

Basisprincipe röntgen transmissie-opname schilderij

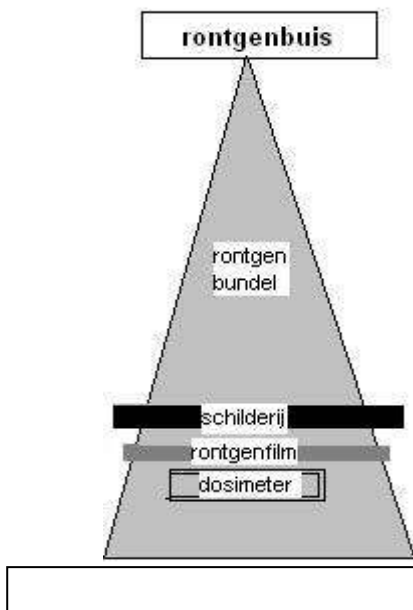
Arie van 't Riet^{*)} [bezoek de website www.rontgenonderzoek.nl](http://www.rontgenonderzoek.nl)

Inleiding

Wat met zichtbaar licht niet mogelijk is lukt uitstekend met röntgenstraling. Door een schilderij heen kijken. Geheel overeenkomstig de medische toepassing van röntgenstraling, waarbij de röntgenopname informeert over het inwendige van het menselijk lichaam kan de röntgenopname van een schilderij informatie geven over het inwendige van het kunstwerk. De röntgenopname kan iets vertellen over uitgevoerde restauraties, correcties of aanpassingen, onderschildering en over staat van schilderwerk en drager. Onderstaand wordt op basis van de natuurkundige processen die ten grondslag liggen aan het ontstaan van een röntgenbeeld, besproken op welke wijze een contrastrijke en gedetailleerde röntgenopname van een schilderij verkregen kan worden.

De opstelling

De opstelling waarmee een röntgenopname van een schilderij gemaakt wordt is schematisch weergegeven in figuur 1.



Figuur 1 Opstelling schematisch

Zowel de energie – doordringbaarheid – als de intensiteit van de straling kan binnen zekere grenzen op het röntgenapparaat ingesteld worden.

De energie van de röntgenstraling wordt bepaald door de hoogspanning over de röntgenbuis. Bij medische röntgenopnamen van romp of bekken ligt de hoogspanning over de röntgenbuis in het gebied van 70.000 tot 140.000 volt, 70 tot 140 kiloVolt (kV).

Een röntgenopname van een schilderij of ets wordt gemaakt bij een hoogspanning van 10 à 40 kV. De noodzaak om bij een röntgenopname van een dergelijk kunstwerk te kiezen voor deze lage energie – laag kV – wordt in de volgende paragraaf toegelicht.

De intensiteit van de röntgenstraling is de hoeveelheid (dosis) straling per tijdseenheid, bijvoorbeeld per seconde. Men spreekt in dit verband veelal over dosistempo. Het dosistempo neemt sterk toe met toenemend kV over de röntgenbuis, neemt toe met toenemende stroom door de röntgenbuis en neemt sterk af met vergroting van de afstand tot de röntgenbuis. De totaal benodigde hoeveelheid röntgenstraling voor een optimale zwarting van de röntgenfoto wordt verkregen door een juiste keuze van de bestralingstijd.

^{*)} dr.ir.A.van 't Riet, fysicus, Bathmen

Bij de medische röntgenopname is het van belang om de opname in korte tijd te maken zodat Onscherpte als gevolg van beweging tijdens de opname voorkomen wordt “... adem inhouden ... ademt u maar weer... “. In de medische toepassing van röntgenstraling wordt daarom gewerkt met een grote stralingsintensiteit (hoog dosistempo). Dit kan bereikt worden door een hoog kV en met name een zeer hoge buisstroom te kiezen.

Bij de röntgenopname van een schilderij is er geen bewegingsonscherpte. Een lage stralingsintensiteit, samenhangend met een laag kV is geen bezwaar omdat de opnametijd (zeer) lang mag zijn.

Om dezelfde reden is het ook niet bezwaarlijk om de afstand van röntgenbuis tot schilderij groot te kiezen. En dit heeft voordelen omdat het punt in de röntgenbuis waar de röntgenstraling ontstaat – het focus – niet beschouwd mag worden als een oneindig kleine puntbron maar zekere afmetingen heeft. Als gevolg hiervan ontstaat onscherpte. Door de afstand van focus tot schilderij groot te kiezen en de afstand van schilderij tot film klein, wordt de onscherpte ten gevolge van afmetingen van het focus geminimaliseerd. Een potlood op korte afstand van een gloeilamp wordt vaag afgebeeld, op grote afstand van de gloeilamp scherp. Of, dankzij haar grote afstand tot de aarde geeft de zon, ondanks haar enorme afmetingen scherpe afbeeldingen.

Voor wat betreft het type röntgenfilm zal gekozen worden voor een film met grote steilheid. Dit betekent dat kleine verschillen in hoeveelheid straling ter plaatse van de röntgenfilm zich vertalen in grote zwartingsverschillen op de röntgenfoto. In de medische toepassing van röntgenstraling treft men een dergelijk type röntgenfilm aan bij de mammografie waar kleine dichtheidsverschillen in het borstweefsel zich op de röntgenfoto als goed zichtbare zwartingsverschillen moeten presenteren.

Medische röntgenfilm dient een grote gevoeligheid te hebben zodat de patiënt slechts aan een geringe dosis straling blootgesteld hoeft te worden. De grote gevoeligheid wordt bereikt door de röntgenfilm te combineren met versterkingsschermen en door gebruik te maken van een grofkorrelige filmemulsie. Deze maatregelen beïnvloeden de scherpte van de afbeelding echter nadelig. Bij de röntgenopname van een schilderij is een enigszins hogere dosis geen bezwaar, kan gewerkt worden zonder versterkingsschermen en met een minder gevoelige zeer fijnkorrelige röntgenfilm. De in dat geval benodigde hoeveelheid straling van enkele tientallen milliGray (mGy, zie kader 1), die vereist is voor een goede afbeelding is nog steeds zodanig laag dat geen schade toegebracht wordt aan het kunstwerk (zie kader 2). Er wordt een scherpe gedetailleerde röntgenafbeelding van het schilderij verkregen die zelfs bij bestudering met een loep niet verstoord wordt door korrelstructuur van de röntgenfilmemulsie.

Direct achter de röntgenfilm is een dosimeter geplaatst. Hiermee wordt de hoeveelheid (dosis) straling tijdens het maken van de röntgenopname gemeten. Gedurende het maken van de

röntgenopname loopt de aanwijzing van de dosimeter op. Het röntgentoestel wordt uitgeschakeld op het moment dat de dosimeter een dosis aangeeft die overeenkomt met optimale filmzwarting. Op deze wijze wordt voorkomen dat de opname mislukt ten gevolge van onderbelichting of overbelichting van de röntgenfilm.

Verzwakking

De samenstelling van een schilderij verschilt van plaats tot plaats, dikteverschillen, verfsoorten met verschillend pigment, verschillen in preparatielaag en onderschildering, verschillen in drager e.d. Als gevolg van deze plaatselijke verschillen in samenstelling zullen bepaalde delen van het schilderij de opvallende röntgenstraling meer verzwakken dan andere delen van het schilderij. De direkt tegen het schilderij gepositioneerde röntgenfilm zal op plaatsen waar de röntgenstraling door het schilderij veel verzwakt wordt, weinig straling ontvangen en na ontwikkelen licht zijn. Op plaatsen waar het schilderij de röntgenstraling weinig verzwakt zal de röntgenfilm veel straling ontvangen, na ontwikkelen zal de röntgenfilm daar donker zijn. Ter vergelijking, een medische röntgenfilm toont de botten licht (veel verzwakking) en de longen donker (weinig verzwakking). Zwartingsverschillen in de röntgenafbeelding van het schilderij informeren over de samenstelling van het schilderij.

Het wordt als vanzelfsprekend ervaren dat het in meer of mindere mate verzwakken van röntgenstraling toegeschreven kan worden aan dikteverschillen, hoe dikker een object is hoe meer de straling verzwakt wordt. Ook klinkt het logisch dat materiaalverschillen een rol spelen, een zwaar materiaal als bijvoorbeeld lood verzwakt de straling meer dan een licht materiaal als bijvoorbeeld hout. Dat laagenergetische röntgenstraling door een bepaald object meer verzwakt wordt dan hoogenergetische röntgenstraling wordt gevoelsmatig eveneens als juist ervaren.

Verzwakking van röntgenstraling kan kwantitatief exact beschreven worden met de formule

$$I_d = I_0 \times e^{-\mu \times d}$$

Hoewel deze formule op het eerste gezicht complex oogt zullen we bij nadere beschouwing zien dat hiermee de eerder genoemde als logisch ervaren eigenschappen bevestigd worden.

I_d is de hoeveelheid straling die plaatselijk door het schilderij dringt en de röntgenfilm bereikt, de uitreedosis.

I_0 is de hoeveelheid straling die op de achterzijde van het schilderij valt, de intreedosis.

e is het grondtal van de natuurlijke logaritme (zie kader 3). Het wordt ook de constante van Napier genoemd, naar de uitvinder van de logaritme, de schotse wiskundige John Napier. Het getal e werd door de Zwitserse wiskundige Leonhard Euler het exponentiële getal genoemd.

De verhouding van I_d en I_o geeft dus de verzwakking aan, de formule kan dan ook als volgt herschreven worden

$$I_o / I_d = \text{verzwakking} = e^{\mu \times d}$$

μ is de verzwakkingscoëfficiënt van het schilderij, deze wordt bepaald door de plaatselijke soortelijke massa – de dichtheid – en het soort materiaal ter plaatse, chroom, cadmium, cobalt, lood allen hebben een verschillende voor het materiaal specifieke verzwakkingscoëfficiënt. Ook is de verzwakkingscoëfficiënt afhankelijk van de energie van de gebruikte röntgenstraling.

d is de dikte van het schilderij ter plaatse.

Aan de hand van de formule wordt nu achtereenvolgens toegelicht hoe dikteverschillen respectievelijk in het schilderij aanwezige verschillen in materiaalsamenstelling op de röntgenfoto als zwartingsverschillen tot uiting komen.

a. Dikteverschillen.

Het effect van een dikteverschil wordt toegelicht aan de hand van een voorbeeld met papier. Wanneer gewerkt wordt met laagenergetische röntgenstraling van 10 kV dan bedraagt de verzwakkingscoëfficiënt μ voor papier 1,76 per mm. Veronderstel dat een röntgenopname gemaakt wordt van een ets die afgedrukt is op etspapier met een dikte van 0,4 mm en dat het etspapier voorzien is van een watermerk ter plaatse waarvan de dikte van het papier 0,25 mm is.

De verzwakking door het etspapier is: $e^{\mu \times d}$, invulling geeft $e^{1,76 \times 0,4}$, dit is gelijk aan 2,02. Het etspapier verzwakt de röntgenstraling dus met iets meer dan een factor twee.

De verzwakking ter plaatse van het watermerk bedraagt $e^{1,76 \times 0,25}$, dit is gelijk aan 1,55. Ter plaatse van het watermerk wordt de röntgenstraling dus met iets meer dan een factor anderhalf verzwakt. Een dergelijk verschil van 1,30 in verzwakking – 2,02 ten opzichte van 1,55 - komt op de röntgenfoto tot uiting in een zichtbaar zwartingsverschil, het watermerk wordt dus afgebeeld.

De verzwakkingscoëfficiënt neemt af met toenemende energie van de röntgenstraling. Was voor papier bij 10 kV de verzwakkingscoëfficiënt nog 1,76 per mm, bij 30 kV is deze nog slechts 0,14 per mm. Wanneer bovengenoemd voorbeeld uitgewerkt wordt voor deze hogere energie dan vinden we voor het etspapier een verzwakking van $e^{0,14 \times 0,4} = 1,06$ en voor het watermerk $e^{0,14 \times 0,25} = 1,04$. De verzwakking ter plaatse van het watermerk verschilt dus niet noemenswaardig van de verzwakking door de omgeving. Op de röntgenfoto zal nauwelijks sprake zijn van een zwartingsverschil, het watermerk wordt dus niet afgebeeld.

Hiermee is aangetoond dat voor het zichtbaar maken van kleine dikteverschillen het werken met – zeer – laagenergetische röntgenstraling een vereiste is.

b. Verschil in materiaalsamenstelling.

De mate van verzwakking wordt behalve door de dikte d van het materiaal ook bepaald door de verzwakkingscoëfficiënt μ . De verzwakkingscoëfficiënt wordt bepaald door de soortelijke massa en het atoomnummer van het materiaal en door de energie van de gebruikte röntgenstraling. Naarmate soortelijke massa of atoomnummer van het materiaal groter zijn is de verzwakkingscoëfficiënt groter. Een zwaarder materiaal heeft een grotere verzwakkingscoëfficiënt en verzwakt de röntgenstraling beter dan een licht materiaal. Naarmate de energie van de gebruikte röntgenstraling groter is, is de verzwakkingscoëfficiënt kleiner. Röntgenstraling met een lage energie heeft een grote verzwakkingscoëfficiënt en wordt beter door een materiaal verzwakt dan röntgenstraling met een hoge energie.

In tabel 1 is voor een drietal energieën van de röntgenstraling een overzicht gegeven van de verzwakkingscoëfficiënt voor enkele materialen die – als pigment - in een schilderij voorkomen. Opgemerkt kan hierbij worden dat de gemiddelde energie van de in een röntgenbuis opgewekte röntgenstraling overeenkomt met ongeveer de helft van de hoogspanning over de röntgenbuis. Bij 30 kV over de röntgenbuis is de gemiddelde energie van de opgewekte röntgenstraling ongeveer 15 keV, bij 50 kV ongeveer 25 keV en bij 80 kV ongeveer 40 keV.

Tabel 1. Verzwakkingscoëfficiënten voor verschillende stoffen bij verschillende energieën

materiaal	symbool	atoom nummer	soortelijke massa	verzwakkingscoëfficiënt (per mm)		
				15 keV (30kV)	25 keV (50kV)	40 keV (80kV)
koolstof	C	6	1,7 gr/cm ³	0,14	0,06	0,04
calcium	Ca	20	1,6 gr/cm ³	5	1,4	0,29
chroom	Cr	24	7,2 gr/cm ³	33	10	2,1
cobalt	Co	27	8,9 gr/cm ³	55	16	3,5
koper	Cu	29	9,0 gr/cm ³	67	20	4,4
cadmium	Cd	48	8,7 gr/cm ³	36	10	15,5
lood	Pb	82	11,4 gr/cm ³	128	66	16,4

Verzwakking van röntgenstraling treedt op doordat de röntgenstraling energie overdraagt aan de elektronen van de atomen waaruit het materiaal (doek, paneel, preparatielaag, onderschildering, verfpigment) bestaat waar de straling op valt. Er is sprake van een kansenspel. Er is een zekere kans dat de röntgenstraling zonder energie af te staan ongestoord door het object dringt, er treedt geheel geen verzwakking op, en er is een zekere kans dat de straling energie afstaat door botsing met elektronen, er treedt wel verzwakking op. Logischerwijs mag verwacht worden dat de kans op verzwakking toeneemt met toenemend aantal elektronen. Een atoom met meer elektronen en dus een hoger atoomnummer zal de straling meer verzwakken dan een atoom met minder elektronen en dus een lager atoomnummer, bijvoorbeeld chroom (pigment) met 24 elektronen per atoom heeft een grotere kans op botsing van straling met elektronen dan koolstof (doek, paneel) met 6 elektronen per atoom.

Bij een hoogspanning van 80 kV over de röntgenbuis en daarmee samenhangend een gemiddelde energie van de opgewekte röntgenstraling van ongeveer 40 keV wordt inderdaad een regelmatige toename van de verzwakkingscoëfficiënt - en daarmee de mate van verzwakking - met toenemend atoomnummer gezien. Bij de lagere energieën van 25 keV en 15 keV overeenkomend met een buisspanning van respectievelijk ongeveer 50 kV en 30 kV, treden onregelmatigheden op die samenhangen met de bindingsenergie van de diverse elektronen in het atoom. Deze onregelmatigheden in de verzwakking staan bekend onder de naam selectieve absorptie (zie kader 4). Hoewel selectieve absorptie optreedt in het energiebereik waarin röntgenopnamen van schilderijen gemaakt worden beïnvloedt het de opnamen niet.

In grote lijnen geldt dat de verzwakkingscoëfficiënt groter is bij hoger atoomnummer. Lood met een dikte van 0,01 mm (10 micrometer) geeft bij 15 keV een verzwakking met een factor $e^{128 \times 0,01} = 3,6$. Cobalt met een dikte van 0,01 mm geeft bij 15 keV een verzwakking met een factor $e^{55 \times 0,01} = 1,7$. Dit verschil in verzwakking tussen lood en cobalt komt op de röntgenfilm tot uiting in een zwartingsverschil. Opgemerkt kan hierbij worden dat bij deze theoretische beschouwing uitgegaan is van lagen lood en cobalt van gelijke dikten. Ter illustratie: cobalt met een laagdikte van 0,023 mm (23 micrometer) verzwakt bij 15 keV de straling met een factor $e^{55 \times 0,023} = 3,6$, dit wil zeggen in dezelfde mate als lood met een laagdikte van 10 micrometer. De röntgenopname laat in dit geval dus een gelijke zwarting voor lood en cobalt zien.

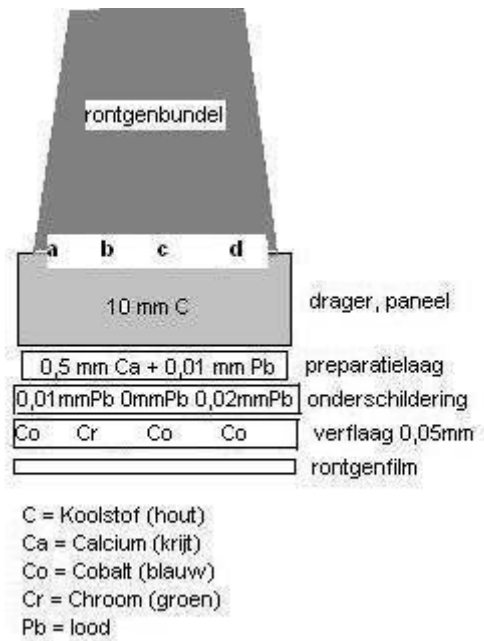
Het röntgenonderzoek zal in het algemeen dan ook geen informatie kunnen geven over het type pigment. In het meest gunstige geval kan onderscheid gemaakt worden tussen de groep chroom, cobalt, koper met een atoomnummer van rond de dertig, de groep cadmium, antimoon met een atoomnummer rond de 50 en lood met atoomnummer 82.

In het algemeen geldt dat de verzwakkingscoëfficiënt groter is bij lagere energie. Dit pleit er voor om de röntgenopname met laagenergetische röntgenstraling te maken. Bij 15 keV (30 kV) veroorzaakt cobalt met laagdikte 10 micrometer (μm) een verzwakking met een factor 1,7 en is daarmee op de röntgenopname goed te onderscheiden van de omgeving waar zich geen cobalt bevindt. Bij 25 keV (50 kV) en een laagdikte van 10 μm verzwakt cobalt een factor 1,2 en onderscheidt zich daarmee minder van de omgeving dan bij 15 keV, de opname is minder contrastrijk. Bij 40 keV (80 kV) en een laagdikte van 10 μm verzwakt cobalt nog slechts een factor 1,04 en zal daarmee op de röntgenopname nauwelijks een zichtbaar verschil met de omgeving geven. Voor een contrastrijke röntgenopname van een schilderij is een dergelijke hoge energie daarom niet geschikt, er dient gekozen te worden voor een zo laag mogelijke energie. In de navolgende paragraaf wordt aan de hand van een voorbeeld toegelicht dat in de praktijk een zeer lage energie ook nadelen heeft.

Voorbeeld

Als voorbeeld van het ontstaan van het röntgenbeeld wordt een denkbeeldig paneel theoretisch doorgerekend. Verondersteld wordt dat het paneel een dikte van 10 mm heeft. Het paneel is voorbehandeld met lijn. Vervolgens is een preparatielaag met een dikte van 0,5 mm aangebracht. De preparatielaag bestaat uit gips of krijt. Aangenomen wordt dat hier wat loodwit aan toegevoegd is. Effectief wordt de dikte van dit loodwit in de preparatielaag op 10 μm gesteld. Op de preparatielaag is de voortekening gemaakt met houtskool of krijt. In de preparatielaag zijn de contouren ingekrast. Vervolgens is een tussenvernislak aangebracht waarna de onderschildering met loodwit is verzorgd met bloksgewijze uitsparing van delen van de voorstelling. Ook zijn in de onderschildering met loodwit al licht en donker accenten aangebracht. In dit voorbeeld wordt dan ook aangenomen dat er dikteverschillen in het aanwezige loodwit zijn. Tenslotte wordt de verf in verschillende lagen aangebracht. De dikte van de uiteindelijke verflak wordt op 50 μm gesteld.

In figuur 2 is de opbouw van het paneel en de doorgang van de röntgenstraling schematisch weergegeven. In de figuur zijn vier gebieden a,b,c en d aangegeven waarin de straling in verschillende mate verzwakt wordt. Voor de vier gebieden is de verzwakking voor 30, 50 en 80 kV röntgenstraling berekend en in tabel 2 samengevat.



Figuur 2 Doorgang röntgenstraling schematisch

Tabel 2. Verzwakkingsfactoren

	15 keV (30 kV)	25 keV (50 kV)	40 keV (80 kV)
Paneel			
10 mm C	4,0	1,8	1,5
Preparatielaag			
0,5 mm Ca + 0,01 mm Pb	43,9	3,9	1,4
Onderschildering			
0,01 mm Pb	3,6	1,9	1,2
0,02 mm Pb	12,9	3,7	1,4
Verflaag			
0,05 mm Co	15,6	2,2	1,2
0,05 mm Cr	5,2	1,6	1,1
Totaal gebied a	9862	29,3	3,0
Totaal gebied b	3287	21,3	2,8
Totaal gebied c	2739	15,4	2,5
Totaal gebied d	35338	57,1	3,5

Tabel 3. Dosis ter plaatse van de röntgenfilm

	15 keV (30 kV)	25 keV (50 kV)	40 keV (80 kV)
Gebied a	18 mGy	10 mGy	6 mGy
Gebied b	54 mGy	13 mGy	6 mGy
Gebied c	65 mGy	19 mGy	7 mGy
Gebied d	5 mGy	5 mGy	5 mGy

Tabel 4. Zwarting van de röntgenfoto

	15 keV (30 kV)	25 keV (50 kV)	40 keV (80 kV)
Gebied a	1,9	1,4	1,0
Gebied b	2,6	1,7	1,0
Gebied b	2,9	1,9	1,1
Gebied c	0,9	0,9	0,9

Toelichtingbijdetabellen 2, 3 en 4.

Als toelichting bij de tabellen 2, 3 en 4 wordt onderstaand stap voor stap de verzwakking van 30 kV röntgenstraling door de verschillende componenten van het denkbeeldige kunstwerk berekend en worden de resulterende zwartingsverschillen op de röntgenfoto bepaald:

- drager, paneel: 10 mm koolstof (C), verzwakking met factor $e^{0,14 \times 10} = 4,0$
- preparatie: 0,5 mm calcium (Ca) + 0,01 mm loodwit (Pb), verzwakking met factor $e^{5 \times 0,5} \times e^{128 \times 0,01} = 12,2 \times 3,6 = 43,9$
- onderschildering: 0,01 mm loodwit (Pb), verzwakking met factor $e^{128 \times 0,01} = 3,6$ respectievelijk 0,02 mm loodwit (Pb), verzwakking met factor $e^{128 \times 0,02} = 12,9$
- verflaag 0,05 mm blauw (Co), verzwakking met factor $e^{55 \times 0,05} = 15,6$
- verflaag 0,05 mm groen (Cr), verzwakking met factor $e^{33 \times 0,05} = 5,2$

In de figuur zijn vier gebieden a,b,c en d aangegeven waarin de straling in verschillende mate verzwakt wordt. Voor de vier gebieden is de verzwakking voor 30 kV röntgenstraling onderstaand berekend:

- voor gebied a geldt een totale verzwakkingsfactor van 4,0 (drager) x 43,9 (preparatie) x 3,6 (onderschildering) x 15,6 (Co verflaag) = 9862
- voor gebied b geldt een totale verzwakkingsfactor van 4,0 (drager) x 43,9 (preparatie) x 3,6 (onderschildering) x 5,2 (Cr verflaag) = 3287

- voor gebied c geldt een totale verzwakkingsfactor van $4,0$ (drager) \times $43,9$ (preparatie) \times $15,6$ (Co verflaag) = 2739
- voor gebied d geldt een totale verzwakkingsfactor van $4,0$ (drager) \times $43,9$ (preparatie) \times $12,9$ (onderschildering) \times $15,6$ (Co verflaag) = 35338

Uit bovenstaande blijkt dat gebied d de röntgenstraling het meest verzwakt. De dosimeter wordt in dit gebied achter het schilderij geplaatst en de bestralingstijd wordt zo gekozen dat de dosimeter een stralingsdosis van 5 mGy registreert. In gebied d resulteert dit volgens de zwartingscurve (figuur 3) in een zwarting van $0,9$.

In gebied a zal de stralingsdosis bij de gekozen bestralingstijd $35338/9862 \times 5$ mGy = 18 mGy bedragen. Volgens de zwartingscurve zal hiermee de zwarting in gebied a $1,9$ bedragen. Bij de gekozen bestralingstijd is de dosis in gebied b $35338/3287 \times 5$ mGy = 54 mGy hetgeen voor gebied b een zwarting van $2,7$ betekent

Bij de gekozen bestralingstijd is de dosis in gebied c $35338/2739 \times 5$ mGy = 65 mGy hetgeen voor gebied c een zwarting van $2,9$ oplevert.

De röntgenfilm varieert in zwarting van $2,9$ (gebied c, donker) via $1,9$ (gebied a) naar $0,9$ (gebied d, licht). Er is een contrastrijke opname van het denkbeeldige schilderij verkregen.

Geheel analoog aan bovenstaande berekening kan ook voor 50 kV en 80 kV het zwartingsverschil van het voorbeeldpaneel bepaald worden.

De resultaten in tabel 4 laten zien dat bij 30 kV de meest contrastrijke röntgenopname verkregen wordt. De sterke verzwakking door het denkbeeldig kunstwerk (zie tabel 2) betekent echter dat een hoge stralingsdosis op de achterzijde van het kunstwerk nodig is (de intreedosis) om ter plaatse van de röntgenfilm voldoende stralingsdosis (de uitreedosis) over te houden voor een voldoende filmzwarting. In het beschreven voorbeeld is de verzwakkingsfactor voor gebied d 35338 . Voor de benodigde uitreedosis van 5 mGy is een intreedosis van $35338 \times 5 = 176700$ mGy nodig. Een dergelijke hoge dosis gaat gepaard met zeer lange, voor de praktijk ongeschikte, bestralingstijden. Bovendien is de dosis op de drager hoog. Overigens is hiermee, naast de in de paragraaf over de opstelling genoemde onscherpte, nog een belangrijke reden gegeven om niet de drager maar de verflaag tegen de röntgenfilm te plaatsen. De verflaag krijgt dan immers de laagste dosis en het hout van de drager de hoogste dosis. Geconcludeerd moet dan ook worden dat 30 kV geen geschikte energie is om een röntgenopname van het denkbeeldige kunstwerk te maken.

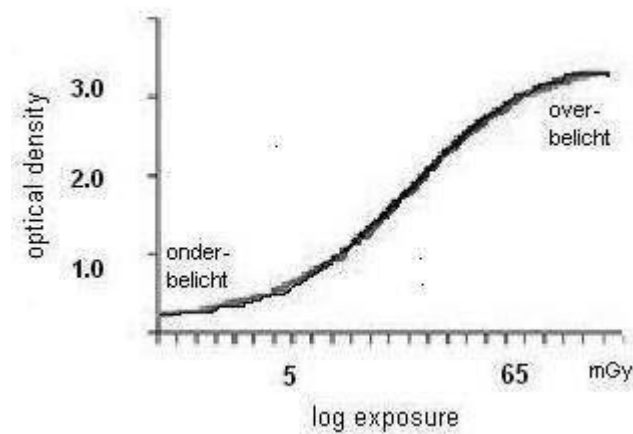
Tabel 4 laat bovendien zien dat 80 kV evenmin een geschikte energie is omdat de contrastverschillen tussen de gebieden a, b, c en d te klein zijn.

De röntgenopname van het hier beschreven denkbeeldige kunstwerk kan dan ook het beste gemaakt worden bij 50 kV. Tabel 4 laat zien dat er een goed contrastverschil verkregen wordt. Hierbij kan bovendien opgemerkt worden dat slechts een deel van het bereik van de zwartingscurve gebruikt wordt hetgeen betekent dat er nog ruimte is om grotere verschillen in samenstelling van een schilderij af te beelden. De intreedosis bedraagt slechts $57 \times 5 = 285$

mGy. De röntgenopname kan daarmee in enkele minuten gemaakt worden en geen enkel deel van het kunstwerk ontvangt een hoge dosis.

Praktische werkwijze

In figuur 3 is de zwartingscurve van het gebruikte filmmateriaal bij de toegepaste stralingsenergie weergegeven.



Figuur 3 Zwartingscurve röntgenfilm

In de meeste gevallen zullen de plaatselijke verschillen in verzwakking binnen het schilderij zo groot zijn dat de op de röntgenopname resulterende zwartingsverschillen groter zijn dan het zwartingsbereik van het gebruikte filmmateriaal. Als gevolg hiervan zal onderbelichting en/of overbelichting optreden en onvolledige informatie verkregen worden. Om een volledig beeld van het schilderij te krijgen zullen meerder röntgenopnamen met verschillende bestralingstijden nodig zijn. Onderstaand wordt de toegepaste werkwijze in meer detail beschreven.

1. Er wordt een oriënterende röntgenopname van het schilderij gemaakt. Bij deze opname wordt een dosimeter met grote afmetingen gebruikt. De diameter van de cirkelvormige dosimeter is 15 cm. De röntgenopname wordt gemaakt met 20 mGy, gemeten met de dosimeter. De dosis van 20 mGy is een gemiddelde over het meetoppervlak van de dosimeter. De verkregen oriënterende röntgenopname vertoont zwartingsverschillen. Gemiddeld bedraagt de zwarting circa 2, overeenkomend met de gegeven dosis van 20 mGy.
2. Uit de oriënterende röntgenopname wordt dat deel van het schilderij bepaald dat zich in de oriënterende afbeelding het lichtst afbeeldt, de straling dus het meest verzwakt. Ter plaatse van dit deel van het schilderij wordt vervolgens een dosimeter met kleine

afmetingen geplaatst. Er wordt een röntgenopname van het schilderij gemaakt waarbij ter plaatse van de dosimeter een dosis van 5 mGy gegeven wordt. Hiermee wordt bereikt dat het lichtste deel van de röntgenopname een zwarting van ongeveer 0,9 krijgt en in het lineaire deel van de zwartingscurve van het gebruikte filmmateriaal ligt. Er kan geen sprake zijn van onderbelichting, elders is de röntgenopname donkerder. Overbelichting is echter wel waarschijnlijk, er zullen delen in het schilderij zijn die de röntgenstraling zo weinig verzwakken dat de röntgenopname daar ter plaatse te zwart is en niet meer in het lineaire deel van de zwartingscurve ligt. Dit wordt gecontroleerd met een densitometer. Indien met de densitometer in de röntgenopname gebieden met een zwarting groter dan 3,5 gevonden worden dan wordt een aanvullende opname gemaakt.

3. Uit de oriënterende röntgenopname wordt dat deel van het schilderij bepaald dat zich in de oriënterende afbeelding het donkerst afbeeldt, de straling dus het minst verzwakt. Ter plaatse van dit deel van het schilderij wordt vervolgens de dosimeter met kleine afmetingen geplaatst. Er wordt een röntgenopname van het schilderij gemaakt waarbij ter plaatse van de dosimeter een dosis van 65 mGy gegeven wordt. Hiermee wordt bereikt dat het donkerste deel van de röntgenopname een zwarting van ongeveer 3 krijgt en in het lineaire deel van de zwartingscurve van het gebruikte filmmateriaal ligt. Er kan geen sprake zijn van overbelichting, elders is de röntgenopname lichter.

Het röntgenonderzoek wordt uitgevoerd bij een zo laag mogelijk energie van de röntgenstraling, een zo laag mogelijk kilovoltage over de röntgenbuis. In de praktijk worden opnamen van etsen gemaakt bij 10 kV, olieverf op doek bij 30 kV en olieverf op paneel bij 50 kV.

In alle gevallen wordt het kunstwerk zo gepositioneerd dat de verflaag van het röntgentoestel afgekeerd is en de röntgenfilm direkt tegen de verflaag geplaatst wordt.

Opgemerkt moet hierbij worden dat voor wat betreft onderzoek aan schilderijen door Houtzager is aangetoond dat het verschil tussen 30 kV en 50 kV marginaal is en dat plaatsing van de röntgenfilm tegen de achterzijde van het schilderij nauwelijks van invloed is op de scherpte.

Röntgenonderzoek van de oude schilderijen in het Centraal Museum te Utrecht, ME Houtzager, 1967

Kader 1

De eenheid die de grootte van stralingsdosis (hoeveelheid straling) beschrijft is in de loop der jaren meerdere keren gewijzigd.

In de jaren 20 van de vorige eeuw, was de eenheid van stralingsdosis de röntgen-Einheit (symbool r). De r was gebaseerd op het vermogen van röntgenstraling om luchtatomen te ioniseren. Bij een dergelijke ionisatie wordt door de röntgenstraling zoveel energie aan een elektron van het luchtatoom overgedragen dat dit elektron zich los kan maken van het atoom. Het resultaat is dus een elektron (negatief geladen deeltje) en een resterend positief geladen atoom (ion) als gevolg van het tekort van een elektron. Om in lucht een dergelijke ionisatie te veroorzaken is een energie van 34 eV (elektronvolt) nodig. Een elektronvolt komt overeen met $1,6 \cdot 10^{-19}$ J (joule, de gebruikelijke eenheid van energie)

De r is gedefinieerd als die hoeveelheid straling die in 1 cm^3 lucht van 0° Celsius en bij een druk van 76 cm kwik een lading van één elektrostatische eenheid (esu) doet ontstaan. Onder deze conditie komt 1 cm^3 lucht overeen met een massa van 0,00129 gram lucht.

Eén elektrostatische eenheid komt overeen met de lading van $2,082 \cdot 10^9$ elektronen. De lading van één elektron bedraagt $1,6 \cdot 10^{-19}$ C (coulomb).

Eén $r = 1$ esu per cm^3 lucht

De eenheid esu voor lading raakte later in onbruik. De coulomb werd de algemeen geaccepteerde eenheid voor lading. Omrekening levert het volgende:

$1 r = 1$ esu per cm^3 lucht = 1 esu per 0,00129 gram lucht = $2,082 \cdot 10^9$ elektronen per 0,00129 gram lucht = $2,082 \cdot 10^9 \times 1,6 \cdot 10^{-19}$ C per 0,00129 gram lucht = $3,331 \times 10^{-10}$ C per 0,00129 gram lucht = $2,58 \times 10^{-7}$ C per gram lucht = $2,58 \times 10^{-4}$ C per kg lucht. Deze hoeveelheid lading per kg noemde men 1 Röntgen (symbool R), de nieuwe eenheid voor stralingsdosis.

Eén r en één R vertegenwoordigen dus eenzelfde hoeveelheid straling maar de R is uitgedrukt in moderne SI (Système International) eenheden (Coulomb en kg).

Thans wordt de stralingsdosis uitgedrukt in de eenheid Gray (Gy). Deze eenheid gaat niet langer uit van de door de straling in een zeker volume opgewekte lading maar van de door de straling aan de materie overgedragen energie. Er is sprake van een dosis van 1 Gy wanneer de straling in een massa van 1 kg van de materie een energie van 1 J afgeeft.

Eén Gy = 1 J per kg

Eén R = $2,58 \times 10^{-4}$ C per kg lucht

De relatie met de oude eenheid kan als volgt bepaald worden:

$1 r = 2,082 \cdot 10^9$ elektronen per 0,00129 gram lucht = $2,082 \cdot 10^9 \times 34$ eV per 0,00129 gram lucht = $70,79 \cdot 10^9 \times 1,6 \cdot 10^{-19}$ J per 0,00129 gram lucht = $87,79 \cdot 10^{-4}$ J per kg lucht = $87,79 \cdot 10^{-4}$ Gy = 0,87 cGy

$1 r = 1 R = 0,87$ cGy = 8,7 mGy

Kader 2

Röntgenopname veroorzaakt geen schade.

Twee publicaties van Muller-Skjold in Angewandte Chemie

Algemeen: Muller-Skjold beschrijft een nauwelijks waarneembaar effect na een stralingsdosis van 40000 r-Einheiten, overeenkomend (zie kader over eenheden) met 350000 mGy. Voor een röntgenopname van een schilderij zijn echter slechts enkele tientallen mGy's nodig (zie tabel 3 uit de tekst)

a. publicatie 1936

Preparaten van 5cm x 5cm werden blootgesteld aan hoge doses röntgenstraling. Het betrof onderzoek aan diverse lood bevattende kleurstoffen met verschillende bindmiddelen. De ene helft van het preparaat werd bestraald, de andere helft werd afgedekt met lood van meerdere millimeters dik en daardoor voor de straling afgeschermd en niet bestraald. Bij de beoordeling van de preparaten keek Muller-Skjold naar eventueel ontstaan kleurverschil of vertroebeling tussen de twee preparaathelften.

In een tabel geeft Muller-Skjold de effecten voor de diverse preparaten bij een dosis van 100000 r-Einheiten. Bij enkele preparaten trad een (nauwelijks) zichtbare vertroebeling op. De eerste nauwelijks zichtbare verkleuring (eigenlijk Trübung= vertroebeling) werd voor loodwit nader onderzocht en trad op bij circa 40000 r-Einheiten.

Bij in donker bewaarde bestraalde preparaten bleek de vertroebeling na een jaar zo goed als verdwenen. Bij preparaten die in diffuus zonlicht bewaard werden was de vertroebeling al na een paar weken verdwenen. Hierna werden geen resteffecten waargenomen.

Voor het maken van een opname van een schilderij had Muller-Skjold een dosis van 16 r-Einheiten nodig. Hij concludeert dan ook dat dit geen enkel risico op schade aan het schilderij met zich brengt.

b. publicatie 1937

In deze publicatie beschrijft Muller-Skjold onderzoek aan andere pigmenten dan loodhoudende. Zinkwit, cadmiumgeel, strontiumgeel, cadmiumrood, ijzeroxidierood, chromoxidegroen, cobaltblauw, mangaanviolet werd onderzocht volgens de in de publicatie van 1936 beschreven techniek. Na een stralingsdosis van 100000 r-Einheiten werden nauwelijks herkenbare verandering gevonden bij zinkwit, strontiumgeel en barytgeel. De pigmenten bevatten echter veelal bijmenging van loodverbindingen en wellicht veroorzaken die het effect. Bij de meeste pigmenten werd geen enkel merkbaar effect gezien. Loodwit bleek het gevoeligst.

Om na te gaan of de röntgenstraling wellicht onzichtbare effecten veroorzaakt werden bestraalde en onbestraalde preparaten blootgesteld aan chemicalien. Verschil werd niet gevonden.

Alle onderzoek werd gedaan aan verse of hoogstens enkele maanden oude preparaten. Om na te gaan of honderden jaren oude verflagen gevoeliger zijn werden schilderijen uit de 16^e, 17^e en 18^e eeuw beschikbaar gesteld door het Kaiser Friedrich Museum te Berlijn en door Muller-Skjold bestraald. De helft van het schilderij werd met lood afgedekt de andere helft kreeg 100000 r-Einheiten. In twee gevallen, die veel loodwit bevatten was een vertroebeling waarneembaar. Na een paar dagen was de vertroebeling weer verdwenen.

Evenals in de publicatie van 1936 concludeert Muller-Skjold in deze publicatie dat de röntgendosis die voor een normale opname benodigd is niet tot schade kan leiden.

Kader 3

Het getal e

In de formule $e^{u \cdot x^d}$ is sprake van een exponentiële functie, dus een functie van het type $y = g^x$. Een dergelijke functie gaat in alle gevallen door het punt (0,1). Welke waarde ook voor het grondtal g gekozen wordt, voor $x=0$ geldt steeds g^0 en welke waarde het grondtal g ook heeft, g^0 is altijd 1.

De functie $y = 2^x$ met grondtal 2 gaat dus door het punt (0,1). Deze functie blijkt in dat punt (0,1) een helling te hebben die iets kleiner is dan 1. De functie $y = 3^x$ gaat ook door het punt (0,1) maar blijkt in dat punt een helling te hebben die iets groter is dan 1. Het moet dus mogelijk zijn om een grondtal te bepalen - ergens tussen 2 en 3 - waarvoor geldt dat de helling van de grafiek in het punt (0,1) precies gelijk is aan 1. Dit grondtal duidt men aan met de letter e. Net als bijvoorbeeld het getal π heeft het getal e een oneindig aantal decimalen. De waarde van e bedraagt 2,71828..... De functie $y = e^x$ is dus een gewone exponentiële functie die door het punt (0,1) gaat en in dat punt een helling 1 heeft.

Bij differentiëren van een functie wordt de afgeleide van die functie bepaald. In een bepaald punt geeft de afgeleide van een functie de helling van de functie in dat punt. Het bijzondere van de functie $y = e^x$ is dus dat voor $x=0$ niet alleen de functie een waarde 1 heeft ($e^0 = 1$) maar de afgeleide (helling) in dat punt eveneens de waarde 1 heeft. Het feit dat de e-machtsfunctie en zijn afgeleide aan elkaar gelijk zijn is een uniek verschijnsel. Bij differentiëren van de functie $y = e^x$ krijg je precies dezelfde functie terug. Dit wiskundig interessante verschijnsel zorgt er voor dat het getal e veelvuldig voorkomt in natuurkundige formules.

Kader 4

Selectieve absorptie

De bindingsenergie van de elektronen is voor iedere stof specifiek. Wanneer de energie van de röntgenstraling minder is dan de bindingsenergie van bepaalde elektronen dan ontbreekt in dat geval de mogelijkheid voor de straling om die elektronen uit het atoom te stoten en zo energie af te staan en dus te verzwakken. Bij een andere stof met kleinere bindingsenergie van de elektronen lukt dat bij diezelfde energie van de röntgenstraling wel en is er dus een kans meer om energie af te staan, er treedt meer verzwakking op. Tabel 1 uit de tekst laat bij 15 keV zien dat cadmium de straling minder goed verzwakt dan koper terwijl het atoomnummer van cadmium groter is dan dat van koper. Dit is afwijkend van de algemene regel die zegt dat een hoger atoomnummer gepaard gaat met een grotere verzwakking. De tabel laat zien dat de onregelmatigheid bij 40 keV weer verdwenen is. De onregelmatigheid treedt selectief bij een bepaalde energie op. Dit verschijnsel staat dan ook bekend onder de naam selectieve absorptie.

Om dezelfde reden kan een geringe verhoging van de energie van de röntgenstraling – namelijk van iets beneden de bindingsenergie van de elektronen naar iets boven de bindingsenergie van de elektronen – sprongsgewijs een kans meer op het afstaan van stralingsenergie geven en gepaard gaan met een grotere verzwakking. In tegenstelling tot de algemene regel geldt dan dat straling met een hogere energie beter verzwakt wordt dan straling met lagere energie. Ook deze onregelmatigheid treedt selectief in een klein energiegebied op.