

ENKELE THEORETISCHE EN TECHNISCHE ASPECTEN
VAN GLAZUURONDERZOEK
MET BEHULP VAN CONTACT-MICRORADIOGRAFIE
EN MICRODENSITOMETRIE

*Werkgroep Tand- en Mondziekten
van de Gezondheidsorganisatie T.N.O.,
Laboratorium voor Microbiologie,
Rijksuniversiteit Utrecht.*

A. GROENEVELD

Inleiding

Sinds Thewlis in 1940 (1) een publikatie het licht deed zien over de toepassing van zachte röntgenstralen bij het glazuuronderzoek, heeft deze methode relatief veel toepassing gevonden. De onderzoekingen van Soni en Brudevold (2, 3, 4) hebben grote bekendheid gekregen en vrijwel iedereen die met behulp van gepolariseerd licht werkt, past ook contact-microradiografie toe (5, 6, 7, 8). Het gebruik van zachte röntgenstralen leverde een schat aan gegevens op wat betreft glazuur-, dentine- en botsamenstelling, maar beperkte zich tot semikwantitatieve bepalingen. Pas de laatste jaren, vooral door het werk van Angmar, Carlström en Glas (9) en Bergman en Lind (10), van het Karolinska Institutet in Stockholm, kan microradiografie gebruikt worden voor kwantitatieve bepalingen van anorganisch materiaal in zich vormend (11), gezond (9) en carieus (10) glazuur.

Hoewel kwantitatieve microradiografie één van de meest nauwkeurige non-destructieve methoden is om glazuur te onderzoeken, is de oorzaak van het bescheiden aantal publikaties ongetwijfeld dat de theorie en de praktijk gecompliceerd zijn.

Het doel van deze publikatie is de lezer te informeren over de achtergrond van kwantitatieve microradiografie en een beeld te geven van de door ons gebruikte methode.

De techniek laat zich als volgt beschrijven:

Van een object wordt een röntgenfoto gemaakt op een zeer fijnkorrelige emulsie met behulp van zachte röntgenstralen (lange golflengte). Het object (b.v. een tandcoupe) ligt hierbij direct op het fotogevoelige materiaal (contact-microradiografie). De verkregen röntgenfoto, het zogenaamde microradiogram, is een absorptiebeeld en bevat informatie over het gehalte aan anorganisch materiaal van een gebruikte tandcoupe.

Met behulp van zwartingsmetingen kan men het anorganisch materiaal in volumeprocenten bepalen.

Achtereenvolgens komen aan de orde:

1. zachte röntgenstralen;
2. absorptie van röntgenstralen;
3. densitometrie (zwartingsmetingen);
4. kwantitatieve bepaling van anorganisch materiaal.

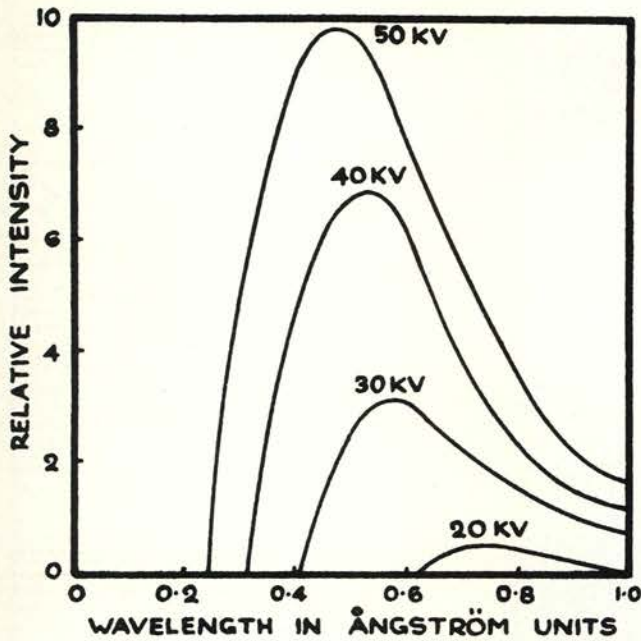
1. *Zachte röntgenstralen*

Om röntgenstralen op te wekken, wordt gebruik gemaakt van de gloeikathodebuis*), waarbij de gloeidraad van de kathode elektronen uitzendt, die door een tussen kathode en anode aangelegde hoogspanning versneld worden en met grote snelheid de anode treffen. De anode reageert door röntgenstralen uit te zenden. Deze röntgenstralen hebben een golfkarakter en verschillen van lichtstralen slechts doordat ze een kortere golflengte (0,01–100 Å) hebben. Zachte röntgenstralen vallen in het gebied met een golflengte tussen 1 en 10 Å. Röntgenstralen met langere golflengten worden ultra-zachte röntgenstralen genoemd. Het röntgenapparaat, zoals dat in de tandartspraktijk gebruikt wordt, zendt harde röntgenstralen uit met een golflengte van 0,2 Å. Men onderscheidt: *a.* witte of remstraling en *b.* karakteristieke straling.

a. Witte straling

De elektronen, die met grote snelheid op de anode botsen worden plotseling geremd en de energie die daardoor vrijkomt wordt omgezet in röntgenstraling en warmte. De anode zendt straling uit met een continuüm aan golflengten: de witte straling (vgl. wit licht). Bij iedere golflengte behoort een eigen intensiteit. Afbeelding 1 laat de witte straling zien, die optreedt bij verschillende kilovoltages. Wanneer de spanning toeneemt, wordt de minimum golflengte kleiner („hardere” straling) en de top van de intensiteitsverdeling

*) Enraf Diffractis 601.



Afb. 1. Witte straling: Toename van de intensiteit en verschuiving van de curve naar een gebied met kortere golflengte door verhoging van de spanning. (Uit: Modern Physics.)

schuift eveneens naar een gebied met kleinere golflengten. De intensiteit van de witte straling is ook afhankelijk van de buisstroom en wel evenredig met de stroomsterkte (aangegeven in mA). Dus verhoging van het voltage geeft een verschuiving van de curve in afbeelding 1 naar links en naar boven; verhoging van de stroomsterkte geeft alleen een verschuiving naar boven.

b. Karakteristieke straling

Wanneer de snelheid van elektronen voldoende groot wordt (door verhoging van het voltage), kunnen zij doordringen tot de binnenste elektronenschillen van de atomen van de anode en daaruit elektronen verwijderen. Ontstaat zo in de K-schil een lege plaats dan wordt deze opgevuld door een elektron uit de L- of M-schil. De vrijkomende energie wordt uitgezonden als een quantum („golfpakketje”) röntgenstraling. Wordt het elektron gevuld uit de L-schil, dan treedt $K\alpha$ -straling, uit de M-schil de „hardere” $K\beta$ -straling op. (Dit heeft niets met de α - en β -straling uit de radioactiviteit te maken.) $K\alpha$ (in feite twee soorten nl. $K\alpha_1 + K\alpha_2$) plus $K\beta$ noemt men de karakteristieke straling van het anodemateriaal. Naarmate het anodemateriaal een hoger atoomnummer heeft, is er meer

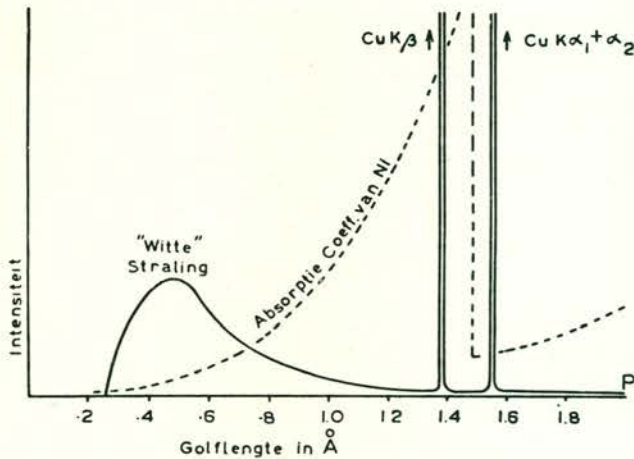
Tabel I. Aanslagspanning van een aantal metalen met bijbehorende golflengten van de $K\alpha$ straling.

Element	Atoomnummer	Golflengte ($K\alpha$) in Å	Aanslagspanning in kV
Chroom	24	2.288	5.4
Mangaan	25	2.101	5.9
IJzer	26	1.936	6.4
Kobalt	27	1.789	6.9
Nikkel	28	1.658	7.5
Koper	29	1.541	8.0
Molybdeen	42	0.713	17.5
Rhodium	45	0.616	20.0
Wolfram	74	0.213	59.0

energie nodig om een elektron uit zijn K-schil te verwijderen. Dat wil zeggen, dat men een hogere spanning moet gebruiken bij elementen met een hoger atoomnummer. Daardoor heeft ieder materiaal zijn eigen spanning, waarboven karakteristieke straling optreedt: de zogenaamde aanslagspanning. In tabel I is deze aanslagspanning voor een aantal metalen aangegeven.

Toename van de buisspanning, evenals verhoging van de stroomsterkte, doet de intensiteit van de K-straling toenemen; de golflengte verandert niet.

In kwantitatief microradiografisch werk gebruikt men bij voorkeur monochromatische straling (straling van één bepaalde golflengte), omdat men dan werkt met een constante absorptiecoëfficiënt. Men kan gebruik maken van polychromatische straling (12) en met behulp van absorptiekanten (zie onder punt 2) bepalingen doen, maar het compliceert de techniek erg. Men kan ook met een monochromator werken, maar in de praktijk past vrijwel iedere onderzoeker een nikkel-filter toe. Een 0.02 mm dik Ni-filter absorbeert, behalve een deel van de witte straling tevens de $K\beta$ -straling zodanig, dat de intensiteitsverhouding van $K\alpha$ en $K\beta$ 600 : 1 wordt (zie afbeelding 2). De invloed van de nu nog optredende witte straling is vrijwel te



Afb. 2. Spectrum van een buis met koper-anode, bedreven met 50 kV. Minimum golflengte volgens (7) = 0.23 Å. De toppen der karakteristieke straling $K\alpha$ en $K\beta$ vallen buiten de figuur; de intensiteit van $K\alpha$ is ongeveer 6 x die van $K\beta$. De absorptiecoëfficiënt van $K\beta$ in Ni is 6 x die van de $K\alpha$ -straling; dit reduceert na passeren van 0,02 mm nikkel de intensiteitsverhouding van $K\alpha$ en $K\beta$ tot 600 : 1.

(Uit: Röntgenanalyse van kristallen. J. M. Bijvoet, N. H. Kolkmeijer en C. H. MacGillavry.)

verwaarlozen (Thewlis, 1940) (1), zodat men na filteren kan spreken van monochromatische straling.

2. Absorptie

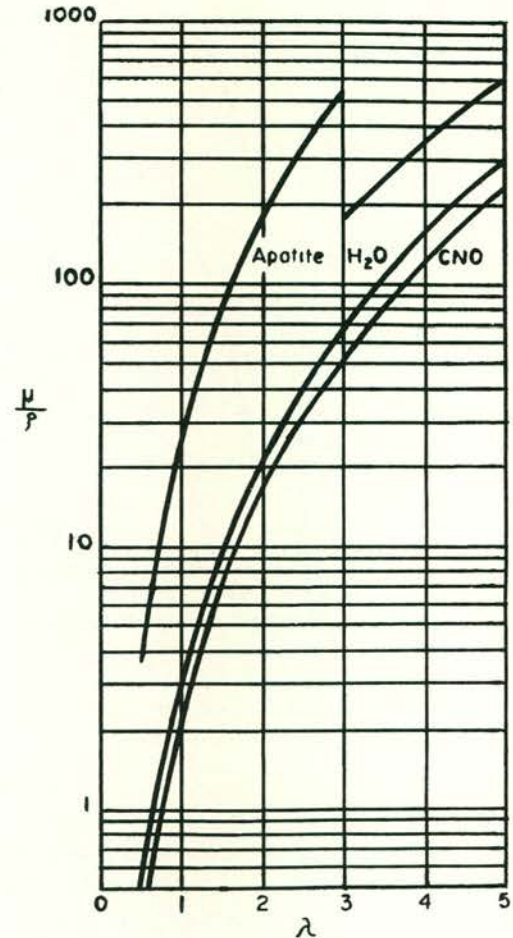
Als een monochromatische bundel röntgenstralen een materiaal van dikte d passeert, dan geldt de volgende formule:

$$X_d = X_0 e^{-\mu d}$$

waarin X_d = intensiteit van de uittreedende bundel,
 X_0 = intensiteit van de invallende bundel,
 e = grondtal van natuurlijke logaritme,
 d = dikte van materiaal,
 μ = lineaire absorptiecoëfficiënt.

De lineaire absorptiecoëfficiënt is een constante voor ieder element, maar niet voor al de verbindingen, die dat element kan aangaan. Gewoonlijk wordt bij berekeningen de zogenaamde massa-absorptiecoëfficiënt $\frac{\mu}{\rho}$ (ρ = soortelijk gewicht van de verbinding) gebruikt.

Deze massa-absorptiecoëfficiënt is wel voor iedere verbinding een constante, die varieert met de golflengte.

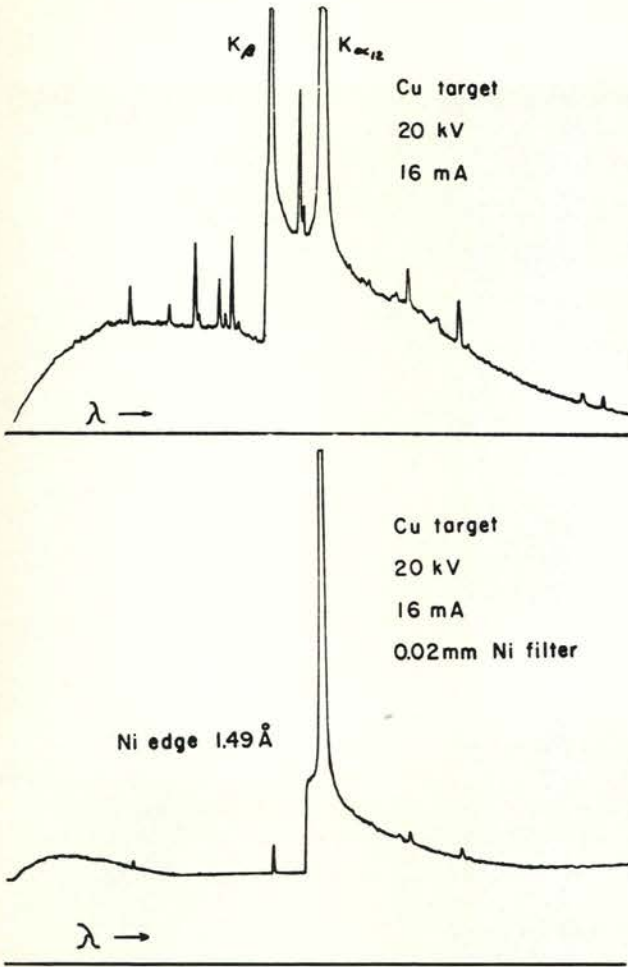


Afb. 3. Verandering van de massa-absorptiecoëfficiënten van apatiet, water en organisch materiaal met de golflengte.

In afbeelding 3 zijn de massa-absorptiecoëfficiënten van apatiet, organisch materiaal en water tegen de golflengte uitgezet. In het gebied met golflengten tussen 0,5 en 3 Å is de massa-absorptiecoëfficiënt van apatiet ongeveer 10x groter dan van eiwitten en water. Bij een golflengte van 3,07 Å treedt een val in absorptie op, een zogenaamde absorptiekant.

Röntgenstralen met langere golflengten zijn, zoals uit de afbeelding blijkt, niet zo geschikt, omdat de invloed van water en eiwitten op de totale absorptie veel groter wordt.

Het meest gebruikte materiaal voor de anode is koper, dat een karakteristieke $K\alpha$ -straling heeft van 1,54 Å. Deze straling is op eenvoudige reeds genoemde wijze monochromatisch te maken door een



Afb. 4. Het effect van een Ni-filter op de polychromatische Cu-straling.

Ni-filter in de stralenbundel te plaatsen. Andere anode metalen zijn titanium ($K\alpha$ 2,74 Å) (13) en scandium ($K\alpha$ 3,02 Å) (14).

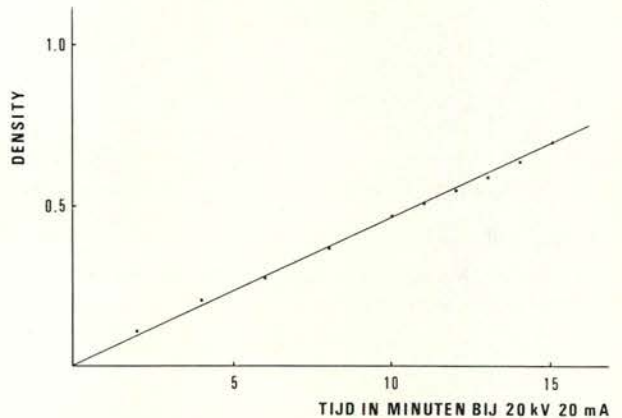
Behalve de optredende lange belichtingstijden heeft met name scandium het nadeel, dat het monochromatiseren moeilijk is. In de meeste publikaties wordt vermeld, dat gebruik gemaakt is van Cu $K\alpha$ -straling en een 0,02 mm Ni-filter. Afbeelding 4 geeft deze straling in een diagram weer.

Het samenspel van foto-emulsie en focus-film afstand bepaalt vervolgens de geschikte belichtingstijd en het juiste kilovoltage. De korrelgrootte van de fotografische emulsie is belangrijk; deze moet zéér klein zijn, omdat het microradiogram zo contrastrijk mogelijk moet zijn. Een andere belangrijke voorwaarde

waaraan de emulsie moet voldoen is, dat de mate van zwarting evenredig is met de hoeveelheid opvallende röntgenstraling.

Van de door ons gebruikte Kodak High Resolution plates is in afbeelding 5 een zwartingscurve gemaakt. De „density” of zwarting wordt gemeten met behulp van een densitometer.

De gebruikte röntgenbuis werd gevoed met 20 kV en 20 mA om geen al te lange belichtingstijd nodig te hebben. Een focus-film afstand van 30 cm geeft op die afstand een redelijk homogeen stralenveld. Henke, Lindberg en Engström (15) hebben berekend, dat de

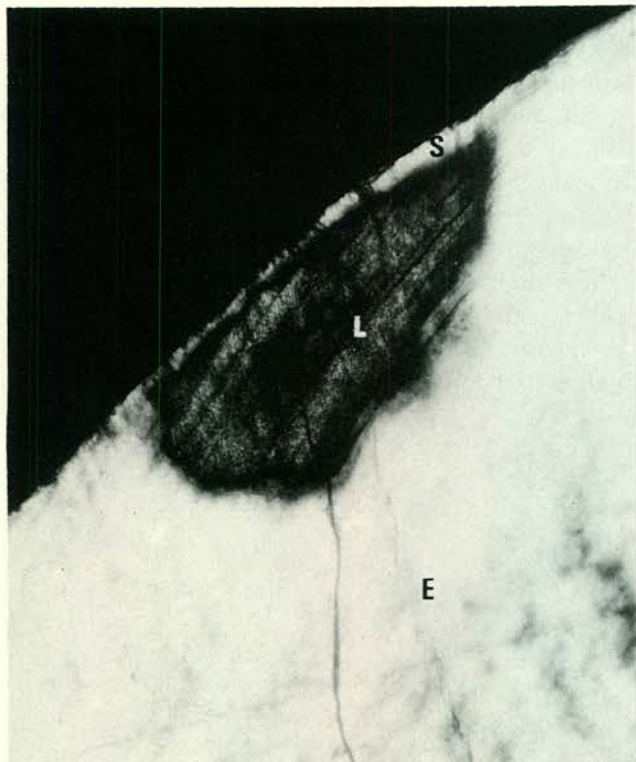


Afb. 5. Lineaire toename van de zwartingsgraad met de belichtingstijd. (Enraf Diffractis 601 met Cu $K\alpha$ -straling op Kodak High Resolution plates.)

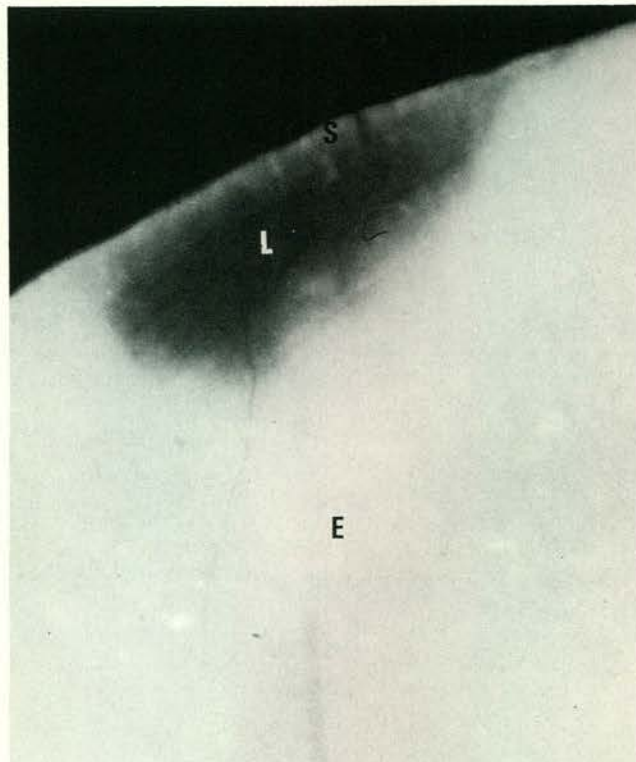
optimale zwartingsgraad voor microdensitometrie tussen 0,3 en 1,2 moet liggen, met een optimum van 0,7. (Voor visuele inspectie is dat optimum 1,7.)

Met behulp van deze gegevens vinden wij in afbeelding 5 een punt op het rechte deel van de „density” curve (waar de film lineair absorbeert), dat correspondeert met een belichtingstijd van 15 minuten. De afbeeldingen 6b en 7b geven twee microradiogrammen, die op de zojuist beschreven manier opgenomen zijn met Cu $K\alpha$ -straling en Ni-filter van 0,02 mm (15 min. 20 kV en 20 mA, focus-film afstand 30 cm).

Met voorbijzien van enkele problemen als focus-grootte en geometrische onscherpte (16) zal blijken dat met behulp van de beschreven techniek een micro-



Afb. 6a. Opname in gepolariseerd licht van een coupe met een natuurlijke cariëslaesie (in water).



Afb. 6b. Contactmicroradiogram van de coupe uit afb. 6a.
S = intacte oppervlakte,
L = ontkalkt gebied,
E = gezond glazuur,
D = dentine.

radiogram te maken is, dat redelijk nauwkeurig informatie verschaft over het gehalte aan anorganisch materiaal van glazuur. Met behulp van microdensitometrie kan men dit anorganisch materiaal in volume-percenten berekenen.

3. Densitometrie

Afbeelding 8 geeft een afbeelding van de gebruikte Leitz microscoop-fotometer M.P.V. De fotometer werpt een smalle lichtbundel door het microradiogram, op een fotomultiplier, die via een versterker met een schrijver verbonden is.

Om in een curve het verloop van de zwarting in een microradiogram op te tekenen (tracing) wordt dit met een lage constante snelheid door de lichtbundel getrokken. Afbeelding 9 laat een tracing zien langs de lijn A-B door de carieuze aantasting van afbeelding 7b.

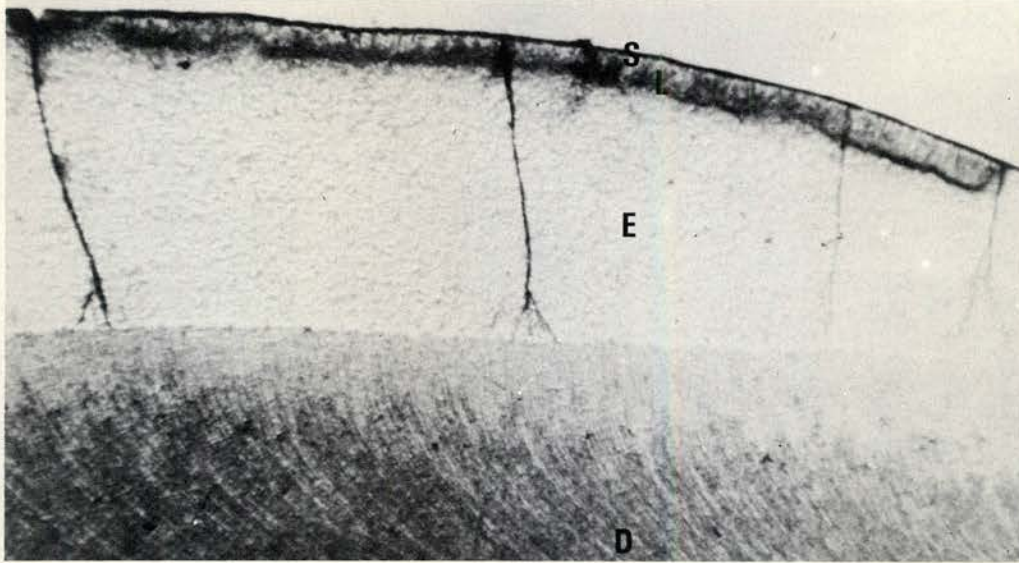
Hoewel een lichtbundel van $1 \times 1 \mu$ gebruikt kan worden, is de invloed van plaatselijke verschillen in het microradiogram (emulsie, korrelgrootte, enz.) zó

groot, dat een minimum spleetbreedte van $10 \times 10 \mu$ gewenst is.

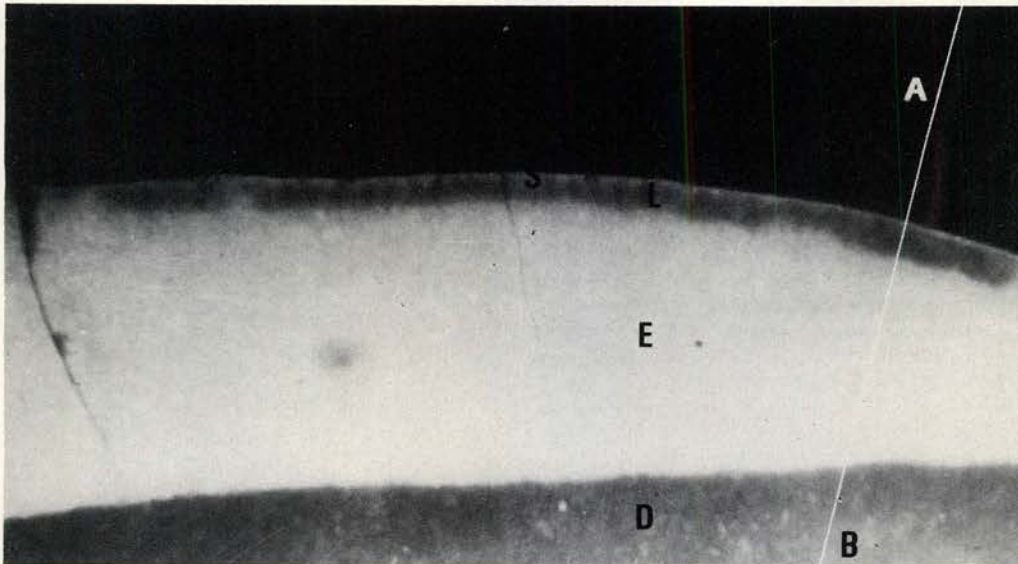
Lindström en Philipson (17) toonden voor een vergelijkbaar densitometer systeem aan, dat de fout van dat systeem verwaarloosbaar klein is, ten opzichte van de spreiding in biologisch materiaal.

4. Kwantitatieve bepaling van anorganisch materiaal

Thewlis (1940) (1), Wallgren (1957) (18), Bergman en Lind (1966) (10) hebben technieken ontwikkeld voor kwantitatieve bepalingen met monochromatische röntgenstralen. De door ons gebruikte methode is die volgens Bergman en Lind (10). Doordat slechts bij benadering de massa-absorptiecoëfficiënt van het onderzochte glazuur bekend is, maakt men tamelijk grote fouten bij de berekening. Om dat te voorkomen gebruikt men een referentiesysteem, nl. een trapje van zuiver aluminium ($25-175 \mu$), waarvan de treden steeds ongeveer 25μ dik zijn. Dit trapje wordt met



Afb. 7a. Opname in gepolariseerd licht van een coupe met een experimentele cariëslaesie (in water).



Afb. 7b. Contact-microradiogram van de coupe uit afb. 7a.
S = intacte oppervlakte,
L = ontkalkt gebied,
E = gezond glazuur,
D = dentine.

iedere coupe mee gefotografeerd, om op deze manier tevens systematische fouten ten gevolge van ontwikkel- en fixeertechniek uit te schakelen.

Na ontwikkelen*) (6 minuten bij 20°C) wordt het microradiogram gefixeerd, met stof- en kalkvrij water gespoeld en in een stofvrije ruimte gedroogd.

Van ieder punt van het microradiogram kan men de zwartingsgraad of „density” bepalen. De density (D) is de logaritme van de verhouding van opvallende (I_0) en doorvallende (I) intensiteit van de lichtbundel en is van

een bepaald punt geen absolute maar een relatieve waarde.

$$D = \log. \frac{I_0}{I}$$

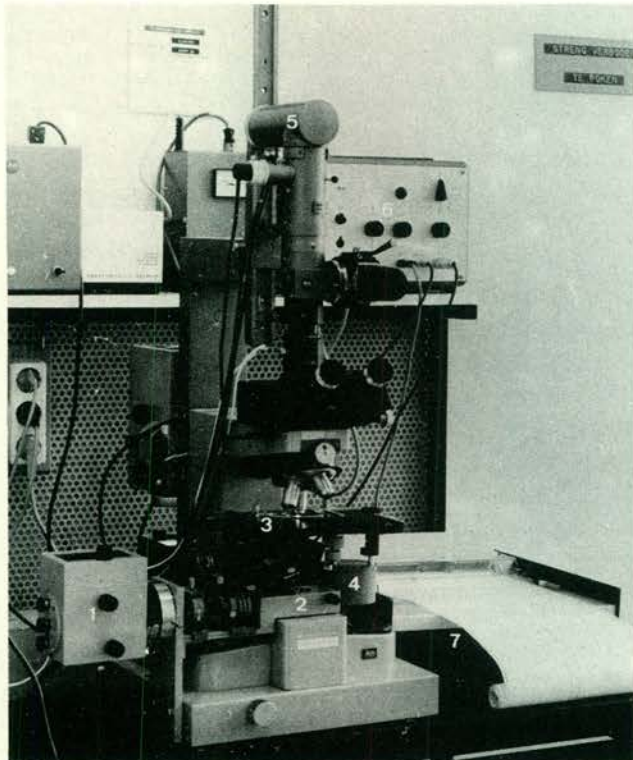
D is evenredig met de uittredende röntgenstraling X_d (1); tevens is $X_d = X_0 e^{-\mu d}$ (2).

Uit (1) en (2) volgt: $D \propto X_0 e^{-\mu d}$, dus $\log. D \propto \log. X_0 - \mu d \log. e$

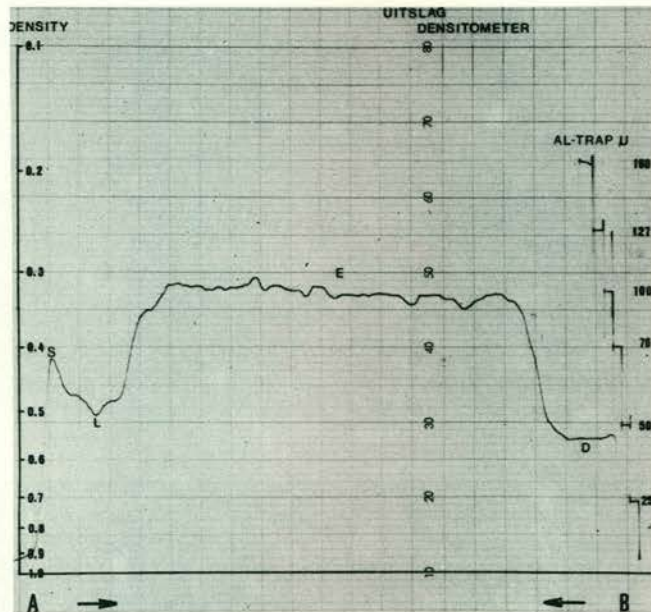
X_0 en e zijn constanten, dus $\log. \frac{1}{D} \propto \mu d$.

Wanneer men in een grafiek $\log. \frac{1}{D}$ uitzet tegen de dikte van een aluminium trapje, zet men in feite μd

*) Ontwikkelaar: Kodak H.R.D. Developer.



Afb. 8. Afbeelding van de Leitz M.P.V. densitometer. Een gestabiliseerde lichtbundel (uit 1) valt via een spiegel (2) door het microradiogram op de objecttafel (3) op een fotomultiplier (5), die via een versterker (6) verbonden is met een schrijver (7). Een aan de objecttafel bevestigde motor (4) zorgt ervoor dat het microradiogram op langzame, constante wijze door de lichtbundel wordt getrokken. Er ontstaat een karakteristieke zwartings-curve (zie afb. 9).



Afb. 9. Densitometer-tracing van de lijn A-B uit afb. 7b. Langs de verticaal neemt de zwartingsgraad af. Rechts de uitslag van het referentie-systeem (trapje van zuiver aluminium met treden van ongeveer 25 μ). S = intacte oppervlakte, L = ontkalkt gebied, E = gezond glazuur, D = dentine.

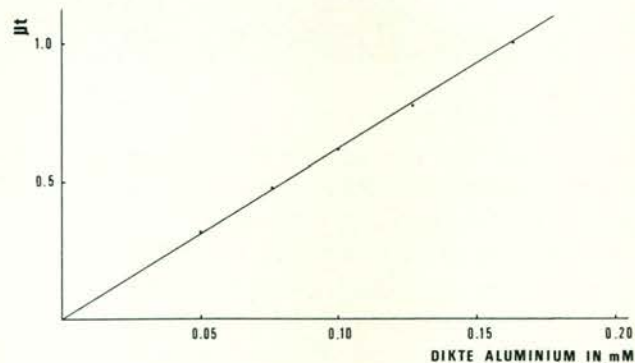
tegen d af. Daar de density D op zichzelf al een logaritme is (nl. van $\frac{I_0}{I}$) moet men de gevonden getallen dus dubbel logaritmeren. Gebruikt men voldoende gemonochromatiseerde straling, dan zal μ constant zijn en de grafiek een rechte lijn opleveren. Met behulp van deze lijn kan van ieder punt in het microradiogram van het glazuur de overeenstemmende dikte aluminium met behulp van het trapje teruggevonden worden. Voor zo'n punt geldt de formule:

$$V = \frac{100(131.5da - 11.3ds)}{(260.5 - 11.3ds)} = \text{anorganische materiaal}$$

in volumeprocenten;

131.5 = lin. abs. coëf. van aluminium,

11.3 = lin. abs. coëf. organisch materiaal en water in glazuur,



Afb. 10. Absorptie van röntgenstralen in een trapje van zuiver aluminium, uitgezet tegen de dikte van aluminium. De rechte lijn geeft aan dat de gebruikte straling voldoende monochromatisch is. (Enraf Diffractis 601 met Cu $K\alpha$ -straling op Kodak High Resolution plates.)

260.5 = lin. abs. coëf. anorganisch materiaal in glazuur,
 da = overeenstemmende dikte aluminium in μ ,
 ds = dikte gebruikte coupe in μ .

Zonder grote fouten te maken kan deze formule vervangen worden door:

$$V = \frac{50.48 da}{ds} \quad (9)$$

Deze formule is wat gemakkelijker te hanteren. Zoals gezegd ligt de optimale density voor microdensitometrie bij 0,7 waardoor men kan bepalen, dat de ideale coupe-dikte dan moet liggen tussen de 70 en 80 μ . Het meten van de coupe-dikte is zéér belangrijk. Men maakt slechts een fout van 1,3% indien men een micrometer gebruikt, die op 0.001 mm nauwkeurig meet. Als de coupe dikker is wordt de relatieve fout kleiner, maar dikker dan 80 μ mag de coupe niet zijn, vanwege de gewenste zwarting van het microradiogram, dat nog met een redelijke belichtingstijd verkregen kan worden. Tot nu toe zijn pogingen om diktemetingen te doen met behulp van interferentielijnen van monochromatisch licht of met behulp van β -stralen nog niet geslaagd te noemen.

Men kan, zoals Bergman en Lind, de coupe langs de gemeten tracings doorsnijden en onder de microscoop meten. Men vernietigt echter de coupe, wat vooral bij experimentele cariës een te groot nadeel is. Van groot belang is, dat de coupe volkomen vlak en planparallel is. De door ons toegepaste techniek om, na het maken

van zaagcoupes volgens Jansen (19), een slijpparaat volgens Friend en Smith (20) te gebruiken, blijkt in de praktijk te voldoen.

Nauwkeurigheid van de methode

De belangrijkste oorzaken van niet-systematische fouten zijn:

1. fouten ten gevolge van de fotografische techniek;
2. fouten die ontstaan omdat dezelfde meetplaats moeilijk terug te vinden is;
3. fouten in de diktemeting van de coupe op de plaats waar gemeten wordt;
4. fouten in het densitometrische systeem en de aflezing van de resultaten.

Om de invloed van deze fouten nader te bepalen werden tien microradiogrammen gemaakt van een coupe met een experimentele cariëslaesie en een plaatje zuiver gipskristal.

Een eigenschap van dit gipsplaatje is, dat onder- en bovenzak volkomen planparallel zijn, wat de meting van de dikte nauwkeurig maakt. Men kan berekenen, dat de lineaire absorptiecoëfficiënt van Ca in gips 141 is, zodat de formule wordt:

$$V_{Ca} = \frac{100 (131.5 \times da)}{141 \times ds}$$

waarin ds = dikte van het gipsplaatje. In tabel II staan de resultaten met de bijbehorende gemiddelden en standaardafwijking vermeld.

Van de coupe werden 2 tracings gemaakt; één door de cariëslaesie en één door gezond glazuur. Steeds

Tabel II. Resultaten in volumepercenten van metingen in 10 microradiogrammen van een coupe met een experimentele cariëslaesie en een plaatje zuiver gipskristal. (Verklaring zie tekst.)

No.	Onderliggend gezond glazuur	Ontkalking	Oppervlakte v. d. laesie	Gezond glazuur	Gips
1	81.3	19.1	56.6	82.2	100.7
2	81.9	19.1	55.5	82.8	99.4
3	85.8	19.6	60.0	86.8	101.9
4	81.9	17.9	60.0	82.8	98.2
5	81.3	19.1	54.4	82.2	99.4
6	84.7	19.1	58.9	85.6	100.7
7	83.6	19.1	60.0	84.5	100.7
8	83.0	19.6	58.9	82.8	100.7
9	81.3	20.2	59.5	82.2	101.9
10	84.1	18.5	62.2	85.1	101.9
Gemiddeld	82.9	19.1	58.6	83.7	100.6
Standaardafwijking	1.6	2.0	2.4	1.6	1.2

Tabel III. Resultaten in volumepercenten van 10 metingen in één microradiogram van een coupe met een experimentele cariëslaesie en een plaatje zuiver gipskristal. (Verklaring zie tekst.)

No.	Onderliggend gezond glazuur	Ontkalking	Oppervlakte v. d. laesie	Gips
1	77.5	17.4	58.3	99.4
2	78.5	17.4	59.5	100.7
3	78.5	18.5	57.7	98.2
4	77.5	17.9	59.5	98.2
5	78.5	17.9	60.0	98.2
6	79.1	18.5	57.7	98.2
7	80.2	19.1	59.5	99.4
8	80.8	19.1	59.5	98.2
9	79.1	18.5	57.7	99.4
10	79.1	19.1	57.7	100.7
Gemiddeld	78.9	18.3	58.7	99.1
Standaardafwijking	1.1	0.7	1	1

werden dezelfde punten vergeleken. In het gezonde glazuur was dit een punt zo dicht mogelijk aan de oppervlakte. In de cariëslaesie werden 3 punten gekozen; één direct onder de laesie in het gezonde glazuur, één in de laesie en wel op het diepste punt van de ontkalking en één in de relatief intacte oppervlakte.

Bergman bepaalde de standaardafwijking van zijn methode op 1,7 na 10 metingen in gezond glazuur.

Een indruk van de som van de hierboven genoemde niet systematische fouten geven de kolommen 1 en 4 van tabel II. Het gemiddelde van de bepaling in tien verschillende microradiogrammen in kolom 4 is 83,7 met een standaardafwijking van 1,6. De 95% betrouwbaarheidsgrenzen van deze bepaling zijn $83,7 \pm 1,0$.

De invloed van de fouten 2 en 3 is praktisch geheel geëlimineerd, wanneer een gipsplaatje gebruikt wordt. De standaardafwijking van kolom 5 uit tabel II is dan ook kleiner.

De invloed van fout 2 spreekt het sterkst daar waar de verschillen in gehalte aan anorganisch materiaal van dicht opeen gelegen plaatsen het grootst zijn.

Het is aannemelijk te veronderstellen, dat dit in de carieuze laesie en zijn bedekkend oppervlak is. Dit kan dan de verklaring zijn voor de wat grotere standaardafwijking in deze beide kolommen 2 en 3. In de praktijk volstaat men met één meting, zodat fout 2 niet voorkomt.

Wanneer tien metingen in hetzelfde microradiogram op dezelfde plaats gedaan worden, zullen fouten ten gevolge van 1 en 3 uitgeschakeld worden. Tabel III toont de resultaten hiervan.

De standaardafwijking in kolom 1 voor gezond

glazuur is 1,1 bij een gemiddelde van 78,9, gemeten in hetzelfde microradiogram. De 95% betrouwbaarheidsgrenzen zijn nu $78,9 \pm 0,7$. De te meten plaats is in één microradiogram veel nauwkeuriger terug te vinden, door gebruik te maken van een markant punt. Vandaar dat de standaardafwijking van kolom 2 en 3 uit tabel III nu kleiner zijn dan in tabel II. De laatste kolom met de resultaten van het gipsplaatje geeft, omdat nu de fouten 1, 2 en 3 uitgeschakeld zijn, de fout van het densitometrische systeem aan. Deze fout is volgens tabel III: 1%.

De schrijver maakt van deze gelegenheid gebruik om zijn dank te betuigen aan Prof. Dr. P. G. de Haan en Drs. D. van Genderen, zonder wier hulp dit artikel niet geschreven zou zijn.

Samenvatting:

Semi-kwantitatieve microradiografie wordt op grote schaal toegepast. Pas de laatste jaren behoort, vooral door het werk van Angmar, Carlström en Glas, en Bergman en Lind, ook kwantitatieve microradiografie tot de mogelijkheden. De theoretische achtergrond van deze methodiek wordt behandeld, aan de hand van een drietal onderwerpen: zachte röntgenstralen, absorptie van röntgenstralen en densitometrie.

Tenslotte wordt vrij gedetailleerd een methode om kwantitatieve bepalingen van anorganisch materiaal in glazuur te doen, beschreven. Een röntgendiffractor (Diffractis 601 Enraf) met koperanode wordt gebruikt om röntgenstraling op te wekken. De straling wordt gemonochromatiseerd door een 0,02 mm Ni-filter in de stralenbundel te plaatsen; men verkrijgt op deze manier $\text{Cu } K\alpha$ -straling met een golflengte van 1,54 Å. Microradiogrammen van tandcoupes met een dikte van 70–80 μ worden vervaardigd op Kodak High Resolution plates, door 15 minuten te belichten met 20 kV en 20 mA, waarbij de focus-film afstand 30 cm is. De density van het microradiogram ligt dan tussen 0,3 en 0,7.

Vervolgens worden kwantitatieve bepalingen van anorganisch materiaal gedaan door middel van zwaarheidsmetingen in het microradiogram met behulp van een densitometer (Leitz M.P.V.). De fout van het densitometrische systeem is bepaald op 1%.

Summary:

Title: Some theoretical and technical aspects of the study of enamel with the aid of contact microradiography and microdensitometry.

Semi-quantitative microradiography is being applied on a large scale; it is only in the past few years that quantitative microradiography has been made possible by the work of, in particular, such investigators as Angmar, Carlström, Glas & Bergman, and Lind. The theoretical aspects of this method are discussed with special reference to three subjects: soft roentgen rays, absorption of roentgen rays, and densitometry.

A fairly detailed description is then presented of a method of quantitative determination of inorganic material in enamel. A roentgen diffractor (Diffractis 601 Enraf) with copper anode is used to generate roentgen radiation. The radiation is monochromated by placing a 0,02 mm nickel filter in the beam; in this way one obtains $CuK\alpha$ radiation with a wavelength of 1.54 Å.

Microradiograms of dental sections of 70–80 μ thickness are obtained on Kodak High Resolution plates by 15 minutes' exposure with 20 kV and 20 mA, at a ffd of 30 cm. The density of such microradiograms is between 0.3 and 0.7.

Next, quantitative determinations of inorganic material are carried out by measuring densities in the microradiogram with the aid of a densitometer (Leitz MPV). The error of the densitometric system was found to be 1%.

Literatuur:

1. Thewlis, J. (1940): The structure of teeth as shown by x-ray examination. Medical research council, Spec. Rep., p. 238.
2. Soni, N. N., Brudevold, F. (1959): A microradiographic and polarizing microscopic study of sound enamel. J Dent Res 38: 1181.
3. Soni, N. N., Brudevold, F. (1959): Microradiographic and polarized light studies of initial carious lesions. J Dent Res 38: 1187.
4. Soni, N. N. (1965): Mineralization of dental tissues as measured by microradiography. Am J med Electronics 4: 20.

5. Soni, N. N., Brudevold, F. (1960): Microradiographic and polarized light studies of artificially produced lesions. J Dent Res 39: 233.
6. Darling, A. I. (1956): Studies of the early lesion of enamel caries with transmitted light, polarized light and radiography. Br Dent J 101: 289 and 329.
7. Silverstone, L. M. (1967): Observations on the dark zone in early enamel caries and artificial caries-like lesions. Car Res 1: 261.
8. Houwink, B. (1970): Quantitative polarized-light microscopy of sound surface enamel. J Dent Res 49: 370.
9. Angmar, B., Carlström, D., Glas, J. E. (1963): Studies on the ultrastructure of dental enamel. J Ultrastruct Res 8: 12.
10. Bergman, G. Lind, P. O. (1966): A quantitative microradiographic study of incipient enamel caries. J Dent Res 45: 1477.
11. Angmar-Männson, B. (1971): A quantitative microradiographic study on the organic matrix of developing human enamel in relation to the mineral content. Arch oral Biol 16: 135.
12. Engström, A. Creulich, R. C., Henke, B. L., Lundberg, B. (1957): High-Resolution contact-microradiography with ultra-soft polychromatic x-rays. In x-ray-microscopy and microradiography, Coolett e.a. Academic Press. New York.
13. Gwinnett, A. J. (1967): The ultrastructure of the prismless enamel of permanent human teeth. Arch oral Biol 12: 381.
14. Gwinnett, A. J. (1967): Scandium as a target material in microradiography. J Dent Res 46: 1479.
15. Henke, B. L., Lundberg, B., Engström, A. (1957): Proc. Symp. x-ray - Microscopy and Microradiography, Cambridge, England. 1956, p: 240. Academic Press. New York.
16. Gwinnett, A. J. (1965): The microradiographic image. J Dent Res 44: 616.
17. Lindström, B., Philipson, B. (1969): Microdensitometer system for microradiography. Histochem 17: 187.
18. Wallgren, G. (1957): Proc. Symp. X-ray - Microscopy and Microradiography, Cambridge, England. 1956. Academic Press. New York.
19. Jansen M. T. (1950): An improved method for the preparation of „serial” sections of undecalcified dental tissues. J Dent Res 29: 401.
20. Friend, J. V., Smith, G. S. (1965): Recent modifications to our technique of preparing thin, flat, polished tooth sections. J Med Lab Techn 22: 4.

Adres: Catharijnesingel 59, Utrecht.