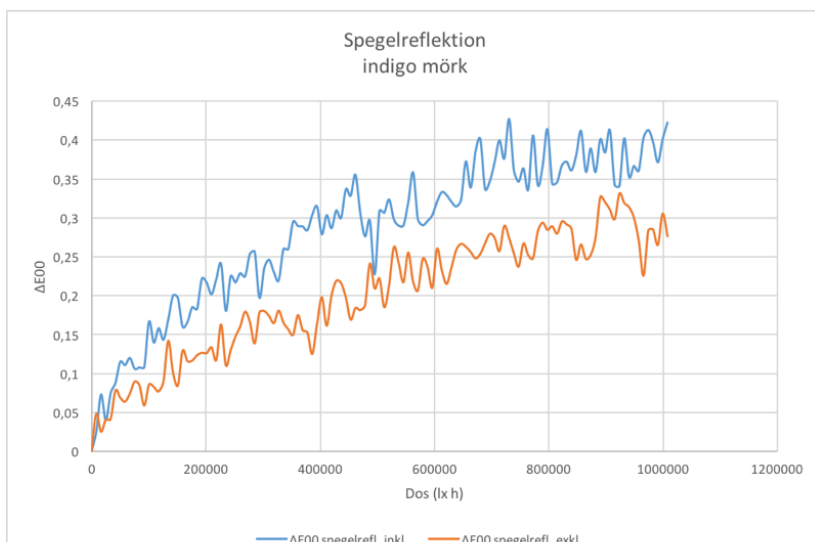




Figur 14. Färgförändring indigo ljus, spegelreflektion inkl/exkl.



Figur 15. Färgförändring indigo medium, spegelreflektion inkl/exkl.



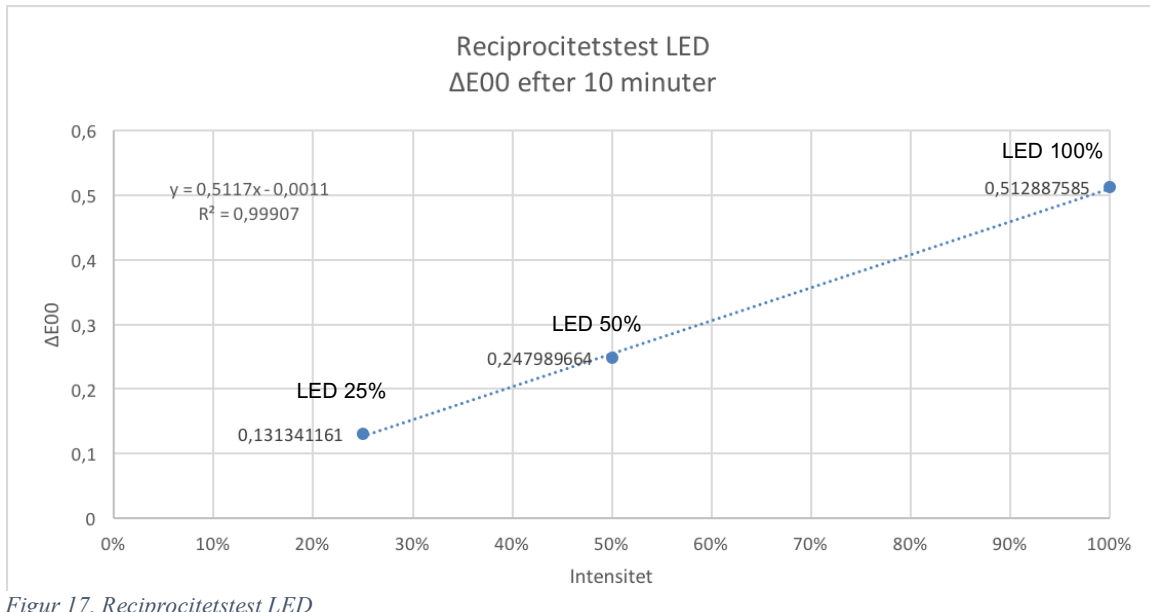
Figur 16. Färgförändring indigo mörk, spegelreflektion inkl/exkl.

### 3.2.4 Experiment D) Reciprocitet

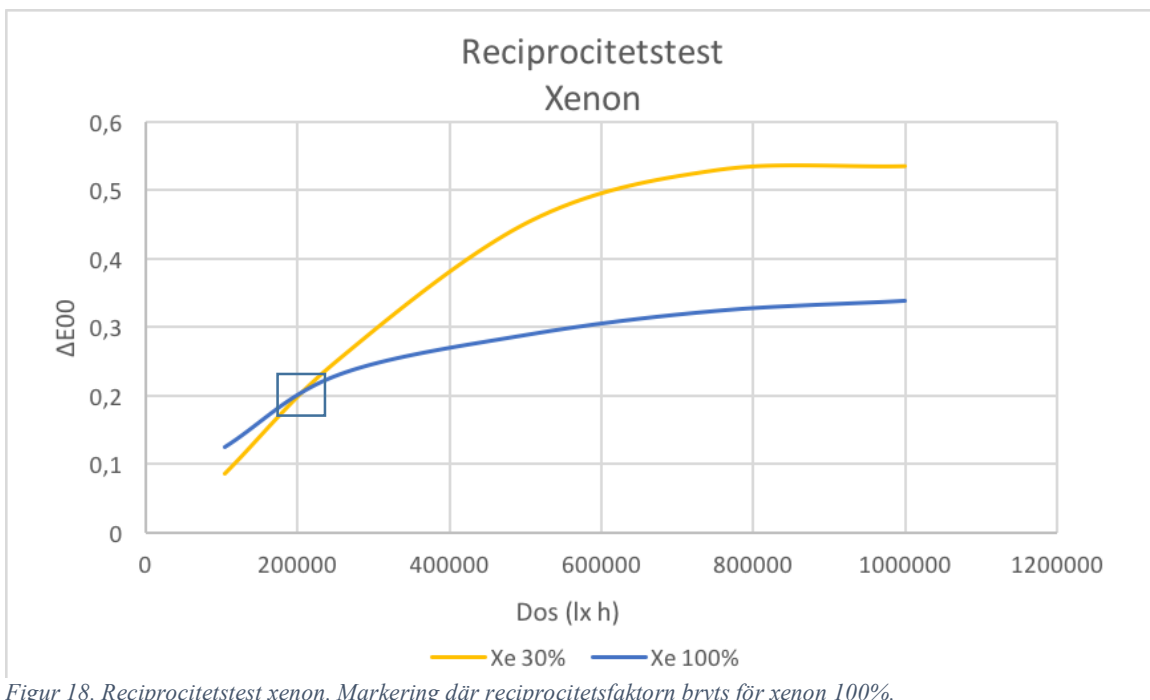
I figur 17 visas  $\Delta E_{00}$  för LED efter 10 minuter. LED 100% når  $\Delta E_{00}$  0,5, LED 50% når  $\Delta E_{00}$  0,25 och LED 25% når  $\Delta E_{00}$  0,125. Reciprocitetsprincipen håller för LED.

I figur 18 visas kurvor för färgförändring av indigo med xenon 100% och 30%.

Reciprocitetsprincipen håller inte för xenon 100% utan bryts vid en dos på 200000 luxtimmar.



Figur 17. Reciprocitetstest LED



Figur 18. Reciprocitetstest xenon. Markering där reciprocitetsfaktorn bryts för xenon 100%.

## 4 FALLSTUDIE- CARL LARSSONS 'LISBETH' 1894

### 4.1 Introduktion

Mätningar på Carl Larssons akvarell 'Lisbeth' görs med microfading för att finna vilka punkter som är verkets mest ljuskänsliga. Det kommer undersökas om/hur denna information kan användas som underlag till beslut om riktlinjer för ljusexponering vid utställning av Carl Larssons akvareller på Göteborgs konstmuseum.

#### 4.1.1 Beskrivning av studieobjekt

'Lisbeth' (se figur 19, 20) är en målning av Carl Larsson från Göteborgs konstmuseums samling med katalognummer GKM F75. Det är en akvarell på papper där även tusch och gouache har använts. Målningens mått är 45,5x25,5 cm (utan ram). Idag ställs målningen ut i Fürstenbergska galleriet II (sal 17).

Lisbeth är Carl Larssons dotter, här tre år gammal. Porträttet är målat i konstnärens ateljé på Stora Glasbruksgatan 15 i Stockholm. Interiören går att finna i flera porträtt, bland annat 'Suzanne' som ingår i samma serie. Målningen är beställd av Pontus och Göthilda Fürstenberg. Pontus Fürstenberg var en mecenat med stort inflytande över Göteborgs konstliv. Han intresserade sig särskilt för nordisk samtidskonst och hade en nära relation till Carl Larsson. Paret Fürstenberg var barnlösa och beställde ett flertal akvarellporträtt av Larssonbarnen. 'Lisbeth' är det första verket i en serie på tre målningar där 'Suzanne' (1894) och 'Ulf och Pontus' (1894) utgör de resterande. I ett brev till Carl Larsson uttryckte Pontus Fürstenberg sin belåtenhet över serien och skrev att de hade placerat dem i rökrummet för att dagligen ha dem för ögonen (...). Efter sin död 1902 testamentarades Fürstenbergs konstsamling, inklusive 'Lisbeth', till Göteborgs konstmuseum (Fredlund 2001 sid. 2-3, 36-41; Wiberg 2009 sid. 196-197).

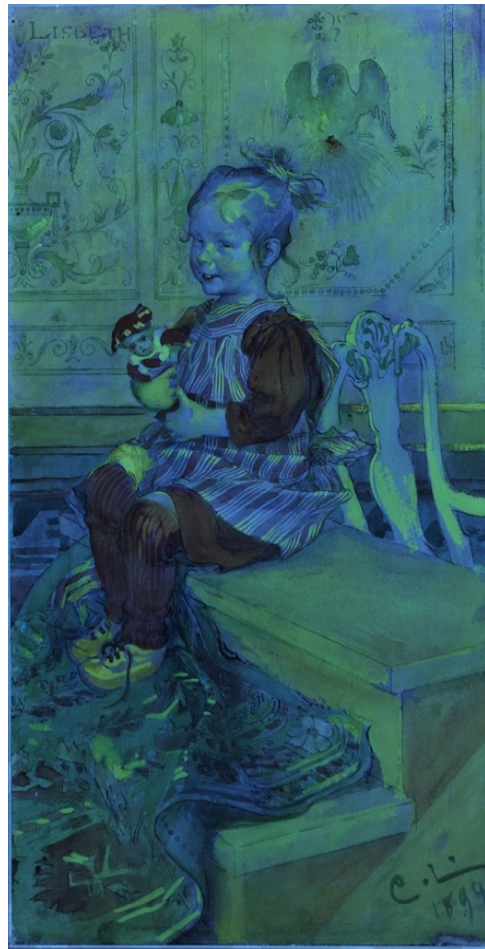
#### 4.1.2 Retroreflekterande microfadig-tester 2

Detta instrument är konstruerat och ägs av Tomasz Lojewski, Sr Lecturer Jagiellonian University Dept. Chemistry. Instrumentet är retroreflekterande och ljuskällan som används är en 75 W xenonlampa. Med en optisk fiber förs ljusstrålen från lamphuset till en stråldelare där det bryts och sänds ned mot linsröret. I linsröret sitter två linser inom brännvidds avstånd från varandra. De samlar och fokuserar ljuset ned mot provet. Det reflekterade ljuset samlas genom samma linsrör, sänds igenom stråldelaren och förs via en optisk fiber till en spektrometer.

Vinkeln för belysning/insamling av reflekterat ljus är låst vid 0°/45°. Framför linserna sitter ett hjul med hål i fyra storlekar. Hjulet kan placeras så att 0%, 36%, 64%, 84% eller 100% ljusgenomsläpp tillåts. Instrumentet är kopplat till mjukvaran *Fadometer* som används för att analysera spektral data och styra instrument. Ljusgenomsläpp kan regleras, sondhuvudet kan föras upp och ned och funktion för autofokus finns.



Figur 19. Carl Larssons Lisbeth, 1894. Foto: Göteborgs konstmuseum



Figur 20.. Carl Larssons Lisbeth, 1894. UV. Foto: Göteborgs konstmuseum

Inför ett test behöver spektrometern kalibreras med standarder för vitt och svart (material med 0% och 100% reflektion). Kalibrering upprepas varje timma. Som vit referens samlas spektrum från bariumsulfat och som referens för svart samlas spektrum med hålhjulet stängt. Instrumentet fokuseras genom att föra sondhuvudet upp eller ned. Intensitetskurvan går att följa i *Fadometer*, instrumentet är fokuserat då kurvan är maximerad.

Före ett test anges stopförutsättningar, det kan anges i tid,  $\Delta E$  eller dos (luxtimmar). Ett eller flera alternativ kan väljas och testet stoppas när första stopförutsättningen nås. Innan test anges också inom vilka tidsintervall spektrum ska samlas.

*Fadometer* konverterar insamlade spektrum till färgkoordinater med CIE 1976/2000  $L^*a^*b^*$ -ekvation för  $2^\circ$  standardåskådare. Då test utförs kan en kurva med  $\Delta E$  (76 eller 00) / förfluten tid följas i realtid. Då ett test sparas skapas två filer; en för färgförändring innehållande data för tid/ $L^*, a^*, b^*$  samt  $\Delta L$ ,  $\Delta a$ ,  $\Delta b$  och  $\Delta E$  (76 och 00) och en innehållande data för reflektion/våglängd.

### Ljusbmätning och dosberäkning för Retroreflekterande microfading-tester 2

För att beräkna den intensitet koncentrerad

i belysningspunkten används värdena i tabell 11.

Värdena kommer ifrån informant 4 och bygger på mätningar gjorda av denna informant. Med hjälp av dessa beräknas multipliceringsfaktorn enligt följande:

Foto/radiometerns sensorarea

belysningspunktens area

$$706,84 / 0,26 = 2770,09$$

Tabell 11. Värden för retroreflekterande microfading-tester 2

1. Belysningspunktens diameter	0,57 mm
2. Belysningspunktens area	0,26 mm <sup>2</sup>
3. Strålningseffekt	36,6 w/m <sup>2</sup>
4. Belysningsstyrka	12828 lux
5. Sensorarea	706,84 mm <sup>2</sup>

Med multipliceringsfaktorn och värdena ifrån ljusbmätningarna beräknas intensiteten koncentrerad i belysningspunkten.

$$12828 \text{ lux} \times 2770,083102 = 35700831,02 \text{ lux}$$

$$36,65 \text{ W/m}^2 \times 2770,083102 = 101523,5457 \text{ w/m}^2$$

I tabell 12 sammanfattas information om testen som genomförts. Ljuskällan genererar i belysningspunkten 35700831,0249307 lux och ett test pågår i 10 minuter (0,16638889 h). Detta ger en dos på 5940221,607 luxtimmar.

Tabell 12. Värden vid MFT

<b>Värden vid MFT</b>	
Belysningsstyrka	35700831,03 lux
Tid för belysning	0,17 h
Dos	5940221,61 lx h

Den dos som ljuskällan genererat under test räknas om till motsvarande antal museidagar och museiår. En uppskattning av ett museums standardbelysningsvanor för akvarell i utställning diskuteras fram i samråd med informant 1 (se tabell 13). Denna data är inte reell utan endast en uppskattning

Tabell 13. Belysningsstandard

<b>Belysningsstandard</b>	
Belysningsstyrka	55 lux
Belysningstimmar/ dag	10 h
Belysningsdagar/ år	350 d
Dos/ dag	550 lx h
Dos/ år	192500 lx h

Genom att dividera den dos som använts i microfading-testen med standardvärdena för dos per dag och dos per år för museum så får vi värden för hur många dagar och år dosen vid testen motsvarar. Se uträkning i tabell 14.

Tabell 14. Dos i museiklimat

<b>Likvärdigt antal museidagar</b> (Dos vid MFT / standarddos per dag)	<b>10800,40 dagar</b>
<b>Likvärdigt antal museiår</b> (Dos vid MFT /standarddos per år)	<b>30,86 år</b>

## 4.2 Genomförande

Under en vecka (2016.03.02-2016.03.09) genomförs microfading-tester på Göteborgs konstmuseum. Instrumentet som används är Retroreflekterande microfading-tester 2. Spektrum samlas och sparas varje sekund och test genomförs med ljuskällan (xenons) fulla intensitet. Test avslutas då  $\Delta E_{00}$  når 2,5 alternativt efter 10 minuter. Stopförutsättningarna bestäms i samråd med informant 3. Då JND anses vara  $\Delta E$  3 bestäms ett värde under detta.

Punkter för mätning bestäms i samråd med Informant 1, informant 2 och informant 3. För att få en så rättvisande bild som möjligt av akvarellens helhetstillstånd så görs minst tre upprepningar för varje färgområde. Målningen undersöks i UV-ljus och under arbetsmikroskop till stöd för att välja lämpliga punkter för mätning.

Till stöd för att tolka resultatet av testerna skapas reflektionsspektrum för varje mätpunkt. Detta görs i Excel. Filen innehållande information om våglängd/reflektion öppnas. Den första raden är värden för den använda vitreferensen för varje våglängd, resterande rader innehåller värden för provets reflektion vid varje våglängd. Ett genomsnitt av de första 10 insamlade reflektionsspektrumen beräknas. Dessa värden divideras med värdena för vitreferensen och multipliceras sedan med 100. Med denna data skapas ett reflektionsspektrum.

För att kunna identifiera pigment hämtas referensreflektionsspektrum från Fiber Optics Reflectance Spectroscopy (FORS) spectral database of historical pigments in differens binders (Cosentino 2014 sid 53-65). Datan i dessa reflektionsspektrum är insamlade vid annan våglängdsintervall och inom bredare våglängdsband än i dem för testerna, y-värdena är därför inte kompatibla. För att kunna ställa dem emot varandra öppnas de i mjukvaran *Waves*.

Till stöd för att identifiera pigment skapas differensspektrum ur första derivatan för reflektionsspektrumen. En kurva i detta spektrum markerar var en rörelse i reflektionsspektrumet äger rum. På så sätt kan pigment trots exempelvis olika färgstyrkor, hamna inom samma kurva.

### 4.3 Resultat

På akvarellen utförs 26 microfading-test, punkterna för dessa är markerade i figur 21. Resultatet redovisas i tabell 15 där  $\Delta E_{00}$  efter 10 minuter samt relativ grad av färgförändring, relaterat till BW-standarder anges. Två mätningar, för mätpunkt 8 och 9, avbryts innan 10 minuter eftersom de når  $\Delta E_{00} 2,5$  vilket är den andra angivna stopförutsättningen. De mätpunkter i tabell 15 markerade med (\*) är genomsnitt av flera upprepningar i samma färgområde med liknande resultat. Tabell med resultat för samtliga mätpunkter finns i bilaga. Där finns även grafer för färgförändring av samtliga mätpunkter samt BW-standarder. Efter 10 minuter beräknas punkten för mätning ha exponerats för 5940221,61 luxtimmar, likvärdigt med 10800 dagar eller 31 år i utställningsmiljö (se uträkning i Retroreflekterande microfading-tester 2; Ljusbildning och dosberäkning för Retroreflekterande microfading-tester 2 sid. 34-35).

Det kan ur resultatet utläsas att majoriteten av mätningarna visar låg ljuskänslighet, under BW3. De känsligaste punkterna går att finna i de röda färgområdena. I dessa områden finns dock en stor spridning i ljuskänslighet. I vissa punkter mäts låg ljuskänslighet och i vissa punkter mäts hög ljuskänslighet i områden som förefaller vara av samma pigment/pigmentblandning. Reflektionsspektrum skapas för att studera punkternas eventuella olikheter (se figur 24). Vi kan se två trender; punkterna i Lisbeth och dockan har en skarpare kurva än punkterna i bakgrund och trappa. Ett pigments reflektionsspektrum kan särskiljas genom att studera vid vilken våglängd rörelser i spektrumet sker. Två kurvor vars rörelser inträffar vid samma våglängd, trots att de sker vid olika intensitet är troligtvis samma pigment, men har olika färgstyrka. I detta fall är kurvornas rörelser lika, men något förskjutna. Dess reflektionsspektrum jämförs med referenser för pigment i gummi arabicum hämtade från FORS databas. De punkter mätta i 'Lisbeth' och dockan visar likheter med vermilion (se figur 25). Ur reflektionsspektrum skapas differensspektrum ur första derivatan för att lättare kunna studera var i spektrumet rörelserna sker. Likheter med kurvan för rödockra kan då ses (se figur 26). Det ter sig troligt att en blandning innehållande minst dessa två pigment kan ha använts.

Reflektionsspektrum för de blå färgområdena (stol, matta och panel) skapas (se figur 27). Dessa jämförs med referensreflektionsspektrum från FORS databas för blå pigment (se figur 28). Det står klart att pigmentet i Lisbeth med största sannolikhet inte är indigo, däremot finns stora likheter med blue bice. Blue bice är ett pigment av kopparkalciumkarbonat och tenderar därmed att bli mer grönt till följd av exponering för ljus. (Church 1905 sid. 249; Kremer pigmenter 2012). Kurvan för mätpunkt 1 panel visar ett annat beteende än övriga blå kurvor, troligtvis är pigmentdistributionen så låg i detta område och en mätning av den röda bakgrunden har istället skett.

Tabell 15. Resultat av MFT på 'Lisbeth'. Mätpunkter markerade med (\*) är genomsnitt av flera upprepningar i samma färgområde med liknande resultat. Se bilaga för fullständigt resultat

Färg	Mätpunkt	$\Delta E_{00}$	ISO(#BWS)
Grön	Bakgrund(*)	0,24	>BW3
Gul	Panel(*)	0,19	>BW3
Blå	Bakom sko(19)	0,14	>BW3
Blå	Panel(1)	0,33	>BW3
Blå	Matta(20)	0,15	>BW3
Blå	Stol(*)	0,27	>BW3
Röd	Dockans hatt(8)	2,25 (7,57 min)	BW1-2
Röd	Dockans hatt(5)	1,34	BW2-3
Röd	Dockans hatt(6)	0,69	>BW3
Röd	Dockans hatt(7)	0,77	>BW3
Röd	Dockans arm(3)	1,38	BW2-3
Röd	Dockans bröst(4)	2,42	BW1-2
Röd	Axel(9)	2,50 (7,48 min)	BW1-2
Röd	Förkläde(21)	0,31	>BW3
Röd	Väggkant(*)	1,06	BW2-3
Röd	Trappa(*)	0,16	>BW3



Figur 21. Carl Larssons 'Lisbeth', 1894. Foto: Göteborgs konstmuseum. Punkter för mätning markerade



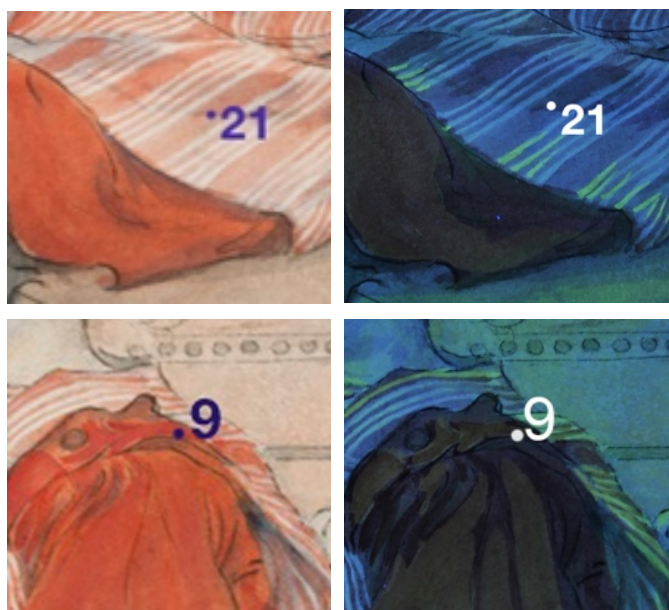
Några punkter ur de röda färgområdena studeras närmare för att finna eventuell förklaring till det skilda färgförändringsbeteendet.

Av de fyra mätningar gjorda i dockans hatt uppvisar två punkter ljuskänslighet (mät punkt 5 och 8) och två punkter ljusäktthet (mät punkt 6 och 7). I figur 25 visas reflektionsspektrum för mät punkt 5 och 6 som får agera representanter för den ljuskänsliga och ljusäkta gruppen. Kurvornas rörelser inträffar parallellt, mät punkt 5 har dock lite lägre reflektion i det blå området. Punkterna studeras under arbetsmikroskop men inga oilkheter går att finna. Då punkterna studeras under UV-ljus framträder en fluorescerande slöja i näheten av mät punkt 5.

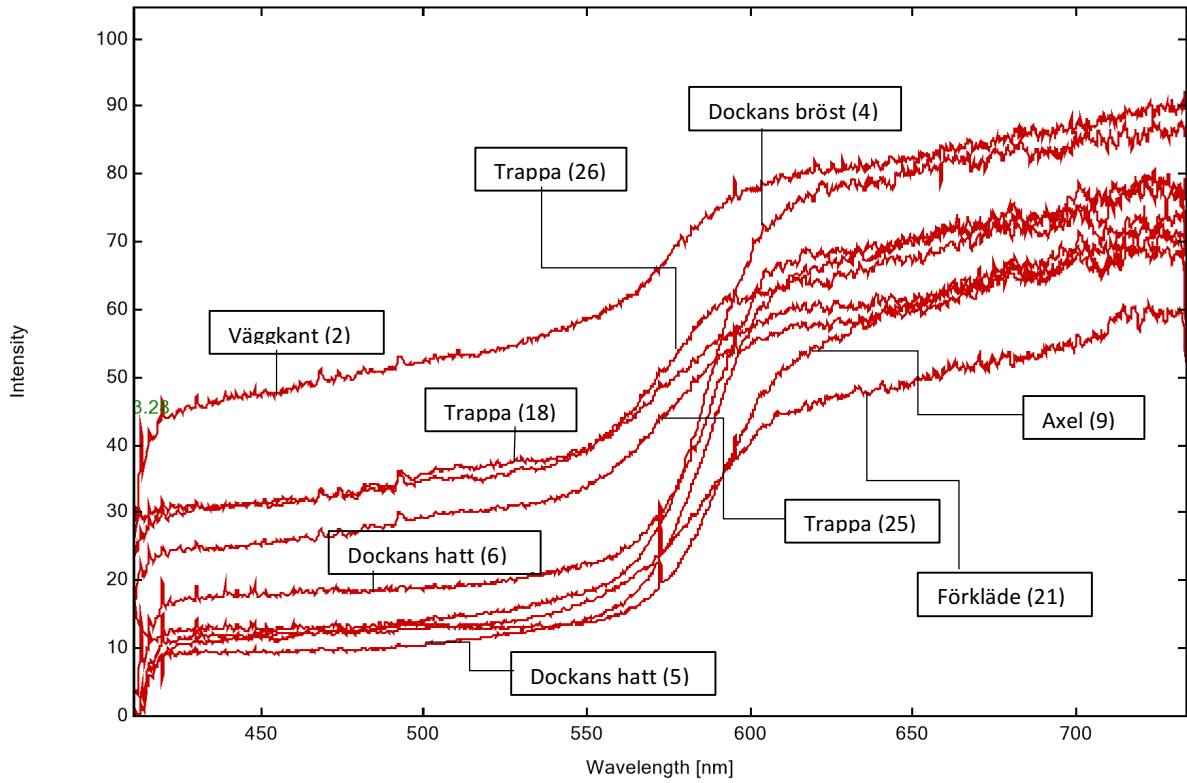


Figur 22. Detaljbild ur figur 19,20. Mät punkt 5, 6, 7, 8

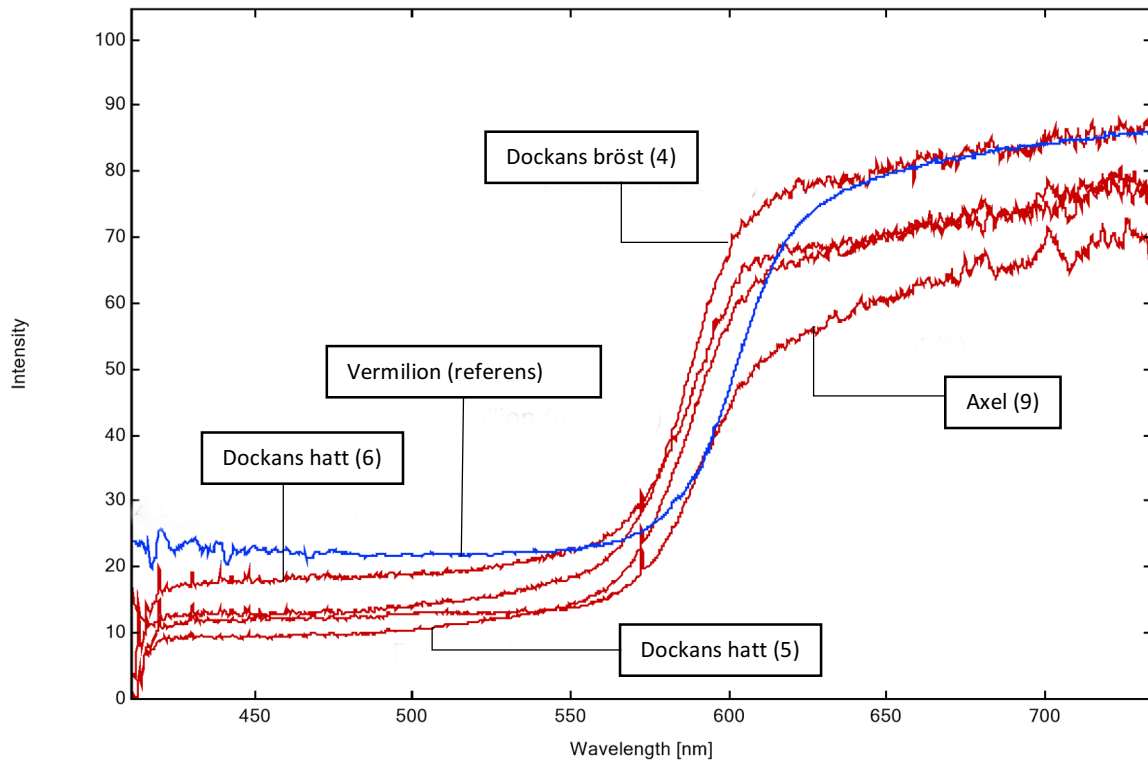
Mätningarna i Lisbeths axel och förkläde studeras närmare. Mät punkt 9 visar hög ljuskänslighet och mät punkt 21 visar låg ljuskänslighet. Punkternas reflektionsspektrum jämförs (se figur 24) och kurvan för punkt 21 är lägre i det röda området av spektrumet, i övrigt följer kurvorna varandra. Punkterna studeras under UV-ljus och i arbetsmikroskop, men inget anmärkningsvärt går att finna.



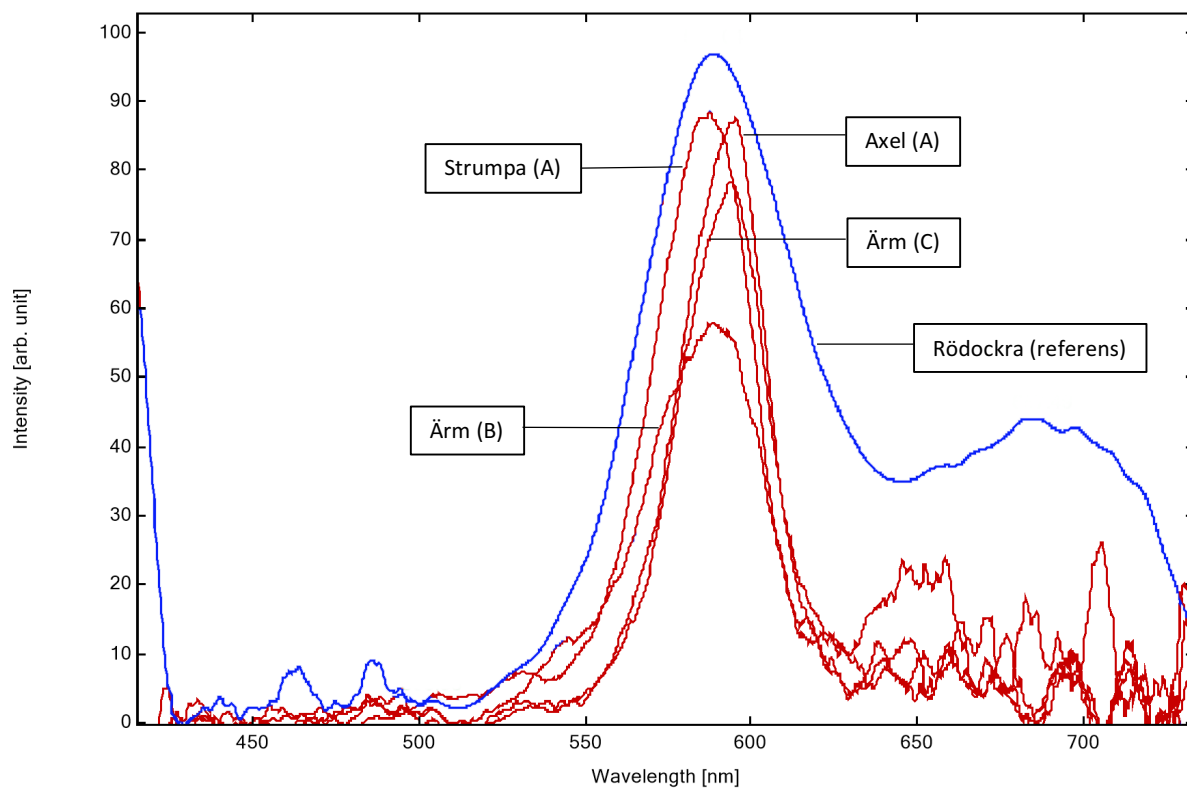
Figur 23. Detaljbild ur figur 19,20. Mät punkt 9 & 21



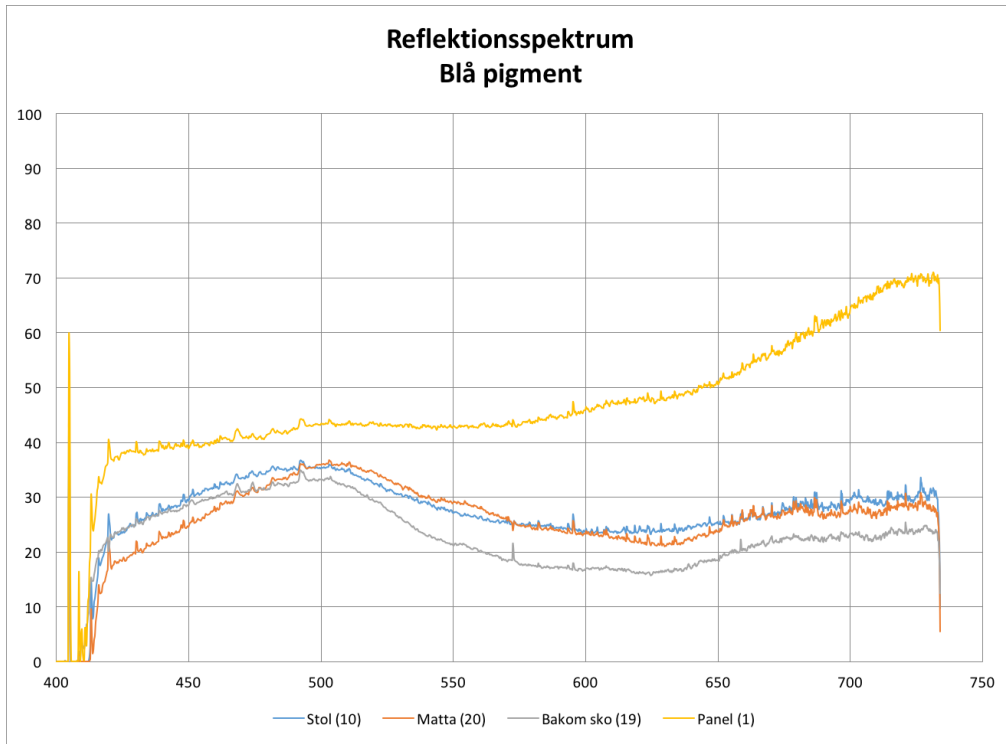
Figur 24. Reflektionsspektrum röda pigment 1



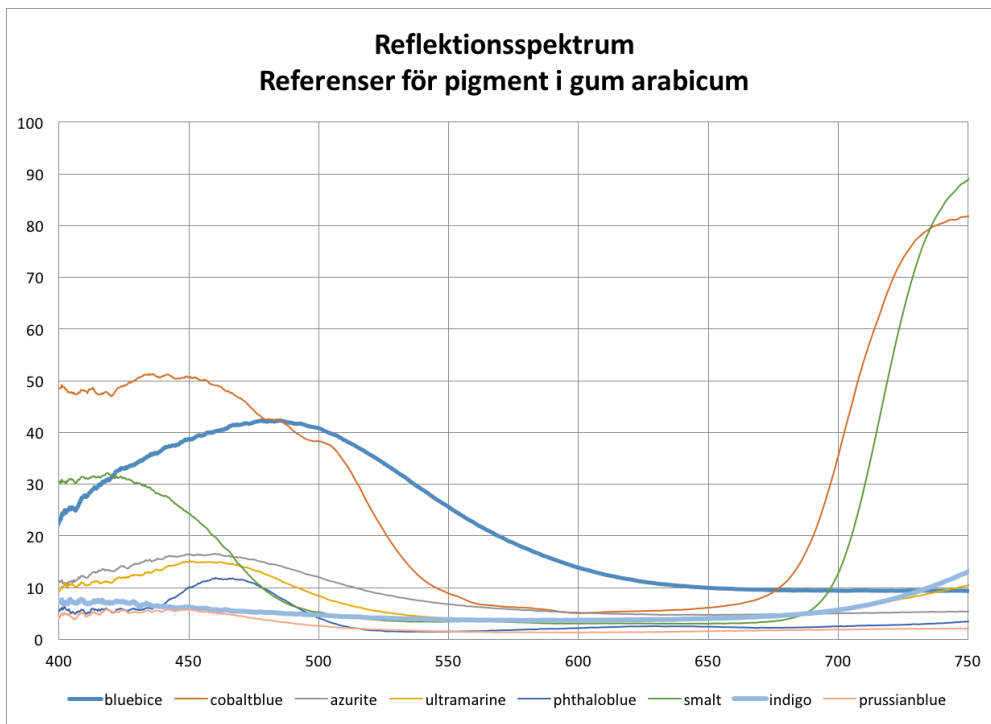
Figur 25. Reflektionsspektrum röda pigment 2



Figur 26. Differensspektrum ur första derivatan av reflektionsspektrum för röda pigment



Figur 27. Reflektionsspektrum blå pigment



Figur 28. Reflektionsspektrum referenser för blå pigment

## 5 DISKUSSION OCH SLUTSATS

### 5.1 Indigostudie

Experiment A) *spektralfördelning* visar att xenon orsakar mer nedbrytning av testmaterialet än LED då de båda ljuskällornas strålningseffekt matchas. Detta beror på hur strålningen är fördelad i spektrumet för ljuskällorna. Xenon har större mängd energirik strålning i indigos aktiva spektrum. Genom ljusmätningar ges värden för ljuskällornas belysningsstyrka och strålningseffekt. Strålningseffekt ger ett mått på all den strålning som är närvarande, ljuskällorna får då lika värden. Belysningsstyrkan ger ett mått på den strålning som våra ögon kan uppfatta och xenon får då ett högre värde, eftersom dess spektrala fördelning är mer koncentrerad till de våglängder som våra ögon har en högre mottaglighet för.

För att få en uppfattning av en ljuskällans nedbrytningsförmåga av ett material bör alltså ljuskällans spektralfördelning tillsammans med materialets aktiva spektrum studeras. Genom att enbart mäta strålningseffekt så ges ingen information om var energin är fördelad i spektrumet och vilken energi som kommer att absorberas. Belysningsstyrka är ett mått relaterat till perception och berättar inte mycket om potential till kemisk nedbrytning

Vid microfading är spektralfördelning en aspekt som bör tas med i beräkningen. Om syftet med testet är att förutse färgförändring av ett material till följd av ett specifikt ljusklimat, t.ex. i utställningsmiljö är det viktigt att spektralfördelningen är densamma vid testet. Då är LED mest lämpligt. Det är standard att använda xenon vid färgmätningar, eftersom dess spektralfördelning är lik CIEs belysningsstandard D65, under vilken CIE  $L^*a^*b^*$ -koordinater är tänkta att beräknas. Xenon innehåller en större mängd korta våglängder än vad som är vanligt för museibelysning och har därför generellt en större nedbrytningsförmåga. Därför bör xenon vid microfading-test användas för att ge relativ grad av färgförändring.

I experiment B) *färgstyrka* undersöks hur provets färgstyrka påverkar den färgförändring som kan utläsas vid microfading-test. Den mörka färgstyrkan innehåller hög pigmenthalt och den ljusa färgstyrkan innehåller låg pigmenthalt. Resultatet av detta experiment stämmer överens med tidigare forskning (Druzik 2010). Störst färgförändring sker i mellanfärgstyrkan, därefter i den mörka och ljusa färgstyrkan. I detta experiment undersöks också underlagets färgförändring och hur den eventuellt kan påverka pigmentets färgförändring. Efter experiment på pappret som använts i studien kan det ur dess  $\Delta L$ - $\Delta a$  och  $\Delta b$ -värden utläsas att färgförändringen sker i ett stigande  $\Delta L$ -och  $\Delta b$ -värde. Det betyder att en blekning, ej gulning, sker. Med största sannolikhet är det gelatinet som är ansvarig för denna färgförändring. Dess kromoforer bryts varpå en blekning sker. Testet på pappret är den mätning där störst färgförändring går att se. Minst färgförändring mäts i den ljusa färgstyrkan. Det beror på att pigmenthalten är låg och partikeldistributionen gles, det finns mindre pigment närvarande som kan genomgå färgförändring. Då pappret skiner igenom i detta prov så kan samma grad av färgförändring som hos provet med enbart papper väntas. Det sker inte; pappret genomgår störst färgförändring och den ljusa pigmentkoncentrationen minst. Troligtvis beror det på att gelatinet, som är vattenlösligt, har lösts upp då färgen har penslats på. Det kan tänkas att en större mängd gelatin samlats ut mot provets kanter. I den mörka och i mellanfärgstyrkan sker

samma reaktion. Att mindre färgförändring går att mäta i den mörka färgstyrkan beror troligtvis på att dess pigmentdensiteten är högre, färgen ligger tjockare och nedbrytningen sker endast i det översta skiktet. I mellanfärgstyrkan finns inte lika mycket underliggande pigment och färgförändringen blir tydligare.

I experiment C) *spegelreflektion* poängteras problematiken kring att mäta färg, eftersom upplevelsen av färg är något subjektivt. Ögats begränsningar gör att en homogen färgrymd är svårt att uppnå, en balans mellan matematik och upplevelse eftersträvas. Trots  $\Delta E_{00}$ , som är mer homogen än föregående uträkningar, beror realiteten i distansen mellan två färgkoordinater på var i färgrymden och var i toleranssfären vi befinner oss. Hur reella de givna färgkoordinaterna är påverkas av föremålets yta och hur mycket spegelreflektion som tas med i uträkningen. I experimentet visas att de mest överensstämmande färgkoordinaterna mäts utan innehåll av spegelreflektion.

Ytstruktur påverkar hur vi upplever färg eftersom ljuset bryts och reflekteras på olika vis beroende på om ytan är t.ex. blank eller irreguljär. När det spridda (diffusa) ljuset mäts tas dessa olikheter med i beräkning och vi får en färg som är mer överensstämmande med hur vi upplever den. Med spegelreflektion mäts föremålets färg oberoende av ytstruktur. Experimentet visar också att störst färgförändring sker med  $0^\circ$  vinkel för belysning. Detta eftersom vinkeln tillåter maximal penetration av materialet.

I experiment D) *reciprocitet* undersöks var reciprocitetsfaktorn bryts för indigo. Det står klart att den bryts för xenon 100% vid en dos på 200000 luxtimmar. I grafen för LED redovisas  $\Delta E_{00}$  efter 10 minuter. Grafen redogör hur färgförändringen förhåller sig till strålningseffekt och exponeringstid. Fotorespons placeras på X-axeln och intensitet på Y-axeln och när vi för in datan i denna graf ser vi att den förhåller sig linjärt till dessa faktorer. Lutningen för datan är i det närmaste 1, reciprocitetsfaktorn håller alltså.

I grafen för xenon redovisas kurvor för färgförändring med xenon 100% och xenon 30%. De båda testen har exponerats för samma dos. Enligt reciprocitetsprincipen borde xenon 30% nå ca en tredjedel av det  $\Delta E$  som xenon 100% når. Istället når xenon 30% ett högre  $\Delta E$  än 100%. Detta visar att reciprocitetsprincipen inte håller.

I experiment A) *spektralfördelning* redogörs att strålningseffekten för LED 100% och xenon 30% är likvärdig. Då reciprociteten håller för LED 100% kan slutsatsen dras att den också gör det för xenon 30%, ytterligare test för xenon anses inte nödvändigt.

Färgförändring av indigo sker genom fotooxidation. Vid belysning absorberar färgmolekylen fotoner och elektronsystemet blir exciterat. Den exciterade komponenten överför sin energi till en syremolekyl. Syre är i sitt normaltillstånd inte reaktivt och betecknas som triplettsyre. När syremolekylen exciteras övergår den till singlettsyre som är ett reaktivt tillstånd av syre. Denna form av syre kan reagera med organiska substrat och är delaktigt i nedbrytningen av indigo. Vid accelererad åldring används hög belysningsintensitet för att kompensera för kort exponeringstid. Risken är då att en kraftig reaktion skapas som kräver mer närvarande syre. Ifall reaktionen förbrukar det närvarande syret innan nytt syre hinner tas upp av materialet så stannas reaktionen av (Thomson 1978 sid. 186-187; Mills, White 1994 sid. 160-165.)

Detta är vad som sker i test med xenon 100%. I test med lägre intensitet fortgår reaktionen och färgförändringen eftersom diffusionen av syre sker i lägre takt.

I detta experiment förtydligas att reciprocitetfaktorn är en princip och inte en lag som bör testas innan den tillämpas. Pigmentets fysiska och kemiska egenskaper påverkar risken och magnituden av reciprocitetsfel; att förenkla det till en funktion av ett bestämt pigment eller belysningens intensitet kan vara missvisande. Risken för att reciprocitetsprincipen inte håller blir dock större ju högre belysningens intensitet är och ju flyktigare pigmentet är (Ford & Druzik 2013 sid 59-60; del Hoyo-Meléndez, Mecklenburg 2011).

Vi kan i experiment *A) spektralfördelning* se att xenons nedbrytningsförmåga är större än LEDs eftersom ljuskällan innehåller en större mängd korta våglängder. B.la. Ford skriver att graden av färgförändring överskattas vid microfading-test med xenon. (Ford 2011, sid. 56) Detta stämmer när ljuskällan används vid lägre intensitet, men i experiment *D) reciprocitet* framkommer att vid ljuskällans fulla intensitet underskattas resultaten eftersom diffusionen av syre sker i högre takt.

Indigo valdes som testmaterial då det föreföll med stor sannolikhet ha använts i fallstudien. Vid närmare undersökning visar det sig med större sannolikhet vara blue bice. Resultaten ifrån testmaterialet är dock fortfarande applicerat på fallstudien. Experiment *B) Färgstyrka* och *C) Spegelreflektion* är oberoende av pigment och i experiment *A) Spektralfördelning* är det snarare ljuskällan än pigmentet som undersöks. Experiment *D) Reciprocitet* är dock beroende av pigmentet. För ljuskänsliga pigment är det större risk att reciprociteten inte håller. I detta fall är dock marginalen så pass stor att den med största sannolikhet inte håller för Blue bice heller.

## 5.2 Fallstudie – Carl Larssons 'Lisbeth' 1894

Microfading-testen utförda på Carl Larssons 'Lisbeth', 1894 visar överlag på låg ljuskänslighet, under BW3. Målningens mest ljuskänsliga punkter går att finna i de röda färgområdena. Dessa hamnar mellan BW1 och 2.

Reciprocitetstesten utförda i indigostudien visar att reciprocitetsfaktorn med största sannolikhet inte har hållit vid testen utförda på fallstudien. Den dos som testen beräknats vara likvärdig med är därmed inte reell. Därför redovisas resultaten som relativ grad av färgförändring, relaterad till Blue Wool standarder.

Punkterna som testats med microfading i de röda färgområdena visar ett brett spann av ljuskänslighet, från BW1-2 till under BW3. Varför så skilda resultat kan mätas i vad som tycks vara samma pigment/pigmentblandning undersöks. Reflektionsspektrum för testpunkterna ifråga skapas och jämförs med varandra. Kurvorna är lika, men något förskjutna. Det tyder på att flera pigment har använts. Reflektionsspektrumet jämförs med referenser för pigment i gummi arabicum hämtade från FORS. De visar likheter med referenser för vermilion och rödockra. Detta är två ljusäkta pigment, att mer eller mindre av

något av dessa har använts i de mer ljuskänsliga punkterna skulle därför inte ge någon förklaring till det skilda färgförändringsbeteendet.

I indigostudien studeras hur pigmentets färgstyrka påverkar den grad av färgförändring som kan mätas med microfading. Experimentet visar att störst färgförändring går att se i mellanfärgstyrkor. Det förefaller troligt att det skilda färgförändringsbeteendet är relaterat till denna faktor. De ljusa färgstyrkorna i de röda områdena har låg pigmenthalt och gles partikeldistribution, i dessa punkter finns inte så mycket pigment närvarande som kan genomgå färgförändring. I de mörka färgstyrkorna är pigmenthalten hög och partikeldistributionen tät, nedbrytning av det överst liggande pigmentet framkommer inte lika tydligt eftersom det finns mer pigment liggandes under det nedbrutna lagret. De punkter i det röda området som visar på störst färgförändring tros vara mellanfärgstyrkor. I dessa punkter finns inte lika mycket pigment liggandes under som i de mörka färgstyrkorna och färgförändring syns tydligare i dessa punkter.

Syftet med denna studie var dels att undersöka hur resultatet av microfading-test kan användas för att underlätta beslut om riktlinjer för ljusexponering av Carl Larssons akvareller på Göteborgs konstmuseum. Verket som undersökts är från en tid, 1890-talet, då färgindustrin exploderat i utvecklandet och experimenterandet av nya industritillverkade färger, vilket försvårar att med säkerhet kunna identifiera innehållande pigment. Det är därmed svårt att luta sig mot publicerad data för pigments färgförändringsbeteende. Färgförändringsbeteendet i de fall då pigmentet med säkerhet har identifierats är svårt att med säkerhet förutse, eftersom det är avhängigt av pigmentets komposition och ifall det har genomgått tidigare färgförändring (Druzik & Ford 2013). I denna studie har en uppskattning av just detta verks ljuskänslighet gjorts. En diskussion om föremålets värde och betydelse är av stor vikt för att bestämma hur mycket färgförändring som accepteras inom ett visst tidsspann.

För att bestämma föremålets ljuskänslighet i sin helhet behöver de känsligaste punkterna sättas i kontext, dess betydelse för föremålets helhet behöver utvärderas.

En problematik som konservatorerna på Göteborgs konstmuseum kan se är att spridningen i resultaten över ljuskänsligheten inom samma färgområde gör tolkningen svår, och man kommer därför att fortsätta undersökningarna av verket som ingår i denna studie och utföra fler mätningar. Genom studierna anser man att frågan lyfts i organisationen och man ser en potential i metoden som kommunikationsmedel för att hitta en balans mellan belysningsstyrka och tid för exponering i utställning (Informant 2).

### **5.3 Slutsats**

Genom de experiment utförda i indigostudien dras följande slutsatser angående resultatet av microfading-testen på Carl Larssons 'Lisbeth', 1894.

Reciprocitetsfaktorn håller inte för de mätningar som genomförts på föremålet. Den använda ljuskällans strålningseffekt har varit för hög och diffusionen av syre har stannat av reaktionen.



Förklaringen till spridningen i ljuskänslighet i de röda områdena kan tänkas bero på färgens densitet. En större färgförändring mäts hos mellantonerna eftersom pigmenthalten är lägre än hos de mörka tonerna. Färgförändringen framträder tydligare eftersom det inte finns lika mycket underliggande pigment. I de ljusa tonerna är pigmenthalten låg och partikeldistributionen gles, där finns inte lika mycket pigment närvarande som kan genomgå färgförändring.

Det vinkelförhållande som använts ( $0/45^\circ$ ) för belysning och insamling av reflekterat ljus genererar maximal färgförändring och mest reproducerbara färgkoordinater.

Färgförändringen som sker under belysning med xenonlampa är ej jämförbar med den som sker i museimiljö på grund av ljuskällornas olika spektralfördelning. I experiment utfört i indigostudien framkommer att xenon vid lägre intensitet har större nedbrytningsförmåga eftersom dess spektralfördelning innehåller en större mängd energirik strålning. I mätningarna gjorda i fallstudien användes xenon med full intensitet, reaktionen stannas då av på grund av att diffusionen av syre sker i högre takt.

Denna uppsats har visat att resultatet av microfading-test går att applicera på föremål i museimiljö, i fallet för mätningarna gjorda på 'Lisbeth' dock med behållningen att resultatet redovisas som relativ grad av färgförändring pga. den använda ljuskällans spektralfördelning och intensitet.

För att använda resultaten behöver de känsligaste punkternas betydelse för helheten utvärderas. I nuläget arbetar Göteborgs konstmuseum vidare med fortsatta microfading-tester för att få tillräcklig mängd representativa data i framtagnandet av riktlinjer för ljusexponering. Man ser en god potential i metoden.

## 6 SAMMANFATTNING

Microfading är en analysmetod för att förutse ett materials färgförändring till följd av exponering för ljus. Det är en växande metod som i allt större utsträckning används på museum tillsammans med en ljuspolicy för att kontrollera färgförändring av föremål i utställning. Microfading är fortfarande en relativt obeprövad metod. Liksom med alla accelererade åldringstester finns stora osäkerheter kring att förutse långtidseffekten av belysning på ett föremål. Trots det grundas stora beslut om samlingens förvaltning på denna data. I denna uppsats undersöks några av dessa osäkerheter och hur de kan tas med i beräkning för att resultatet ska bli så tillförlitligt som möjligt.

Vilken ljuskälla som används med instrumentet har inverkan på det resultat som utvinns. Om syftet med testet är att förutse effekt på ett föremål till följd av utställning i museimiljö ges bäst resultat med en ljuskälla med liknande spektralfördelning. Då är LED ett gott alternativ. Om syftet med testet är att göra en grov och snabb uppskattning om ett föremål är ljuskänsligt eller inte kan xenon användas. Xenons spektralfördelning har ett större innehåll av korta våglängder än vad som är vanligt i museiklimat och därmed generellt en större nedbrytningsförmåga.

Pigmentets färgstyrka har inverkan på den med microfading utlästa färgförändringen. Störst färgförändring går att finna i mellantonen. Då ett föremål ska testas med microfading är detta bra att ha i åtanke.

Vinkeln för belysning och insamling av reflektion har inverkan på de färgkoordinater som beräknas samt på färgförändringsbeteendet. Genom att samla det reflekterade ljuset i 10-45° vinkel i förhållande till belysningen mäts den diffusa reflektionen, vilket är standard vid färgmätning. Ytan tas med i beräkningen och den färg som mäts stämmer bättre överens med hur vi upplever den. För vissa föremål, till exempel med högglansig yta, behövs dock spegelreflektion i mätningen. Eftersom glans inte ger någon information om färg ges bäst färgkoordinater om ytan inte tas med i beräkningen.

Reciprocitetsfaktorn avgör om resultatet av ett microfading-test går att översätta till resultat av långtidseffekt av exponering för belysning i museimiljö. Reciprocitetsfaktorn behöver testas, den påverkas av ljuskällans intensitet och materialets fysiska och kemiska egenskaper. Vid hög strålningseffekt och om pigment som testas är flyktigt är risken större att reciprocitetsfaktorn inte håller. Då ett polykromt föremål testas med microfading kan ett reciprocitetstest därför utföras på det flyktigaste pigmentet.

De test utförda på Carl Larssons akvarell 'Lisbeth', 1894 redovisas som relativ grad av färgförändring, relaterat till Blue Wool standarder eftersom hög belysningsintensitet använts och reciprocitetsfaktorn därför brutits. Resultatet ger oss en uppfattning om föremålet är ljuskänsligt eller inte. Överlag visade föremålet mycket liten tendens till färgförändring, under

Blue Wool 3. Några ljuskänsliga punkter gick dock att finna i de röda områdena, dessa motsvarar Blue Wool 1-2.

## 7 KÄLL- OCH LITTERATURFÖRTECKNING

### Tryckta källor:

Bunsen R.W, Roscoe H.E (1859) *Photochemische untersuchungen*, Ann. Phys. 108

Brokerhof A (2013) *Assessing Museum Collection, Collection Valuation in six steps*. Amersfoort: Cultural Heritage Agency

Church A. H (1905) *The Chemistry of Paint and Painting*. London: Seeley, Service & Co. Limited

Cosentino A, (2014) *FORS Spectral Database of Historical Pigments in Different Binders*. E-conservation Journal 2 (53-65)

Del Hoyo-Meléndez J, Mecklenburg M (2011) An Investigation of the Reciprocity Principle of Light Exposures Using Microfading Spectrometry *i: Spectroscopy Letters* (52-62)

Druzik J (2010) Oriel Microfading Tester (MFT): A Brief Description. I: *Research and Technical Studies Specialty Group Postprints 2*. (1-14)

Ford B (2011) Non-destructive microfading testing at the National Museum of Australia. AICCM Bulletin 32. (54-64)

Ford B & Druzik J (2013) Microfading: the state of the art for natural history collection i *Collection Forum*. (54-71)

Ford B & Smith N (2011) *Lighting Guidelines and the Lightfastness of Australian Indigenous Objects at the National Museum of Australia*, Lisbon: ICOM-CC 16th Triennial Conference

Fredlund B (2001) *Carl Larsson i Göteborgs Konstmuseum*. Göteborg: Göteborgs konstmuseum

Konica Minolta (2016:1) Specular Component Included (SCI) vs. Specular Component Excluded (SCE).<http://sensing.konicaminolta.us/2014/02/specular-component-included-vs-specular-component-excluded/> (2016-04-27)

Konica Minolta (2016:3) Spectrodensitometer FD-7/FD-5 ([http://www.konicaminolta.com/instruments/download/catalog/color/pdf/fd7\\_catalog\\_eng.pdf](http://www.konicaminolta.com/instruments/download/catalog/color/pdf/fd7_catalog_eng.pdf)) (2016-06-26)

Kremer pigmente (2012) Material Safety Data Sheet 10184 – Blue bice ([http://www.kremer-pigmente.com/media/files\\_public/10184\\_SHD\\_ENG.pdf](http://www.kremer-pigmente.com/media/files_public/10184_SHD_ENG.pdf)) (2016.07.30)

Lerwill A, Townsend J, Thomas J, Hackney S, Caspers C, Liang H (2015) Photochemical colour change for traditional watercolour pigments in low oxygen levels i: *Studies in Conservation* 60(1). (15-32)

MacAdam D (1942) Visual Sensitivities to Color Differences in Daylight i: *Journal of the Optical Society of America*, Vol 32. Sid. 247-274

Martin J, Chin J, Nguyen T (2003) Reciprocity Law Experiments in Polymeric Photodegradation: a Critical Review i: *Progress in Organic Coatings* 47. Sid. 292-311

Michalski S (2016) Agents of Deterioration: Light, Ultraviolet and Infrared  
<http://canada.pch.gc.ca/eng/1444330943476/1447939164689> (2016-06-20)

Mills J & White R (1994). *The Organic Chemistry of Museum Objects*. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann

Russell WJ, Abney WdW (1888) *Action of light on watercolours*. London: HMSO

Rusell, Winkworth (2009) *Significance 2.0 – a guide to assessing the significance of collection*.

Patel R & Davidson B (2011). *Forskningsmetodikens grunder: att planera, genomföra och rapportera en undersökning*. 4., [uppdaterade] uppl. Lund: Studentlitteratur

Sisefsky J (1995). *Om färg: uppfatta, förstå och använda färg*. Stockholm: Skandinaviska färginstitutet

Thomas J (2013) *Retro-Reflective Micro Fading Tester (Manual)*

Thomson G (1978). *The Museum Environment*. London: Butterworth

Wiberg T (2009) *Fürstenbergiska galleriet; mecenatparet, konstnärerna och samlingen*. Partille: Totte Wiberg och Warne Förlag

Whitmore P, Bailie C and Connors S (1999) Micro-fading tests to predict the result of exhibition: progress and prospect. (200-205)

Whitmore P, Pan X and Bailie C (1999) Predicting the fading of objects: identification of fugitive colorants through direct nondestructive lightfastness measurements i: *Journal of the American Institute for Conservation*, 38. (395-409)

Wright W.D (1981) The historical and experimental background to the 1931 CIE system of colorimetry i: Golden Jubilee of Colour in the CIE. Brandford UK: Society of Dyers and Colourists. (3-18)

### **Otryckta källor:**

Informant 1: Thomas J.

Samtal, Göteborgs konstmuseum 2016.03.02-2016.03.09

Informant 2: Borin M

Samtal Göteborgs konstmuseum 2016.03.02-2016.03.09

Informant 3: Pullano M

Samtal, Göteborgs konstmuseum 2016.03.02-2016.03.09

Informant 4: Lojewski T

Föreläsning och workshop, Göteborgs konstmuseum 2016.02.29 'MFT designed for conservators'

### **Bildförteckning;**

Figur 3-6: CIE:s färgrymder (2016)

[https://www.konicaminolta.eu/fileadmin/content/eu/Measuring\\_Instruments/4\\_Learning\\_Centre/L\\_D/The\\_language\\_of\\_Light/language\\_of\\_light.pdf](https://www.konicaminolta.eu/fileadmin/content/eu/Measuring_Instruments/4_Learning_Centre/L_D/The_language_of_Light/language_of_light.pdf)

Figur 8,9,12: Spektralfördelning LED/xenon, Jacob Thomas

Figur 11: Undersökning av belysningspunkt, Jacob Thomas

Figur 19, 20: Carl Larssons akvarell Lisbeth, 1894 Göteborgs konstmuseum

# BILAGOR

## Bilaga 1. Uträkning för $\Delta E_{76}$ :

$\Delta E$  beskriver distansen mellan två färgkoordinater.

$L_2^*$ ,  $a_2^*$ ,  $b_2^*$  syftar till den andra mätta färgen.

$L_1^*$ ,  $a_1^*$ ,  $b_1^*$  syftar till den första mätta färgen.

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2}$$

## Bilaga 2. Uträkning för $\Delta E_{94}$ :

I denna ekvation tas korrigeringsvärden för ljushet ( $\Delta L$ ), kulör ( $\Delta C$ ) och nyans ( $\Delta H$ ) med i beräkning.  $S_L$ ,  $S_C$  och  $S_H$  är ytterligare korrigeringsfaktorer som justerar  $\Delta L$ ,  $\Delta C$ ,  $\Delta H$  beroende på var i färgrymden vi befinner oss.

$$\Delta E_{94}^* = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C_{ab}^*}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H_{ab}^*}{k_H S_H}\right)^2}$$

$$\Delta L^* = L_1^* - L_2^*$$

$$C_1^* = \sqrt{a_1^{*2} + b_1^{*2}}$$

$$C_2^* = \sqrt{a_2^{*2} + b_2^{*2}}$$

$$\Delta C_{ab}^* = C_1^* - C_2^*$$

$$\Delta H_{ab}^* = \sqrt{\Delta E_{ab}^{*2} - \Delta L^{*2} - \Delta C_{ab}^{*2}} = \sqrt{\Delta a^{*2} + \Delta b^{*2} - \Delta C_{ab}^{*2}}$$

$$\Delta a^* = a_1^* - a_2^*$$

$$\Delta b^* = b_1^* - b_2^*$$

$$S_L = 1$$

$$S_C = 1 + K_1 C_1^*$$

$$S_H = 1 + K_2 C_1^*$$

## Bilaga 3. Uträkning för $\Delta E_{00}$ :

I denna ekvation har en nyansterm adderats för bättre perceptuell enhetlighet.  $\Delta E_{00}$  kompenserar för neutrala färger, för ljushet, för färg och för nyans.

$$\Delta E_{00}^* = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)^2} + R_T \frac{\Delta C'}{k_C S_C} \frac{\Delta H'}{k_H S_H}$$

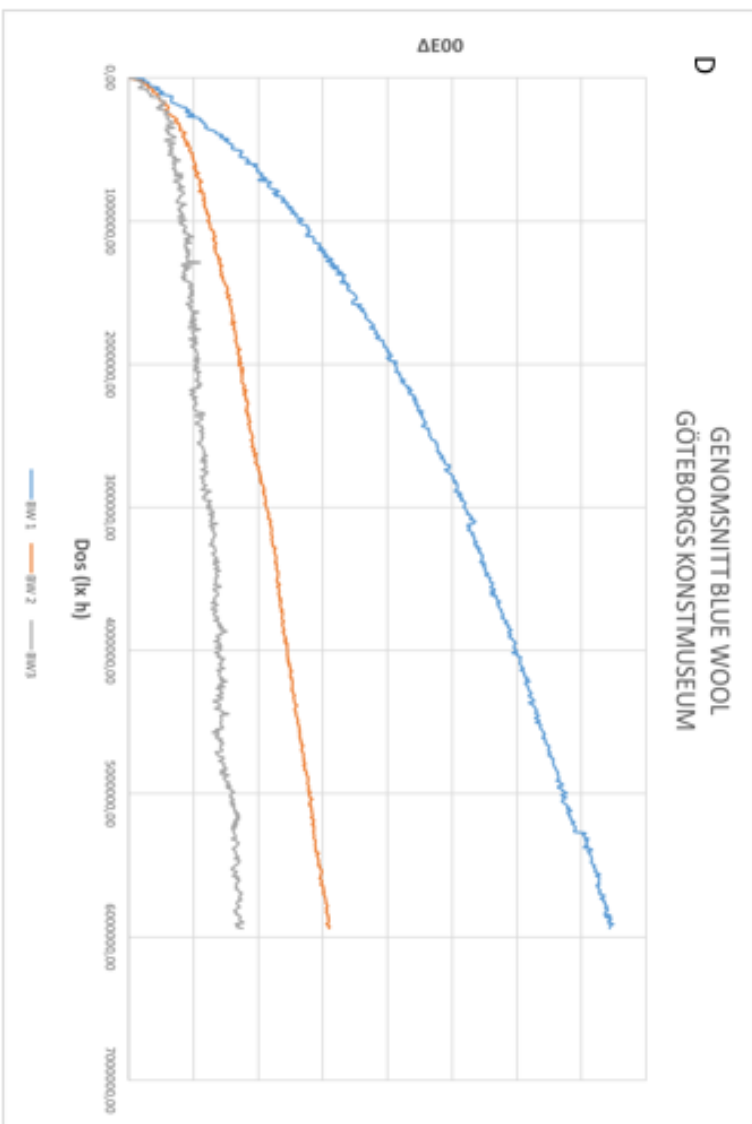
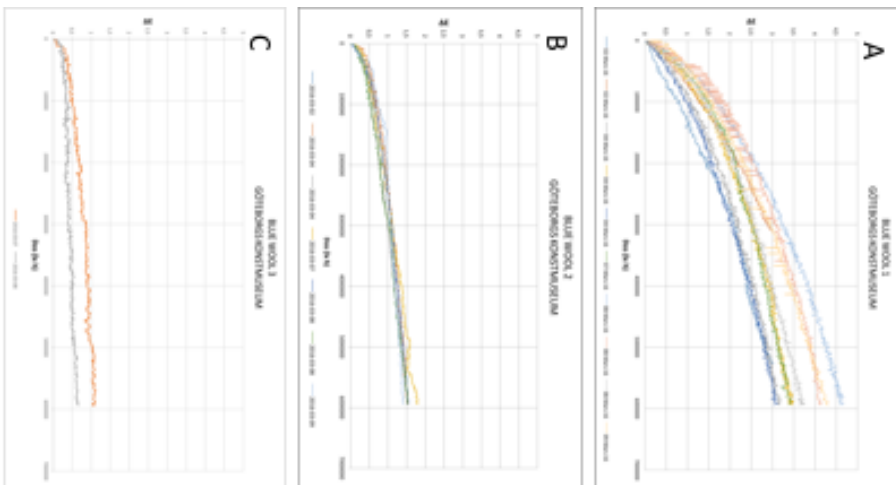
$$\begin{aligned}
\Delta L' &= L_2^* - L_1^* & \bar{L} &= \frac{L_1^* + L_2^*}{2} & \bar{C} &= \frac{C_1^* + C_2^*}{2} \\
a_1' &= a_1^* + \frac{a_1^*}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{\bar{C}^7}{\bar{C}^7 + 25^7}} \right) & a_2' &= a_2^* + \frac{a_2^*}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{\bar{C}^7}{\bar{C}^7 + 25^7}} \right) \\
\bar{C}' &= \frac{C_1' + C_2'}{2} \text{ and } \Delta C' = C_2' - C_1' & \text{where } C_1' &= \sqrt{a_1'^2 + b_1^{*2}} & C_2' &= \sqrt{a_2'^2 + b_2^{*2}} \\
\bar{C}' &= \frac{C_1' + C_2'}{2} \text{ and } \Delta C' = C_2' - C_1' & \text{where } C_1' &= \sqrt{a_1'^2 + b_1^{*2}} & C_2' &= \sqrt{a_2'^2 + b_2^{*2}} \\
h_1' &= \text{atan2}(b_1^*, a_1') \pmod{360^\circ}, & h_2' &= \text{atan2}(b_2^*, a_2') \pmod{360^\circ} \\
\Delta h' &= \begin{cases} h_2' - h_1' & |h_1' - h_2'| \leq 180^\circ \\ h_2' - h_1' + 360^\circ & |h_1' - h_2'| > 180^\circ, h_2' \leq h_1' \\ h_2' - h_1' - 360^\circ & |h_1' - h_2'| > 180^\circ, h_2' > h_1' \end{cases}
\end{aligned}$$



#### Bilaga 4. Resultat av MFT på Carl Larssons 'Lisbeth'. Fullständig tabell.

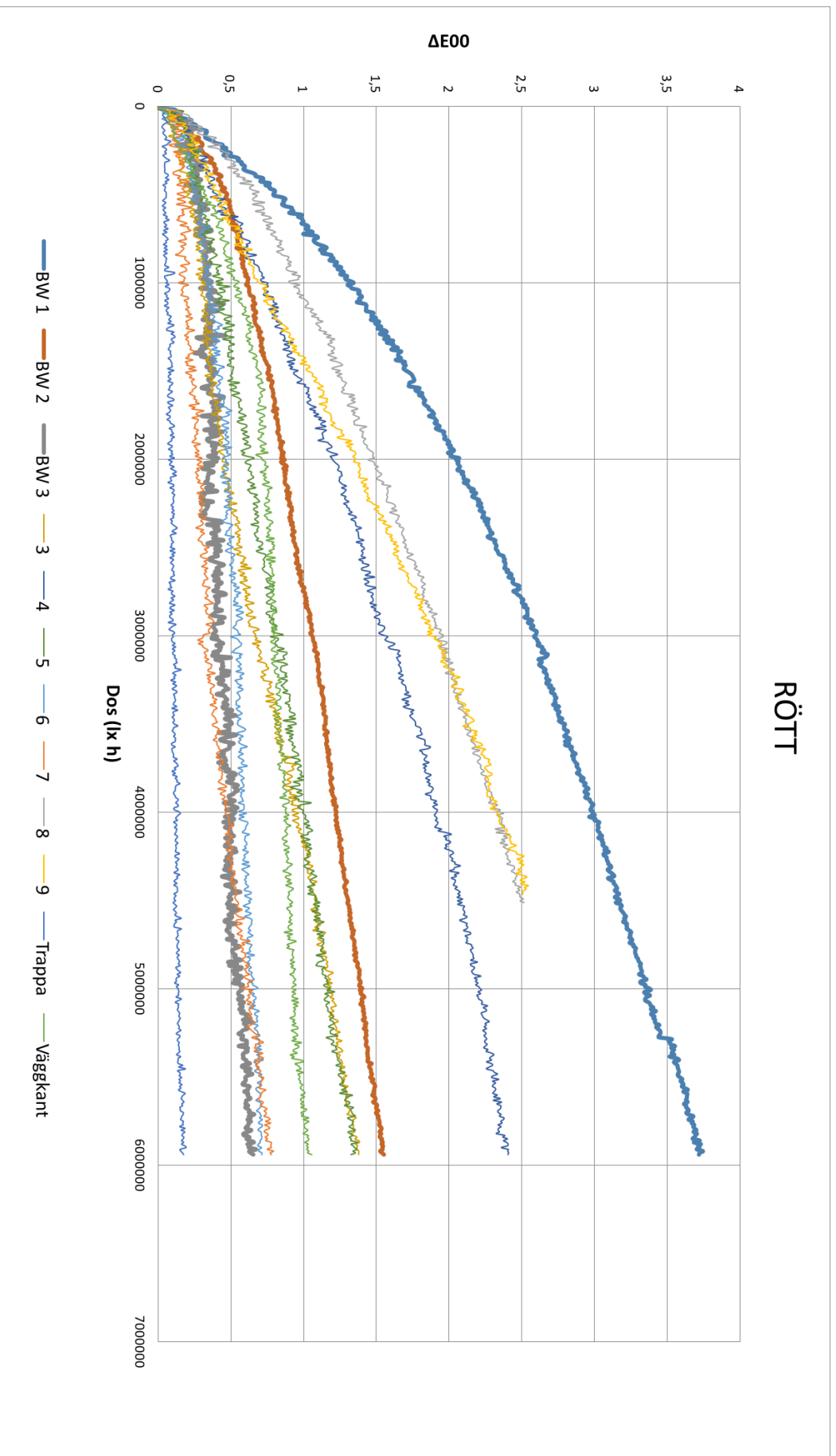
Färg	Mät punkt	$\Delta E_{00}$	ISO(#BWS)
Grön	Bakgrund(*)	0,24	>BW3
Gul	Panel(*)	0,19	>BW3
Blå	Bakom sko(19)	0,14	>BW3
Blå	Panel(1)	0,33	>BW3
Blå	Matta(20)	0,15	>BW3
Blå	Stol(*)	0,27	>BW3
Röd	Dockans hatt(8)	2,25 (7,57 min)	BW1-2
Röd	Dockans hatt(5)	1,34	BW2-3
Röd	Dockans hatt(6)	0,69	>BW3
Röd	Dockans hatt(7)	0,77	>BW3
Röd	Dockans arm(3)	1,38	BW2-3
Röd	Dockans bröst(4)	2,42	BW1-2
Röd	Axel(9)	2,50 (7,48 min)	BW1-2
Röd	Förkläde(21)	0,31	>BW3
Röd	Väggkant(*)	1,06	BW2-3
Röd	Trappa(*)	0,16	>BW3
<b>* Genomsnitt av:</b>			
Grön	Bakgrund(16)	0,37	>BW3
Grön	Bakgrund(15)	0,16	>BW3
Grön	Bakgrund(17)	0,18	>BW3
Gul	Panel(22)	0,23	>BW3
Gul	Panel(23)	0,16	>BW3
Gul	Panel(24)	0,11	>BW3
Blå	Stol(10)	0,17	>BW3
Blå	Stol(11)	0,19	>BW3
Blå	Stol(12)	0,47	>BW3
Blå	Stol(14)	0,37	>BW3
Röd	Väggkant(13)	0,94	BW2-3
Röd	Väggkant(2)	1,18	BW2-3
Röd	Trappa(25)	0,15	>BW3
Röd	Trappa(18)	0,11	>BW3
Röd	Trappa(26)	0,21	>BW3

## Bilaga 5. Grafer för färgförändringsbeteende, MFT på Carl Larssons 'Lisbeth' 1894



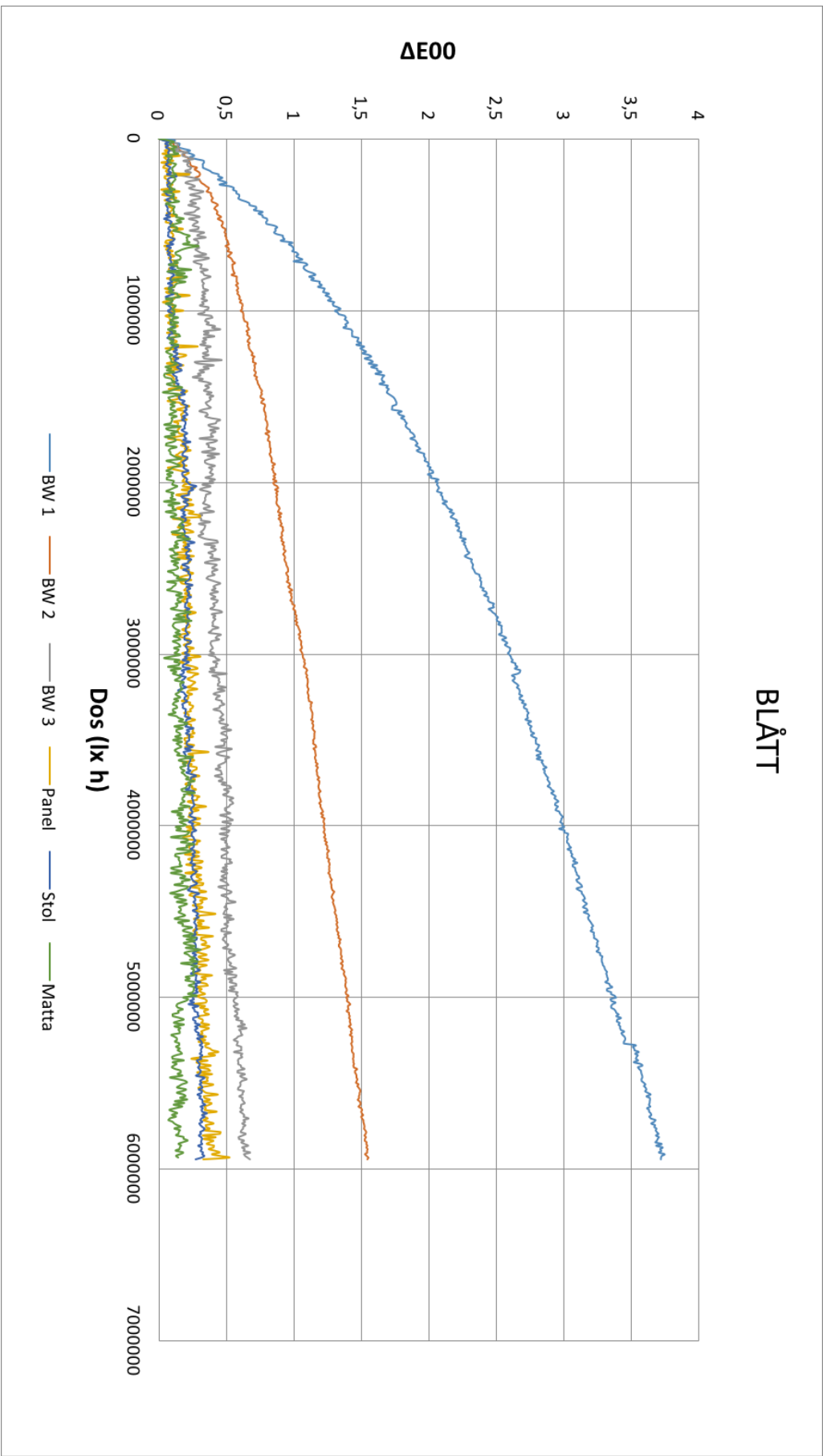
A: uppreppningar för Blue Wool 1, B: uppreppningar för Blue Wool 2, C: uppreppningar för Blue Wool 3, D: genomsnitt för uppreppningar av Blue Wool 1-3.

# RÖTT

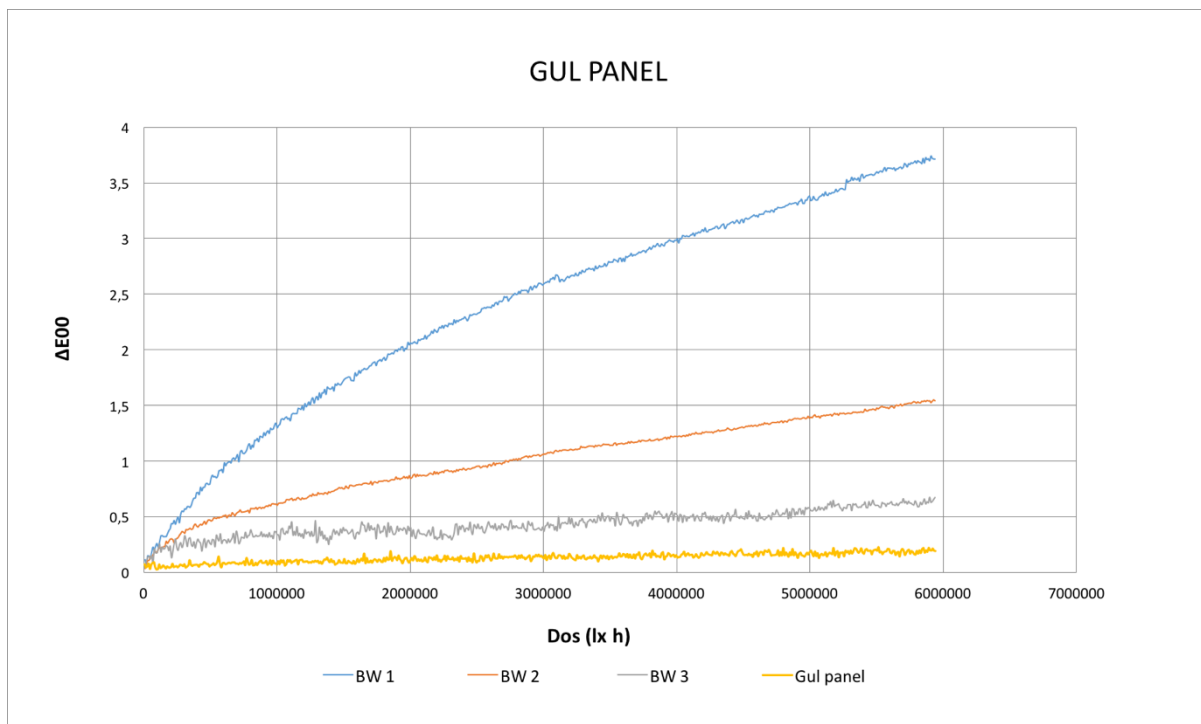


Kurva 3-9 avser nummer för mätpunkt, se figur 20. Kurvan för trappa är genomsnitt av mätpunkt 18, 25 och 26. Kurva för vägkant är genomsnitt av mätpunkt 2 och 13. Kurva för Blue Wool 1, 2 och 3 är fetmarkerad.

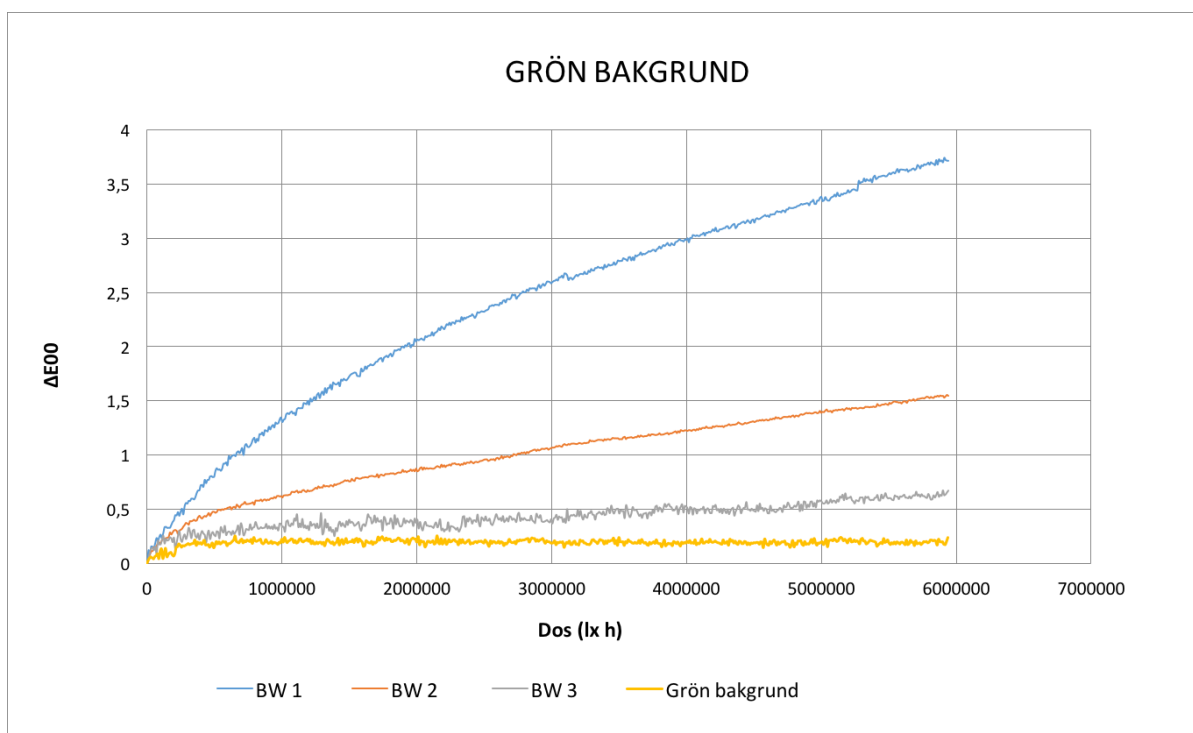
# BLÅTT



Panel avser kurva för mätpunkt 1. Matta avser kurva för mätpunkt 20. Kurva för stel är genomsnitt av mätpunkt 10, 11, 12 och 14.



Kurva för gul panel är genomsnitt av mätpunkt 22, 23 och 24.



Kurva för grön bakgrund är genomsnitt av mätpunkt 15, 16 och 17.