

PDF hosted at the Radboud Repository of the Radboud University Nijmegen

The following full text is a publisher's version.

For additional information about this publication click this link.

<http://hdl.handle.net/2066/58892>

Please be advised that this information was generated on 2020-10-29 and may be subject to change.

Onderzoeksmethoden in de tandheelkunde 5

Onderzoek met de eindige-elementenmethode

De eindige-elementenmethode is een veel gebruikte experimentele onderzoekstechniek. De methode bestaat uit computersimulaties van het belasten van constructies en van interne mechanische processen, waarbij effecten van variaties in geometrie, materiaaleigenschappen en belastingsituatie kunnen worden onderzocht. De simulaties laten interne spanningen zien op basis waarvan uitspraken kunnen worden gedaan over de kans op falen van de constructie. In de tandheelkunde vindt de methode toepassing in diverse deelgebieden, waaronder de orthodontie, de kaakchirurgie, de implantologie en de restauratieve tandheelkunde.

FENNIS WMM, KREULEN CM, BARINK M, KUIJS RH, VERDONSCHOT N, CREUGERS NHJ. Onderzoeksmethoden in de tandheelkunde 5. Onderzoek met de eindige-elementenmethode. Ned Tijdschr Tandheelkd 2004; 111: 447-451.

Inleiding

Bij onderzoek naar de sterkte van constructies wordt veelvuldig gebruikgemaakt van de eindige-elementenmethode. Met deze computersimulatietechniek kunnen spanningen worden berekend die in een structuur of constructie ontstaan als er een kracht op wordt uitgeoefend. Op grond van de grootte en de plaats van de spanningen kan een uitspraak worden gedaan over de kans op falen van de structuur of constructie bij belasting.

Het voordeel van deze onderzoeksmethode is dat de invloed van verschillende constructievormen op de weerstand tegen belasting relatief eenvoudig kan worden berekend. Ook kunnen veranderingen in de toegepaste materialen worden beoordeeld. Dit geeft de onderzoeker een idee over de praktische haalbaarheid van een ontwerp voor een constructie. Dit artikel bespreekt de mogelijkheden en de beperkingen van de toepassing van de eindige-elementenmethode in de tandheelkunde.

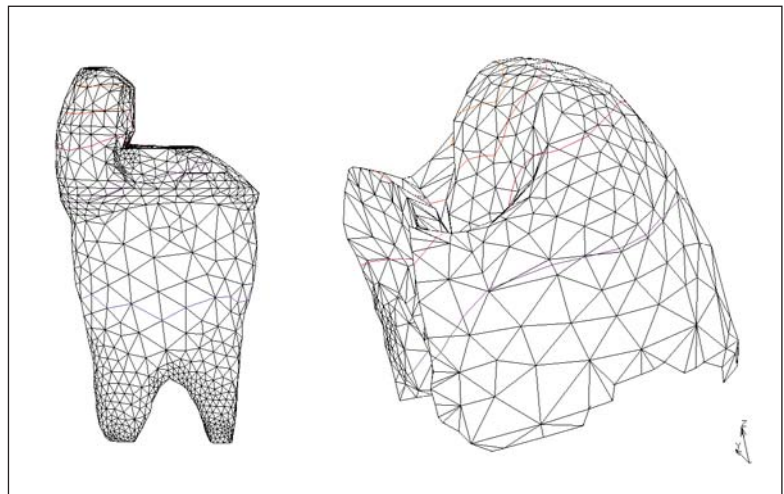
Geschiedenis van de methode

Bij onderzoek naar de weerstand van constructies tegen belasting moet bijna altijd gebruik worden gemaakt van schaalmodellen of levensechte simulaties. Zo worden voor botsproeven echte auto's gebruikt. Dit soort onderzoek kost veel tijd, materiaal en arbeid. Hierdoor is de behoefte ontstaan om dit uitgebreide materiaalonderzoek te vereenvoudigen. Met de eindige-elementenmethode (Engels: finite element method) kunnen simulaties van mechanische processen in (onderdelen van) constructies worden uitgevoerd. Het principe van de eindige-elementenmethode is dat een constructie wordt opgedeeld in gelijkvormige bouwstenen die op de hoekpunten, de knooppunten, met elkaar zijn verbonden (afb. 1). Aan de bouwstenen of elementen, worden vervolgens bepaalde materiaal-

kundige eigenschappen toegekend, die overigens per element kunnen verschillen. Bij belasting van de constructie worden van de individuele elementen interne spanningen, rekkingen en verplaatsingen berekend. De constructieberekening komt tot stand door sommatie van de spanningen van de individuele elementen. Dit resulteert in de reactie van de totale constructie op de aangebrachte belasting (afb. 2).

Naast de besparing op materiaal en de mogelijkheid om vorm en materiaal te veranderen, kent de eindige-elementenmethode nog een voordeel. Het faciliteert namelijk een zuivere parameteranalyse. Het is mogelijk om in de simulatie één variabele, zoals de stijfheid van een materiaal, te veranderen en het effect hiervan op het mogelijk falen van de constructie te analyseren. Met belastingsproeven is dit slechts in beperkte mate mogelijk. Bij belasting laat de eindige-elementenmethode interne processen van de constructie zien die experimenteel vaak niet te meten zijn. Daardoor kunnen faalmechanismen worden verklaard.

Afb. 1. Driedimensionaal eindige-elementenmodel van een premolaar met knobbelvervangende restauratie.



W.M.M. Fennis¹
C.M. Kreulen¹
M. Barink³
R.H. Kuijs²
N. Verdonschot³
N.H.J. Creugers¹

Samenvatting

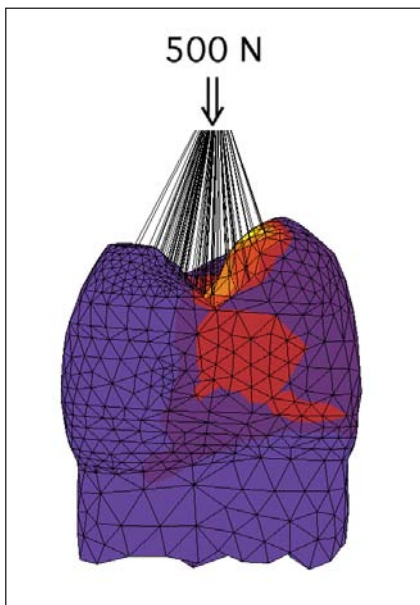
Trefwoorden:

- Eindige-elementenmethode
- Computertoepassing

Uit de sector Orale Functie-leer,² de sector Preventieve en Curatieve Tandheelkunde en ³the Orthopaedic Research Laboratory van de afdeling Orthopaedie van het Universitair Medisch Centrum Sint Radboud in Nijmegen.

Datum van acceptatie: 9 augustus 2004.

Adres:
W.M.M. Fennis
UMC St Radboud
Postbus 9101
6500 HB Nijmegen
w.fennis@dent.umcn.nl



Afb. 2. Gerestaureerde premolaar met verplaatsing van knooppunten als gevolg van een gesimuleerde belasting. Hoe lichter de kleur, des te groter de verplaatsing.

Het principe werd voor het eerst beschreven in 1943 (Courant, 1943). De eerst gepubliceerde toepassing van de eindige-elementenmethode in 1956 is die voor constructieberekeningen van vliegtuigen (Turner *et al.*, 1956). Simulaties met de eindige-elementenmethode zijn afhankelijk van de beschikbare rekencapaciteit van computers. Tot begin jaren zeventig van de vorige eeuw was de eindige-elementenmethode alleen mogelijk met grote computers, zoals gebruikt in de lucht- en ruimtevaartindustrie. Met de toename van de rekencapaciteit van kleine computers ont-

wikkelde de methode zich echter tot een algemeen toegepaste onderzoeksmethode.

Modelvorming

Om een constructie met een eindige-elementenmodel te kunnen analyseren, zijn gegevens nodig over de te testen geometrie. Tegelijkertijd moet de onderzoeker een keuze maken uit vormen van elementen. Daarnaast zijn nog gegevens nodig over de materiaaleigenschappen en de belastingssituatie.

Geometrie

De exacte vorm van de te onderzoeken constructie moet bekend zijn. Er kunnen dan twee- en driedimensionale modellen worden gemaakt. Tweedimensionale modellen zijn eenvoudig, bijvoorbeeld representaties van buis- of cilinderstructuren. Het technisch rekenwerk hiervan kan met een standaard computer worden uitgevoerd. Voor de analyse van complexe, asymmetrische constructies levert een tweedimensionaal model echter geen accurate resultaten. Hiervoor zijn de werkelijke vormen in drie dimensies noodzakelijk. In sommige gevallen wordt een compromis gevonden in de vervaardiging van een axisymmetrisch model. Daarbij weerspiegelt een tweedimensionaal model een driedimensionale structuur (afb. 3).

Het vastleggen van de driedimensionale vorm van bestaande structuren of constructies en de

Afb. 3. Axisymmetrisch eindige-elementenmodel van een ondermolaar (met dank aan mw. prof. dr. M.C.R.B. Peters).

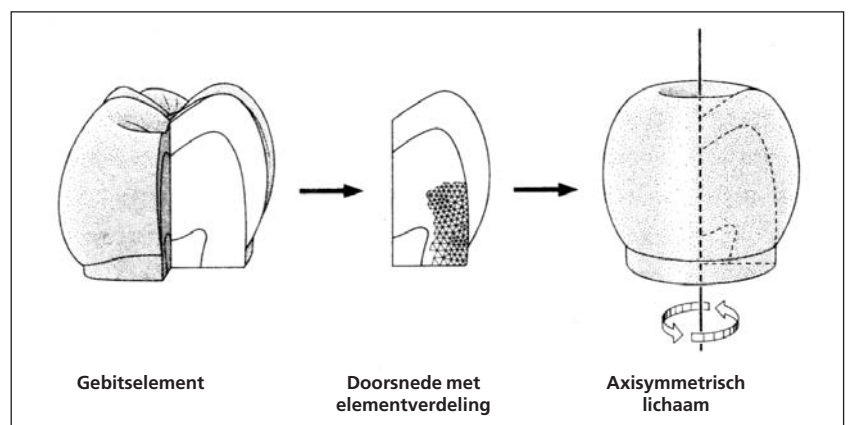
overdracht van de geometriegegevens naar de computer is complex, vooral als de structuur beperkte afmetingen heeft. Dit is vaak het geval in de tandheelkunde. Er zijn dan ook verschillende methoden toegepast, zoals het meten van coupes van gebitselementen of het meten van computertomografiescans (CT-scans) (Ho *et al.*, 1994; Telli en Gulkan, 1998). Tegenwoordig kunnen de gegevens over de geometrie zeer accuraat worden verzameld met een micro-CT-techniek. De afzonderlijke CT-scans worden hierbij gebruikt om de verschillende materialen met contourlijnen te identificeren. Door deze contourlijnen te stapelen met behulp van het coördinatensysteem van de CT-scans wordt een driedimensionaal beeld verkregen dat als basis voor het eindige-elementenmodel fungeert (Verdonschot *et al.*, 2001) (afb. 4).

Elementen

Door het gebruik van knooppunten staat het de onderzoeker vrij afwijkende vormen van elementen te gebruiken, zoals 'verwongen' kubussen en tetraheders. De voordelen hiervan zijn meerledig. Zo bepalen de buitenoppervlakken van een constructie de vorm van de buitenste elementen en om tegemoet te komen aan de eenheid van vorm kan worden gekozen voor alternatieve elementvormen. Tevens heeft de elementvorm rekenkundige consequenties en kan de vorm worden veranderd afhankelijk van de aangebrachte belasting. Verder worden de elementen in een bepaalde dichtheid verdeeld over de te onderzoeken constructie. De dichtheid is afhankelijk van het verwachte spanningspatroon in een specifiek gebied. In het algemeen geldt: hoe meer elementen, hoe nauwkeuriger de geometrie en hoe exacter de uitkomst van de analyse. Een nadeel van een groot aantal elementen is de benodigde lange rekentijd. Daarom wordt vaak gekozen voor een compromis tussen computertijd en de benodigde nauwkeurigheid.

Materiaaleigenschappen

Van de in te voeren materiaaleigenschappen zijn de elasticiteitsmodulus en de dwarscontractiecoëfficiënt de noodzakelijke gegevens. De elasticiteitsmodulus



geeft de verhouding aan tussen vervormingen in verschillende richtingen. Met deze gegevens kunnen de spanningen onder belasting worden berekend.

Om te kunnen inschatten of deze spanningen de faalkans van de constructie vergroten, zijn verder gegevens nodig over de sterkte van de materialen en over de sterkte van de grensvlakken tussen de verschillende materialen. Een hoge interne spanning hoeft namelijk niet samen te gaan met falen, als het materiaal maar sterk genoeg is. Als voorbeeld geldt de vergelijking van de interne krimpspanningen met de trek- en schuifsterkte van verschillende materialen in een model van een knobbelvervangende composietrestauratie (Barink *et al*, 2003). De spanningen in de restauratie en aan het hechtvlak waren vergelijkbaar. De sterkte van het toegepaste composiet was echter duidelijk groter. De conclusie was dat loslaten van de hechting tussen composiet en tandweefsel waarschijnlijker is dan falen van het composietmateriaal zelf.

Belastingssituatie

Externe krachten op de constructie worden gesimuleerd door een kracht uit te oefenen op de buitenste knooppunten. De hoogte van de kracht, de richting en het oppervlak van het aangrijpingspunt kunnen worden gevarieerd. Ook kunnen interne belastingen worden gesimuleerd. Zo kunnen de gevolgen van uitzetting, bijvoorbeeld door stijging in temperatuur, of van krimp, bijvoorbeeld door polymerisatieprocessen, worden berekend.

Toepassingen in de tandheelkunde

Tandheelkundige toepassingen van de eindige-elementenmethode werden voor het eerst zo'n dertig jaar geleden beschreven. Thresher en Saito (1973) toonden met een tweedimensionaal model van een centrale incisief aan dat het van belang is de eigenschappen van glazuur, dentine en het parodontale ligament te definiëren om interne spanningspatronen als gevolg van externe belasting te kunnen bepalen. Anderen pasten tweedimensionale en axisymmetrische modellen toe om spanningspatronen in gave en gerestaureerde gebitselementen en spanningen in het alveolaire bot onder brugconstructies te onderzoeken (Farah en Craig, 1975; Hood *et al*, 1975; Selna *et al*, 1975; Yettram *et al*, 1976). Tegenwoordig wordt de eindige-elementenmethode op diverse deelgebieden in de tandheelkunde toegepast, zoals in de orthodontie, de kaakchirurgie, de implantologie en de restauratieve tandheelkunde.

Orthodontie

De eindige-elementenmethode is bij uitstek geschikt voor de analyse van het krachtenveld bij de verplaatsing van gebitselementen in (alveolair) bot onder invloed van een aangebrachte kracht (Bourauel *et al*, 2000). Op orthodontisch gebied zijn spanningspatro-

nen in craniofaciale structuren als gevolg van expansie van de maxilla geanalyseerd, ontwerpen van apparatuur getest en zijn spanningen in de cementlaag van brackets berekend (Katona, 1994; Dalstra en Melsen, 1999; Jafari *et al*, 2003).

Kaakchirurgie

Onderzoek naar behandelingen bij bijvoorbeeld traumata en anomalieën is gecompliceerd. Computersimulatie biedt ook hier mogelijkheden. De eindige-elementenmethode is gebruikt om de stabiliteit van fixatie van fracturen te berekenen en om craniofaciale anomalieën te analyseren (Abbott *et al*, 1990; Cox *et al*, 2003).

Implantologie

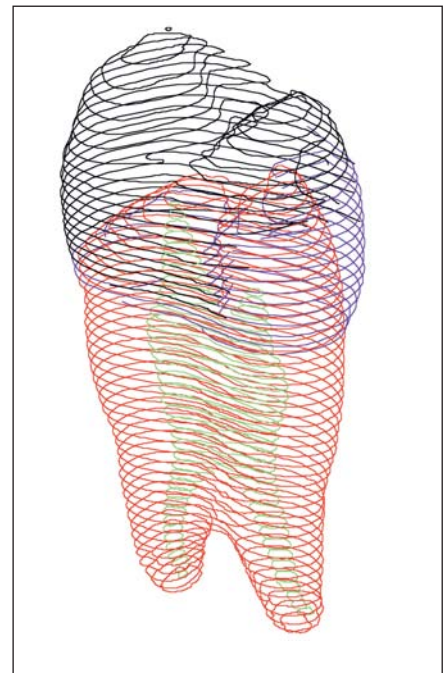
De integratie van implantaten in het kaakbot is mede afhankelijk van de weerstand tegen krachten die inwerken op het implantaat en het bot. Om mogelijke faalmechanismen op dit gebied te kunnen ontdekken en het klinisch functioneren te voorspellen, is de eindige-elementenmethode al veelvuldig toegepast, zo blijkt uit een vrij recent overzichtsartikel (Geng *et al*, 2001). Vooral het ontwerp van implantaten, de invloed van klinische factoren op falen en het grensvlak van bot en implantaat en dat van implantaat en suprastructuur krijgen veel aandacht in de literatuur.

Restauratieve tandheelkunde

Binnen de restauratieve tandheelkunde is de eindige-elementenmethode gebruikt voor de analyse van spanningspatronen in adhesieve restauraties en van spanningen veroorzaakt door het aanbrengen van retentiepijpen (Versluis *et al*, 1998; Ersoz, 2000). Daarnaast heeft de methode kennis opgeleverd van de etiologie van abfractie (Geramy en Sharafoddin, 2003). De methode is verder onder meer toegepast om de spanningsverdeling bij verschillende opbouwsystemen te vergelijken en om breukweerstand van kronen te onderzoeken (Carrier en Kelly, 1995; Yaman *et al*, 1998).

Meerwaarde

Eindige-elementenmodellen maken het mogelijk (interne) faalmechanismen te onderzoeken. Hierbij kan informatie over het klinisch of *in vitro* falen worden gebruikt om specifieke plekken in een constructie



Afb. 4. Driedimensionaal beeld van een gerestaureerde premo-laar door gestapelde contourlijnen. Pulpa = groen; dentine = rood; glazuur = blauw; composiet = zwart.

te analyseren. De resultaten uit een simulatie geven de onderzoeker meer inzicht in de zwakke plekken van de constructie. Deze resultaten kunnen op hun beurt weer aanleiding zijn om de opbouw van constructies aan te passen en eventueel klinische procedures te veranderen. Deze meerwaarde voor de tandheelkunde kan worden geïllustreerd aan de hand van een onderzoek naar de krimp van composiet tijdens het polymerisatieproces.

Lange tijd is algemeen aangenomen dat lichthardende composieten krimpen in de richting van de lichtbron. Om het materiaal tijdens de uitharding niet los te trekken van de ondergrond werd daarom aanbevolen om zo veel mogelijk door het gebitselement te belichten. Dan zou de composiet in de richting van het gebitselement krimpen, met als doel een optimale hechting van de restauratie. De validiteit van deze theorie was echter nooit onderzocht omdat het experimenteel vaststellen van krimppatronen zeer gecompliceerd is. Om de krimp van composiet tijdens de polymerisatie te analyseren, is een tweedimensionaal model van een bovenpremolair met een occlusale composietrestauratie voor de eindige-elementenmethode gebruikt (Versluis *et al*, 1998). Het bleek dat de composiet krimpt naar het middelpunt van de restauratie als er aan geen enkele caviteitswand hechting is. Als het materiaal aan een deel van het caviteitsoppervlak is gehecht, kan de composiet niet krimpen ter plaatse van de hechting. Er is dan een toename van krimp op andere plaatsen waarneembaar, in de richting van plaatsen waar de composiet niet vrij kan krimpen. Bij hechting aan het gehele caviteitsoppervlak kan de composiet alleen vanuit occlusale richting vrij krimpen. In geen geval krimpt de composiet echter zuiver en alleen in de richting van de lichtbron. De resultaten van de simulatie gaven aan dat de theorie over de krimp-richting niet correct bleek te zijn.

Het beschreven onderzoek is een goed voorbeeld van toepasbare kennis die zonder de eindige-elementenmethode niet was ontwikkeld. Het is dan ook niet verwonderlijk dat analyses met deze methode op uitgebreide schaal worden toegepast in tandheelkundig onderzoek.

Beperkingen

Een model voor de eindige-elementenmethode is een benadering van de realiteit. De resultaten zijn vaak gebaseerd op de analyse van slechts één model en de natuurlijke variatie ontbreekt. De betrouwbaarheid van de analyses met het model, ofwel de output, is afhankelijk van de gegevens die in het model zijn verwerkt, ofwel de input. Het laatste is afhankelijk van de gedetailleerdheid van de geometrieweergave, maar ook van de beschikbaarheid van materiaalgegevens en de realiteit van de aangebrachte belasting.

De eindige-elementenmethode wordt vaak toegepast voor de evaluatie van constructieontwerpen, maar zoals gezegd wordt het falen van bestaande structuren ook onderzocht. Met de beschreven methoden om de vorm

van structuren vast te leggen in tandheelkundig onderzoek, zoals micro-CT-scanning, is het goed mogelijk om accurate gegevens over de geometrie te verzamelen. De beperkende factor is dan het aantal elementen waaruit het model wordt opgebouwd. Zijn dit er veel, dan kunnen ook complexe geometrieën goed worden weergegeven, maar dit kost veel rekencapaciteit. Bij weinig elementen bespaart men op rekencapaciteit, maar legt men zichzelf ook geometrische beperkingen op.

Een groter probleem met betrekking tot de modelvorming is de beperkte beschikbaarheid van gegevens van tandheelkundige materialen. Er zijn te weinig standaard fysische gegevens en standaardtesten voor materialen, waardoor verschillende bronnen verschillende waarden van materiaalgegevens vermelden, zoals de elasticiteitsmodulus. Het gebrek aan (standaard)gegevens vormt een complicerende factor bij de interpretatie van de resultaten van analyses. Aan de berekende spanningen van het model kunnen namelijk pas conclusies worden verbonden als de sterkte van de afzonderlijke materialen en van hun grensvlakken bekend zijn. Bij verschillen per bron is een reële conclusie onmogelijk.

Een realistische belasting is eveneens een factor die bepaalt in hoeverre de resultaten van het model valide zijn. Als er een verkeerde belasting wordt gekozen, bijvoorbeeld wat de grootte en de richting van kauwkrachten betreft, levert dit irreële resultaten op. Overigens geldt deze beperking ook voor belastingsproeven *in vitro*.

Uit het bovenstaande blijkt dat de betrouwbaarheid van een eindige-elementenmodel niet vanzelfsprekend is en dat de uitkomsten moeten worden gevalideerd. Dit kan door de resultaten te toetsen aan reeds bekende gegevens of door de condities in het model na te bootsen in een experiment. Een voorbeeld van een dergelijke validatie is beschreven voor de krimp van composiet (Hübsch *et al*, 1999). Validatie wordt echter complexer als er meer materialen en variabelen in de analyse zijn betrokken. Dan is een experimentele opzet bijna onmogelijk omdat de vele variabelen *in vitro* nauwelijks te controleren zijn. Dit heeft als consequentie dat voldoende validatie van complexe modellen vaak ontbreekt. De resultaten van de analyse moeten dan extra kritisch worden beschouwd.

Tot slot

Een onderzoeksmethode wordt onder andere beoordeeld op validiteit en reproduceerbaarheid. Zoals vermeld is de validiteit onder meer afhankelijk van keuzes die de onderzoeker maakt. Daarbij zijn op dit moment sommige fysische materiaaleigenschappen niet beschikbaar. De validiteit zal altijd naderhand moeten worden onderzocht door een simulatie *in vitro*. De eindige-elementenmethode is een computersimulatie. De input wordt vastgelegd waarna de calculaties honderd procent reproduceerbaar zijn.

Toepassing van de eindige-elementenmethode in de tandheelkunde is een welkome aanvulling op de

bestaande *in vitro*-onderzoekstechnieken. Het grote voordeel van dit soort analyses is dat ontwerpen kunnen worden onderzocht zonder dat daar (humaan) testmateriaal voor nodig is. Daarbij kunnen, in tegenstelling tot belastingsproeven, interne spanningspatronen zichtbaar worden gemaakt. Ook processen die experimenteel niet goed zijn uit te voeren, zoals bijvoorbeeld de besproken analyse van polymerisatiekrimp van composiet, kunnen met eindige-elementenmodellen worden gesimuleerd.

Literatuur

- ABBOTT AH, NETHERWAY DJ, DAVID DJ, BROWN T. Application and comparison of techniques for three-dimensional analysis of craniofacial anomalies. *J Craniofac Surg* 1990; 1: 119-134.
- BARINK M, MARK PCP VAN DER, FENNIS WMM, KUIJS RH, KREULEN CM, VERDONSCHOT N. A three-dimensional finite element model of the polymerization process in dental restorations. *Biomaterials* 2003; 24: 1427-1435.
- BOURAUUEL C, VOLLMER D, JAGER A. Application of bone remodelling theories in the simulation of orthodontic tooth movements. *J Orofac Orthop* 2000; 61: 266-279.
- CARRIER DD, KELLY JR. In-Ceram failure behavior and core-veneer interface quality as influenced by residual infiltration glass. *J Prosthodont* 1995; 4: 237-242.
- COURANT R. Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations. *Bull Amer Math Soc* 1943; 49: 1-23.
- COX T, KOHN MW, IMPELLUSO T. Computerized analysis of resorbable polymer plates and screws for the rigid fixation of mandibular angle fractures. *J Oral Maxillofac Surg* 2003; 61: 481-487.
- DALSTRA M, MELSEN B. Force systems developed by six different cantilever configurations. *Clin Orthod Res* 1999; 2: 3-9.
- ERSOZ E. Evaluation of stresses caused by dentin pin with finite elements stress analysis method. *J Oral Rehabil* 2000; 27: 769-773.
- FARAH JW, CRAIG RG. Distribution of stresses in porcelain-fused-to-metal and porcelain jacket crowns. *J Dent Res* 1975; 54: 255-261.
- GENG JP, TAN KB, LIU GR. Application of finite element analysis in

implant dentistry: a review of the literature. *J Prosthet Dent* 2001; 85: 585-598.

- GERAMY A, SHARAFODDIN F. Abfraction: 3D analysis by means of the finite element method. *Quintessence Int* 2003; 34: 526-533.
- HO MH, LEE SH, CHEN HH, LEE MC. Three-dimensional finite element analysis of the effects of posts on stress distribution in dentin. *J Prosthet Dent* 1994; 72: 367-372.
- HOOD JAA, FARAH JW, CRAIG RG. Modification of stresses in alveolar bone induced by a tilted molar. *J Prosthet Dent* 1975; 34: 415-421.
- HÜBSCH PF, MIDDLETON J, FEILZER AJ. Identification of the constitutive behaviour of dental composite cements during curing. *Comput Methods Biomech Biomed Engin* 1999; 2: 245-256.
- JAFARI A, SHETTY KS, KUMAR M. Study of stress distribution and displacement of various craniofacial structures following application of transverse orthopedic forces — a three-dimensional FEM study. *Angle Orthod* 2003; 73: 12-20.
- KATONA TR. The effect of load location and misalignment on shear/peel testing of direct bonded orthodontic brackets — a finite element model. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1994; 106: 395-402.
- SELNA LG, SHILLINGBURG HT, KERR PA. Finite element analysis of dental structures — axisymmetric and plane stress idealizations. *J Biomed Mater Res* 1975; 9: 237-252.
- TELLI C, GULKAN P. Stress analysis during root canal filling by vertical and lateral condensation procedures: a three-dimensional finite element model of a maxillary canine tooth. *Br Dent J* 1998; 185: 79-86.
- THRESHER RW, SAITO GE. The stress analysis of human teeth. *J Biomech* 1973; 6: 443-449.
- TURNER MJ, CLOUGH RW, MARTIN HC, TOPP LJ. Stiffness and deflection analysis of complex structures. *J Aero Sc* 1956; 25: 805-823.
- VERDONSCHOT N, FENNIS WMM, KUIJS RH, STOLK J, KREULEN CM, CREUGERS NHJ. Generation of 3-D finite element models of restored human teeth using micro-CT techniques. *Int J Prosthodont* 2001; 14: 310-315.
- VERSLUIS A, TANTBIROJN D, DOUGLAS WH. Do dental composites always shrink toward the light? *J Dent Res* 1998; 77: 1435-1445.
- YAMAN SD, ALACAM T, YAMAN Y. Analysis of stress distribution in a maxillary central incisor subjected to various post and core applications. *J Endod* 1998; 24: 107-111.
- YETTRAM AL, WRIGHT KWJ, PICKARD HM. Finite element stress analysis of the crowns of normal and restored teeth. *J Dent Res* 1976; 55: 1004-1011.

Research methods in dentistry 5. The finite element method

The finite element method is a commonly applied experimental research technique. The method comprises computer simulation of constructions under load and of internal mechanical processes, which enables the study of effects of geometrical and material variations. The analysis shows internal stresses and, consequently, predictions can be made of possible failure. In dentistry, the method is applied in disciplines, such as orthodontics, oral and maxillofacial surgery, implantology en restorative dentistry.

Summary

Key words:

- Finite element method
- Computer application