

## POST ACADEMIAM

## GEAVANCEERDE ANALYSETECHNIEK VOOR BIOMECHANISCHE TOEPASSINGEN IN DE TANDHEELKUNDE

H. W. POORT\*)

M. C. R. B. PETERS

*Uit het Instituut Conserverende Tandheelkunde  
voor Volwassenen van de Katholieke Universiteit  
te Nijmegen.*

*Hoofd: Prof. Dr. A. J. M. Plasschaert.*

*Trefwoorden: Biomechanica – Onderzoekmethode – Eindige Elementen Methode*

## 1. Inleiding

De krachten, die optreden in gebitselementen en omliggende weefsels, zijn reeds meer dan een eeuw onderwerp van tandheelkundig onderzoek geweest. Met de snelle ontwikkeling van de tandheelkunde in de laatste tientallen jaren is ook de interesse gegroeid in het mechanisch effect van ingrepen in het tandkaakstelsel.

Fundamentele moeilijkheden bij het uitvoeren van spanningsanalyses van tandheelkundige structuren en constructies hebben altijd gelegen in:

- onregelmatige geometrie;
- gevarieerde belastingspatronen;
- complex materiaalgedrag.

In de mechanica is het laatste decennium een nieuwe analysetechniek ontwikkeld, waarbij de hierboven opgesomde moeilijkheden geen wezenlijke belemmering meer behoeven te vormen. Deze op de computer georiënteerde techniek, de zogenaamde Eindige Elementen Methode, wordt door biomechanische onderzoekers in de tandheelkunde, evenals in andere vakgebieden in toenemende mate gebruikt.

In een aantal artikelen zal aandacht worden besteed aan:

- de aanpak van de eindige elementenmethode (E.E.M.) en de plaats die deze methode inneemt te midden van andere analysetechnieken;
- de resultaten van onderzoek, die verkregen zijn in onderzoekprojecten uitgevoerd aan het Instituut

Conserverende Tandheelkunde voor Volwassenen, Katholieke Universiteit, Nijmegen, in samenwerking met de Vakgroep Technische Mechanica (Technische Hogeschool, Eindhoven) en het Department of Dental Materials (University of Michigan, Ann Arbor).

Dit eerste artikel richt zich geheel op de methode en de mogelijkheden van dergelijk onderzoek. Een goed begrip van deze betrekkelijk nieuwe analysetechniek is nodig om de verkregen onderzoekresultaten beter naar waarde te kunnen schatten.

Tussen allerlei andere spannings- en rekenanalysetechnieken neemt de E.E.M. een geheel eigen plaats in. Voor- en nadelen van verschillende onderzoekmethoden zullen de revue passeren. Aan de hand van tandheelkundige voorbeelden wordt de E.E.M. globaal uitgelegd.

Tot slot worden een aantal onderzoekmogelijkheden van dit doeltreffend analysegereedschap aangegeven voor biomechanisch onderzoek in de tandheelkunde.

## 2. Onderzoekmethoden

Het mechanisch gedrag van bijvoorbeeld tandstructuren kan – globaal gezien – op twee wijzen worden onderzocht (afb. 1). Men kan gebruik maken van experimentele methoden of van mathematische modellen (Breklemans en Poort, 1973).

*Experimentele methoden*

Een experimentele methode kan ofwel direct aan de te onderzoeken tand-

*Samenvatting:*

In dit eerste artikel van een serie, waarin het mechanisch gedrag centraal staat, wordt een indeling gepresenteerd van analysemethoden naar het mechanisch gedrag van tandheelkundige structuren en constructies.

Uiteengezet wordt hoe spanningsanalyses met behulp van een numerieke mathematische methode, de zogenaamde Eindige Elementen Methode (E.E.M.) kunnen worden uitgevoerd. Voorbeelden worden gegeven van de wijze waarop de resultaten – gemakkelijk interpreteerbaar – kunnen worden gepresenteerd.

Een globaal overzicht wordt gegeven van de toepassingsmogelijkheden van de eindige elementenmethode bij biomechanisch onderzoek binnen de tandheelkunde.

structuur worden uitgevoerd ofwel indirect, wanneer metingen worden verricht aan een materieel model dat als afspiegeling van de werkelijkheid dient.

Voorbeelden van een *directe* benadering zijn:

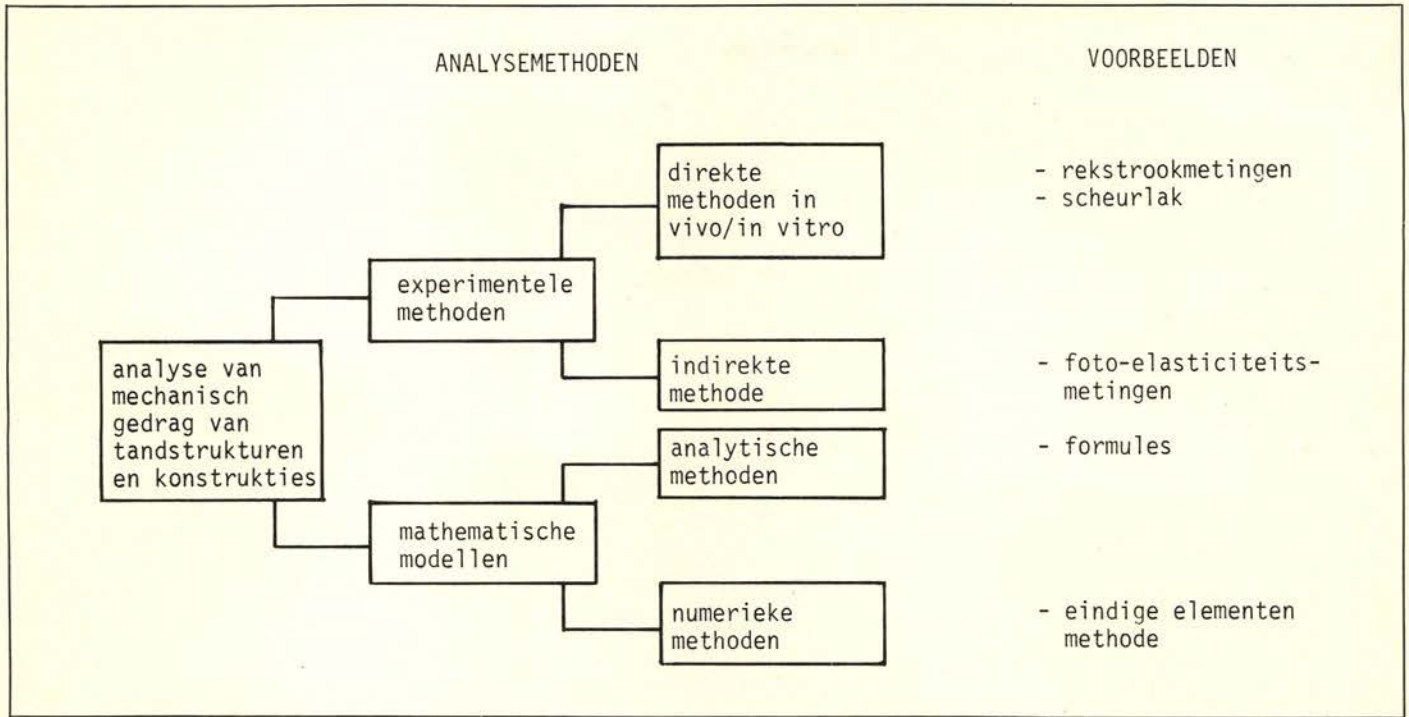
- Metingen met rekstrookjes, in vivo en in vitro, aan gebitselementen (Kakudo et al., 1967). Hiermee wordt de rektoestand op onderscheiden plaatsen aan het oppervlak gemeten.
- Metingen met behulp van scheurlak (Craig en Peyton, 1965). Hiermee wordt een globaal overzicht van het verloop van het rekpatroon aan het oppervlak verkregen.

Voorbeeld van een *indirecte* benadering is het foto-elastisch onderzoek (Granath, 1963, 1964; Craig et al., 1978). Met deze tot nu toe veel gebruikte techniek worden spanningsanalyses uitgevoerd aan modellen van tandheelkundige constructies. De modellen zijn gemaakt van foto-elastisch materiaal.

Een uitgebreid overzicht van experimentele onderzoekmethoden voor mechanische analyse van tandheelkundige structuren wordt gegeven door Peters (1981).

\*) Dienst Mond- en Tandheelkunde, Vrije Universiteit, Brussel.





Afb. 1. Schematisch overzicht van onderzoekmethoden.

Een voordeel van de directe methode vormt het feit dat verificatie-experimenten achterwege kunnen blijven (voor de indirecte methode geldt dit niet).

De belangrijkste nadelen van de experimentele methode zijn:

- moeilijkheden bij het generaliseren van de resultaten;
- problemen bij het veranderen van de parameters;
- moeilijkheden bij opname in modellen van verschillen in materiaalgedrag;
- omslachtigheid, waardoor deze methode zeer veel tijd vergt.

*Mathematische methoden*

De fysische werkelijkheid van tandheelkundige structuren en constructies kan worden geschematiseerd en in termen van mathematische vergelijkingen worden vastgelegd. Een dergelijk model dient de werkelijkheid met betrekking tot de vraagstelling adequaat te beschrijven. De essentiële parameters dienen zo goed mogelijk te worden gedefinieerd. Het model moet aan de realiteit getoetst kunnen worden door middel van verificatie- of falsificatie-experimenten. Opgemerkt moet worden dat het doel van een dergelijk experiment fundamenteel verschilt van het doel van experimenten

als beschreven onder experimentele methoden.

Uitgaande van de veronderstelling dat aangetoond kan worden dat het model de werkelijkheid adequaat beschrijft, biedt deze methode de volgende voordelen:

- de parameters kunnen zonder principiële moeilijkheden worden veranderd;
- de verkregen informatie is veelomvattend;
- de resultaten kunnen beter worden generaliseerd.

Als nadeel van mathematische methoden geldt het volgende:

- het op een juiste wijze beschrijven van de parameters (modelvorming) kan zeer complex zijn;
- het is in principe nodig verificatie- of falsificatie-experimenten op te zetten.

Mathematische modellen kunnen gebruik maken van analytische betrekkingen of van een numerieke methode. Bij een *analytisch* model moet, wanneer bestaande analytische theorieën worden gebruikt, een aanzienlijke vereenvoudiging van de realiteit worden bewerkstelligd. De mechanische analyse kan alleen worden uitgevoerd met betrekkelijk eenvoudige geometrie,

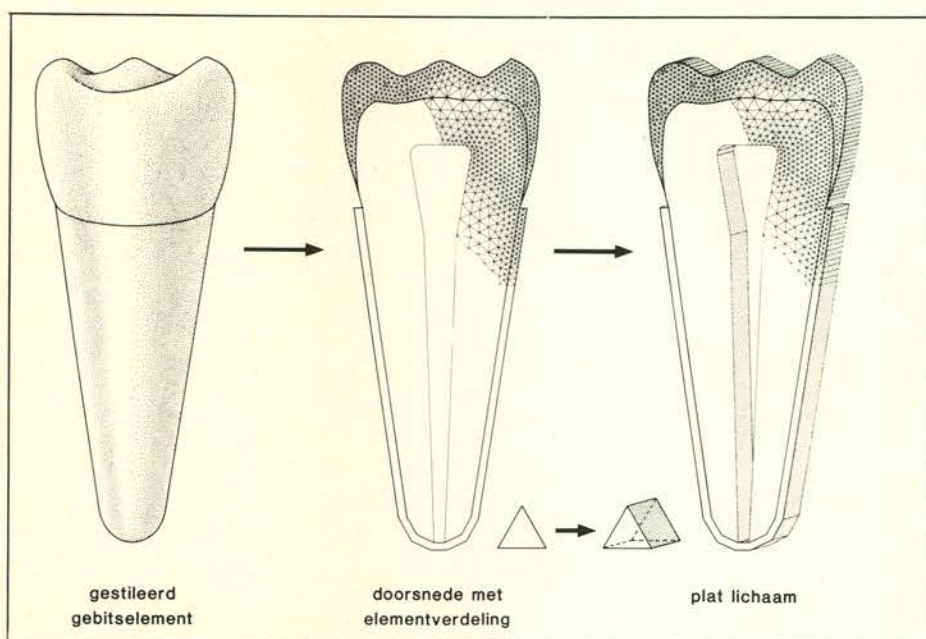
materiaalgedrag en belastingssituatie. Een voorbeeld van een dergelijke studie is te vinden in Ledley et al. (1968). Een belangrijk voordeel van de analytische methode is gelegen in het feit, dat het effect van parameters in één formule – zo deze te vinden is – tot uitdrukking wordt gebracht.

Tegenwoordig is het in de toegepaste mechanica gebruikelijk computer-georiënteerde *numerieke methoden* te hanteren, waarbij het mogelijk is, rekening te houden met ingewikkelde geometrie, materiaaleigenschappen en belastingssituaties. Dergelijke computer-georiënteerde technieken hebben in technische toepassingen een grote vlucht genomen. In biomechanische analyses van tandheelkundige structuren en constructies wordt steeds veelvuldiger gebruik gemaakt van een dergelijke methode, de zogenaamde Eindige Elementen Methode (E.E.M.). Alvorens in volgende artikelen resultaten te presenteren zal deze voor de tandheelkundige onderzoekwereld betrekkelijk onbekende E. E. M. op een globale en op de tandheelkunde gerichte wijze worden beschreven.

*3. De eindige elementenmethode*

Spanningsanalyse met behulp van de





Afb. 2. Tweedimensionale schematisering van een gebitselement.

E.E.M. is een veelgebruikte techniek geworden bij gecompliceerde fysische vraagstukken (Zienkiewicz, 1977).

Zoals in de vorige paragraaf is vermeld, gaat de E.E.M. uit van schematisering van het te onderzoeken object. Dit object wordt in een eindig aantal zogenaamde elementen verdeeld, gemarkeerd door zogenaamde knooppunten. Deze elementen hebben een eenvoudige vorm, bijvoorbeeld driehoeken of vierkanten voor een tweedimensionaal model en bijvoorbeeld tetraëders of prisma's voor een driedimensionaal model. De grootte en vorm van de elementen wordt zodanig gekozen dat:

- de geometrie van het te onderzoeken object tot op het gewenste niveau van nauwkeurigheid wordt beschreven;
- de berekeningen voldoende nauwkeurig zijn.

Aan de elementen worden fysische eigenschappen toegekend, die per element verschillend mogen zijn.

Het mechanisch gedrag van een dergelijk element wordt beschreven door een aantal wiskundige vergelijkingen en is in het algemeen aanzienlijk minder complex dan een wiskundige beschrijving van het totale te onderzoeken object. De verschillende elementen worden aan elkaar gekoppeld in de knooppunten. Mathematisch betekent dit, dat er een (groot) aantal ver-

gelijkingen in zogenaamde knooppuntverplaatsingen ontstaat. Het opstellen en oplossen van deze vergelijkingen bij een gegeven belasting van het model vindt plaats door middel van een computer. Daarna worden de spanningen in het model berekend.

### 3.1. Gegevensdefinitie

Afhankelijk van het onderzoekdoel wordt een schematisering (model) van de werkelijkheid gemaakt. De gegevens, die nodig zijn voor analyse van een dergelijk model met de E.E.M. hebben betrekking op:

- de geometrie;
- de materiaaleigenschappen;
- de belastingssituatie;
- de grensvlakken;
- de ondersteuning.

Aan de hand van tandheelkundige structuren en constructies wordt in de volgende paragrafen beschreven hoe de benodigde informatie er uitziet.

#### Geometrie

In de E.E.M. wordt de geometrie opgebouwd gedacht uit zogenaamde elementen met een eenvoudige vorm. Wanneer voor een fijne driedimensionale elementverdeling wordt gekozen, kan de geometrische beschrijving vrijwel exact overeenkomen met het te onderzoeken object. In afbeelding 2 is

een voorbeeld gegeven van een tweedimensionale schematisering van een gebitselement.

Het gebitselement is in dit voorbeeld in vlakke, driehoekige elementen verdeeld. Een gedeelte van de betrekkelijk fijne elementverdeling is weergegeven. De hoekpunten van de driehoeken zijn in dit voorbeeld tevens de knooppunten. De geometrie wordt in de E.E.M. volledig vastgelegd door:

- Een geometrische definitie van het model. In het voorbeeld van afbeelding 2 gaat het om de tweedimensionale contouren van glazuur, dentine, pulpa en parodontium. Tevens wordt de dikte van het model vastgesteld.
- Een verdeling in elementen. De coördinaten van de elementen worden vastgelegd. In het voorbeeld is een gedeelte van de elementverdeling afgebeeld. Eén element is vergroot weergegeven.
- Een nummering van knooppunten en elementen. In het voorbeeld krijgt elk driehoekje een nummer. De bijbehorende knooppunten - in dit geval de hoekpunten van de driehoeken - worden ook eenduidig genummerd. Om een verdeling in elementen te maken kan in een aantal gevallen gebruik gemaakt worden van computerprogramma's. Deze zogenaamde 'meshgeneratoren' zijn geschikt voor tweedimensionale en axisymmetrische modellen.

#### Materiaaleigenschappen

Aan het in elementen verdeelde object worden materiaaleigenschappen toegekend. Hierbij kan van element tot element verschil gemaakt worden. Het is zelfs mogelijk richtingsafhankelijk materiaalgedrag in te voeren. Anisotroop en inhomogeen materiaalgedrag kan hierdoor worden gesimuleerd. Deze mogelijkheden maken de E.E.M. tot een doeltreffend analysegereedschap voor de biomechanica.

Bij homogeen en isotroop gedrag wordt voor verschillende gebieden (glazuur, dentine, pulpa en parodontium) een elasticiteitsmodulus, ( $E$ ) en een ratio van Poisson ( $\nu$ ) ingevoerd.



### Grensvlakken

De grensvlakken tussen diverse gebieden kunnen op verschillende manieren aan elkaar gekoppeld zijn (b.v. hechte verbinding of een verbinding met spelings- en/of wrijvingsmogelijkheid). De koppelvoorwaarden tussen de verschillende deelgebieden kunnen, nadat ze gespecificeerd zijn, in daarvoor geschikte computerprogramma's worden ingevoerd.

In het voorbeeld van afbeelding 2 zijn de deelgebieden hecht aan elkaar verbonden (glazuur-dentinegrens, pulp-dentinegrens en parodontium-dentinegrens).

### Belastingssituatie

Het krachtenpatroon, waaraan het object is onderworpen, wordt in het model nagebootst door in één of meerdere knooppunten krachten aan te brengen, die overeenkomen met de belastingsituatie van het object. In het voorbeeld zijn in de knooppunten, die liggen op het midden van de knobbelhellingen, krachten loodrecht op die hellingen aangebracht.

### Ondersteuning

De te onderzoeken structuur en/of constructie moet op een of andere manier met de vaste wereld verbonden zijn. Dit kan worden gerealiseerd door de verplaatsingsmogelijkheden (translaties en/of rotaties) van een of meer knooppunten voor te schrijven. In het voorbeeld wordt het parodontium star verbonden gedacht met de vaste wereld (het omliggende bot wordt star verondersteld). In het model wordt dit gesimuleerd door de verplaatsingsmogelijkheden van de knooppunten op de buitenrand van het parodontiumgebied te onderdrukken.

### 3.2. Rekenproces

De gegevens, die in de vorige paragraaf beschreven zijn, worden in getalvorm in de computer ingevoerd. Het behoeft nauwelijks betoog dat de hoeveelheid vast te leggen gegevens al snel omvangrijk kan zijn. Het tweedimensionale tandmodel in afbeelding 2 bestaat al uit circa 4000 elementen. Het verdelen in elementen, het opme-

ten van coördinaten en het toekennen van materiaaleigenschappen kan een zeer tijdrovend karwei zijn, wanneer dit met de hand wordt uitgevoerd. Vaak zijn computerprogramma's beschikbaar, waarmee het mogelijk is met relatief weinig geometrische gegevens de benodigde invoer voor de computerprogramma's van de E.E.M. samen te stellen.

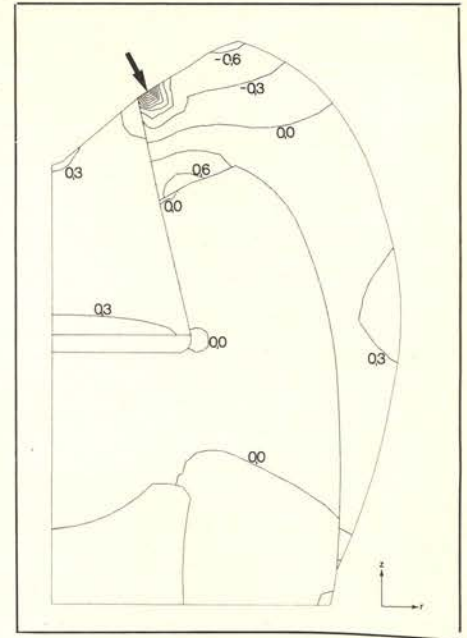
Met de computer worden berekeningen uitgevoerd, gebaseerd op de E.E.M. De kern van de programma's bestaat uit het oplossen van een - afhankelijk van het aantal en type element - groot stelsel vergelijkingen. Numerieke gegevens over mechanische grootheden zijn het resultaat van het rekenproces.

### 3.3. Resultaten

De resultaten van de rekenmethode met de E.E.M. staan in beginsel ter beschikking in de vorm van de printuitvoer van de computer en hebben betrekking op:

- de verplaatsingen van ieder knooppunt;
- de rekken in ieder element;
- de spanningen in ieder element;
- de hoofdspanningen, de hoofdrichtingen van de spanningen en de ideële (of vergelijkspanning) voor ieder element.

Het interpreteren van deze numerieke gegevens is, zeker wanneer het gaat om structuren en/of constructies verdeeld in een groot aantal elementen, alleen goed mogelijk wanneer gebruik gemaakt wordt van grafische weergave van de resultaten. Soms kan de onderzoeker die de E.E.M. hanteert, beschikken over computerprogramma's en -apparatuur, die gericht zijn op het grafisch afbeelden van rekenresultaten op beeldscherm en op papier. Het interpreteren en zoeken naar interessante analyseresultaten kan hierdoor aanzienlijk worden vergemakkelijkt. In de volgende deelparagrafen wordt aan de hand van computertekeningen - vaak 'plots' genoemd - nader duidelijk gemaakt, welke resultaten bereikt kunnen worden met de E.E.M. De voorbeelden, genomen uit de disserta-



Afb. 3. Voorbeeld van een plotfiguur, waarin verbindinglijnen worden aangegeven tussen punten met een gelijk spanningsniveau ( $N/mm^2$ ).

tie van Peters (1981), zijn resultaten van een axisymmetrische modelanalyse van een molaar.

### Spanningen en rekken\*

In een axisymmetrisch driedimensionaal model wordt de spanningstoestand gekarakteriseerd door vier spanningsgrootheden: radiale spanning ( $\sigma_r$ ), tangentiële spanning ( $\sigma_t$ ), axiale spanning ( $\sigma_z$ ) en axiale schuifspanning ( $\tau_{rz}$ ). Elk van deze spanningen kan apart in een figuur worden afgebeeld, waarin lijnen staan aangegeven, die punten met een gelijk spanningsniveau verbinden (afb. 3). Een dergelijke afbeelding is te lezen als een geografische hoogtkaart, waarop hoogtelijnen staan aangegeven. De in de afbeelding aangebrachte getallen geven de spanningsniveaus weer in  $N/mm^2$ . Een negatieve waarde geeft drukspanning aan, een positieve waarde duidt op trekspanning.

In de mechanica zijn er voor technische toepassingen criteria ontwikkeld om een aantal spanningsgrootheden om te rekenen in een enkele grootheid. Deze zogenaamde ideële spanning ( $\sigma_{id}$ )

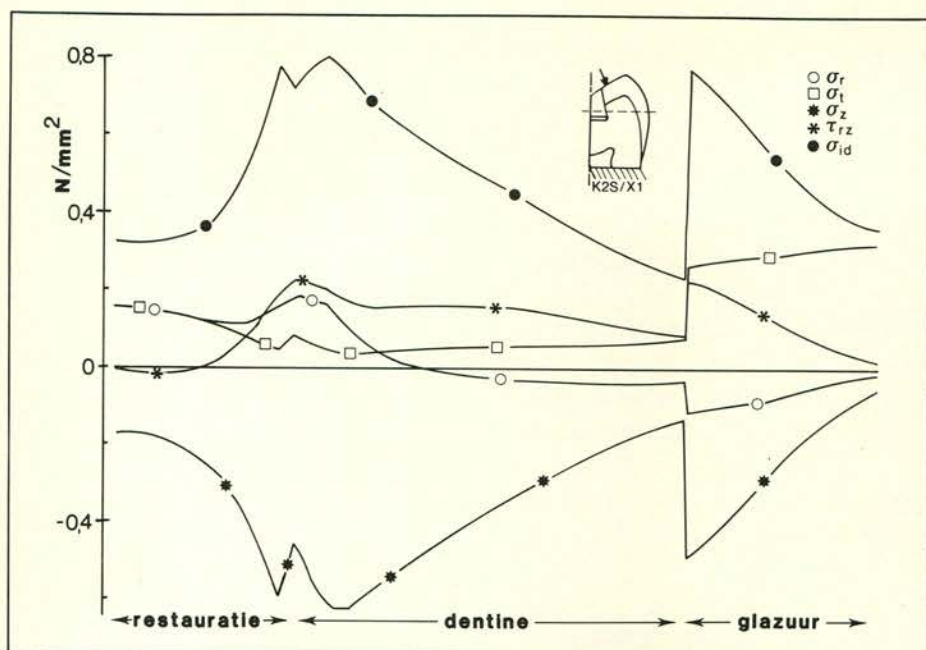
\* Het is voldoende in deze paragraaf alleen over de spanningen te spreken. Hetgeen gezegd wordt over de spanningsgrootheden geldt ook voor de rekgrootheden.



of vergelijkspanning is een reken-grootheid, die aangeeft waar de spanningstoestand mogelijkwerwijs interessant is. In de biomechanica kan deze rekengrootheid, wanneer kritisch gebruikt, een steun zijn bij de interpretatie.

De ideële spanningen kunnen op dezelfde wijze worden weergegeven als in afbeelding 3.

Een andere wijze om de spanning-grootheden visueel af te beelden, kan worden gerealiseerd door de spanning-grootheden als een functie van de plaats weer te geven. In afbeelding 4 zijn de spanningen langs een bepaalde doorsnede weergegeven. De curves vertonen over het algemeen een zekere hoekigheid als gevolg van het benaderende numerieke karakter der elementenmethode.



Afb. 4. Grafische weergave van de spanningen langs de aangegeven doorsnede. De betekenis van de symbolen is in de figuur weergegeven.

### Hoofdspanningen

In een driedimensionaal axisymmetrisch model van een molaar kan de spanningstoestand ook gekarakteriseerd worden door de twee hoofdspanningen ( $\sigma_1$  en  $\sigma_2$ ), de hoofdrichtingende tangentiële spanning (Peters, 1981). In afbeelding 5 is schematisch een hoofdspanningfiguur getekend. De hoofdspanningen zijn in het transversale vlak ( $r$ - $z$  vlak) uitgezet. De hoofdspanningen ( $\sigma_1$ - $\sigma_2$ ) en de bijbehorende hoek ( $\zeta$ ) worden in ieder knooppunt van de elementen getekend. In afbeelding 6 zijn de transversale hoofdspanningen in een molaar met composietvulling weergegeven bij een bepaalde belastingssituatie.

### Verplaatsingen

De verplaatsingen kunnen eveneens worden aangegeven in plotfiguren. Deze tonen een beeld van de contouren van het vervormde en onvervormde model (afb. 7). De vervorming is sterk vergroot getekend. De verplaatsing van punt P naar P' is in werkelijkheid  $-6,62 \mu\text{m}$  bij een belasting van 500 N.

### 4. Toepassingsmogelijkheden

Spanningsanalyses in de tandheelkunde zijn – zoals eerder betoogd – met name gecompliceerd doordat de geo-

metrieën, het materiaalgedrag en de belastingssituaties, die in het orale gebied voorkomen, ingewikkeld zijn. De E.E.M. biedt bij uitstek een oplossing voor deze problemen. Toepassing van deze numerieke mathematische methode kan een belangrijke bijdrage leveren aan spanningsonderzoek op diverse tandheelkundige gebieden, zoals restauratieve en prothetische tandheelkunde, parodontologie en orthodontie.

In de tandheelkundige literatuur wordt in toenemende mate gepubliceerd over spanningsanalyses, waarbij de E.E.M. als analysegereedschap wordt gehanteerd. In vogelvlucht worden een aantal studies en onderzoeksmogelijkheden aangegeven voor de diverse disciplines.

#### Restauratieve tandheelkunde

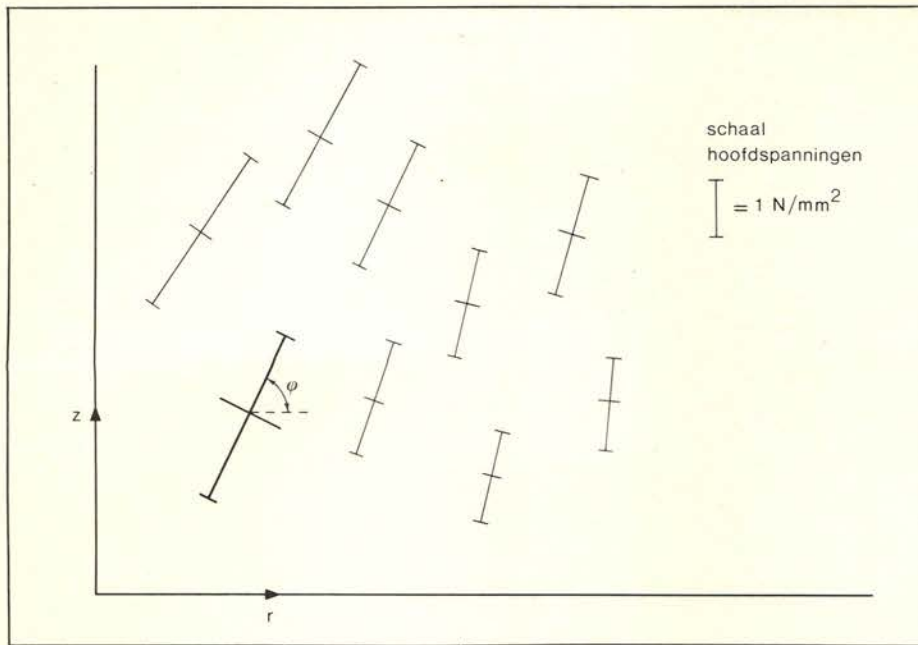
Het gebruik van de E.E.M. in de restauratieve tandheelkunde en het belang van dergelijk onderzoek is door diverse onderzoekers benadrukt (Craig en Farah, 1977; Peters, 1981). De wijze van krachtdoorleiding in zowel gave gebitselementen als ook in gebitselementen voorzien van plastische of gegoten restauraties is onderwerp van studie geweest. Wanneer men de beschikking heeft over de noodzakelijke computerfaciliteiten (hardware en software) wordt de voor-

keur gegeven aan deze mathematische analysetechnieken boven het gebruik van foto-elastische technieken. Vergelijkende studies op tandheelkundig terrein geven de superioriteit van de E.E.M. duidelijk aan (Farah, 1972; De Vree et al., 1982). Zowel tweedimensionale als axisymmetrische driedimensionale spanningsanalyses zijn in de tandheelkundige literatuur beschreven (Thresher et al., 1973; Farah et al., 1974; Yettram et al., 1976; Dérand, 1976, 1977; Wright et al., 1978; Davy et al., 1981). Op basis van analyses van deze betrekkelijk eenvoudige modellen zijn reeds pogingen gedaan om richtlijnen te formuleren voor het ontwerp van diverse preparaties en restauraties. Onderzoek is gedaan naar de invloed van materiaalgedrag en vormfactoren op de spanningstoestand in gerestaureerde gebitselementen (Craig et al., 1977; Peters, 1981). Tevens zijn E.E.M.-analyses gedaan naar de invloed van de onderlaag op de spanningstoestand in de restauratie (Farah et al., 1975, 1976).

In het algemeen kan worden gesteld, dat de E.E.M. in de restauratieve tandheelkunde bij uitstek geschikt is om:

- het proces van krachtoverdracht in gerestaureerde gebitselementen beter te begrijpen;
- richtlijnen te ontwikkelen voor de





Afb. 5. Voorbeeld van een plotfiguur, waarin de hoofdspansingen in het transversale vlak zijn afgebeeld.

Materiaalkundige studies hebben geleid tot kwalitatieve beschrijvingen van het parodontium. Met behulp van de E.E.M. is het mogelijk uit deze kwalitatieve beschrijvingen constitutieve vergelijkingen te formuleren, die consistent zijn met fysische principes. Op deze wijze kunnen de experimenteel zeer moeilijk te onderzoeken 'materiaal'-eigenschappen (constanten, functies en functionelen) van het parodontium worden bepaald. Aan de Subfaculteit Tandheelkunde van de rijksuniversiteit te Utrecht zijn dergelijke studies gaande in de afdeling Tandheelkundige Fysica (De Vos, 1982). Ten aanzien van glazuur is de E.E.M. op gelijksoortige wijze gebruikt door Zybert (1979) ter bepaling van orthotrope materiaalconstanten.

vormgeving van restauraties en preparaties;  
 - richtlijnen te geven voor de te gebruiken restauratieve materialen met het oog op een zo optimaal mogelijke krachtdoorleiding.

naal model werd ontwikkeld ter bestudering van de spanningstoestand, die in het kaakbot wordt opgeroepen bij belasting van implantaten.

Naast spanningsanalyses van restauraties kan de E.E.M. uitstekend worden gebruikt in onderzoek naar de warmtegeleiding van al of niet geresatureerde gebitselementen (De Vree et al., 1982).

*Parodontologie*

Een belangrijk probleem bij het bestuderen van het parodontium is het bepalen van de relatie tussen de krachtwerking op het parodontium en de deformatie van het parodontium ten gevolge hiervan (het zogenaamde constitutief gedrag).

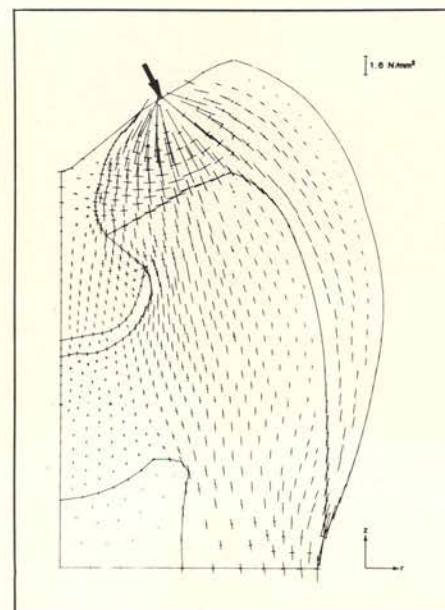
*Orthodontie*

De E.E.M. kan een uitstekend hulpmiddel zijn ter analyse van de positieveranderingen van gebitselementen, zoals deze door orthodontische ingrepen worden beoogd. De relatie tussen biologische processen en krachtwerking vormt een uitdagend terrein voor verder onderzoek met de E.E.M. De E.E.M. is reeds op een aantal plaatsen gebruikt (in gebruik) om het krachtsysteem te analyseren en te voorspellen, dat orthodontische apparatuur te wegbrengt (Bowley et al., 1974; Ter-

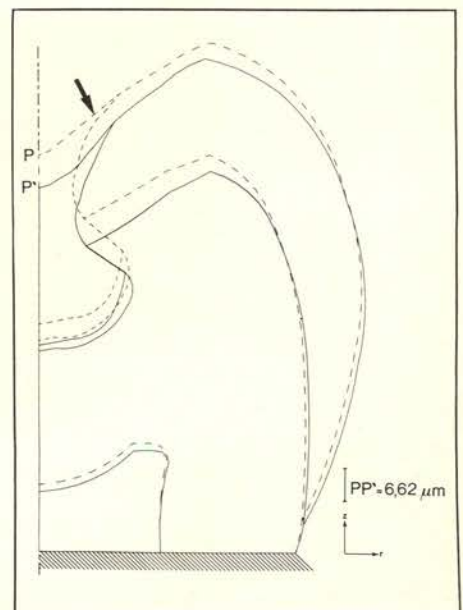
*Prothetische tandheelkunde*

Onderzoek met de E.E.M. naar het mechanische gedrag van uitneembare voorzieningen is de laatste jaren op gang gekomen. De E.E.M. is goed bruikbaar bij de analyse van het effect van (precisie)verankeringen op de krachtoverdracht naar het restgebit en/of de zachte weefsels. De mogelijkheden in het gebied van de partiële prothetiek liggen op het terrein van het ontwerpen van lichte prothesen, die sterk genoeg zijn en een optimale krachtoverdracht realiseren. Optimalisering van de constructie van een verankering is een relatief eenvoudig en weinig geëxploreerd onderzoekgebied.

Zeer recent is E.E.M.-onderzoek naar de krachtoverdracht van implantaten (Cook et al., 1982). Een driedimensio-



Afb. 6. Weergave van hoofdspansingen in het transversale vlak (de grootste hoofdspansingen in en rond het belastingspunt zijn niet afgebeeld).



Afb. 7. Verplaatsingsweergave: onvervormde (---) en vervormde (—) situatie (schalingsfactor als aangegeven).



lingen, 1973; Yang et al., 1974). Ook is de E.E.M. in gebruik om bracketvormen en draadgeometrieën te analyseren ter optimalisering van de verschillende orthodontische technieken.

### 5. Slotmerkingen

De E.E.M. heeft de laatste jaren bewezen een uitstekend hulpmiddel te zijn bij biomechanische analyse van tandheelkundige problemen. Met deze analyses is het mogelijk: (1) een beter inzicht te krijgen in de samenhang van tandheelkundige structuren en processen; (2) het effect van ingrepen in en vervangingen van tandheelkundige structuren te voorspellen; (3) criteria te formuleren waaraan vervangingen en ingrepen vanuit mechanisch oogpunt moeten voldoen.

De E.E.M. is een mathematisch gereedschap voor spanningsanalyses dat op zich aanzienlijk geavanceerder is dan de huidige stand van kennis over de mechanische eigenschappen van tandheelkundige materialen en weefsels. Gevoeligheidsanalyses en parameterstudies met de E.E.M. kunnen richtinggevend zijn voor experimenteel onderzoek naar materiaaleigenschappen van tandheelkundige materialen en weefsels.

#### Summary:

Title: Advanced analytical technique for biomechanical application in dentistry.

The mechanical behavior of dental structures and constructions is the central theme of the forthcoming series of publications.

In this first article, an overview was given of the various approaches for analyzing mechanical behavior in the oral environment. Stress analysis employing a numerical mathematical method (Finite Element Analysis) was explained. Possibilities were given to facilitate interpretation of the data and different types of plots were shown. A review was given of the application of finite element analysis in biomechanical research in dentistry.

#### Literatuur:

1. Bowley, W. W., Burstone, C., Koenig, H. A., Siatkowsky, R. (1974): Prediction of tooth displacements using laser holography and finite element technique. Proceedings of the Symposium of Commission V, International Society for Photogrammetry.
2. Brekelmans, W. A. M., Poort, H. W. (1973): Theoretical and experimental investigation of the stress and strain situation on a femur. Acta Orthop Belg Suppl I: 3-24.
3. Cook, S. D., Weinstein, A. M., Klawitter, J. J. (1982): A three-dimensional finite element analysis of a porous rooted Co-Cr-Mo alloy dental implant. J Dent Res 61: 25-29.
4. Craig, R. G., Farah, J. W. (1977): Stress analysis and design of single restorations and fixed bridges. Oral Sc Rev 10: 45-74.
5. Craig, R. G., Farah, J. W. (1978): Stresses from loading distal-extension removable partial dentures. J Prost Dent 39: 274-277.
6. Craig, R. G., Peyton, F. A. (1965): Measurement of stresses in fixed-bridge restorations using a brittle coating technique. J Dent Res 44: 756-762.
7. Davy, D. T., Dilley, G. L., Krejci, R. F. (1981): Determination of stress patterns in root-filled teeth incorporating various dowel designs. J Dent Res 60: 1301-1310.
8. Dérand, T. (1976): Creep in amalgam class V restorations. Odont Rev 27: 181-186.
9. Dérand, T. (1977): Marginal failure of amalgam class II restoration. J Dent Res 56: 481-485.
10. Farah, J. W. (1972): Stress analysis of first molars with full crown preparation by three dimensional photoelasticity and the finite element method. Dissertation, Ann Arbor (U.S.A.).
11. Farah, J. W., Hood, J. A. A., Craig, R. G. (1974): Stresses and deflections in the floor of model cavity preparations. J Oral Reh 1: 207-215.
12. Farah, J. W., Hood, J. A. A., Craig, R. G. (1975): Effects of cement bases on the stresses in amalgam restorations. J Dent Res 54: 10-15.
13. Farah, J. W., Powers, J. M., Dennison, J. B., Craig, R. G., Spencer, J. (1976): Effects of cement bases on the stresses and deflections in composite restorations. J Dent Res 55: 115-120.
14. Granath, L. E. (1963): Photoelastic studies on certain factors influencing the relation between cavity and restoration. Odont Rev 14: 278-293.
15. Granath, L. E. (1964): Further photoelastic studies on the relation between cavity and occlusal portion of class II restorations. Odont Rev 15: 290-298.
16. Kakudo, Y., Amano, N., Izumi, K. (1967): Strain on the hard tissue of human teeth during biting and mastication. J Osaka Dent Univ 1: 167-180.
17. Ledley, R. S., Huang, H. K. (1968): Linear model of tooth displacement by applied forces. J Dent Res 47: 427-432.
18. Peters, M.C.R.B. (1981): Biomechanika van kaviteitspreparatie en -restauratie van gebitselementen; modelvorming en analyse met behulp van de eindige elementenmethode. Academisch proefschrift, Nijmegen.
19. Terlingen (1973): Een materiaal en een mathematisch model ter bestudering van het krachtenpatroon bij orthodontische extra-orale traktie. Academisch proefschrift, Nijmegen.
20. Tresher, R. W., Saito, G. E. (1973): The stress analysis of human teeth. J Biomech 6: 443-449.
21. Vos, S. E. de (1982): Determination of the elastic properties of the supporting structures of the teeth. Academisch Proefschrift, Utrecht.
22. Vree, J. H. P. de, Spierings, Th. A. M., Plasschaert, A. J. M.: A simulation model for transient thermal analysis of restored teeth. (Aangeboden aan J Dent Res.)
23. Vree, J. H. P. de, Peters, M. C. R. B., Plasschaert, A. J. M.: A comparison of photoelastic and finite element stress analysis in restored tooth structures. J Oral Reh geaccepteerd voor publikatie.
24. Wright, K. W. J., Yettram, A. L. (1978): Finite element stress analysis of a class I amalgam restoration subjected to setting and thermal expansion. J Dent Res 57: 715-723.
25. Yang, T. Y., Baldwin, J. J. (1974): Analysis of space closing springs in orthodontics. J Biomech 7: 21-28.
26. Yettram, A. L., Wright, K. W. J., Pickard, H. M. (1976): Finite element stress analysis of the crowns of normal and restored teeth. J Dent Res 55: 1004-1011.
27. Zienkiewicz, O. C. (1977): The finite element method. 3rd ed. McGraw Hill, Londen.
28. Zybert, J. J. (1979): Ultrastructure and elastic behaviour of human enamel. Dissertatie, Monash (Australië).

April 1982.

Philips van Leydenlaan 25,  
6500 HB Nijmegen.