

# Serie: Proefschriften 25 jaar na dato. Biomechanische analyse van bot rond tandheelkundige implantaten in een edentate onderkaak

Veranderingen in het bot rond permucosale implantaten kunnen worden veroorzaakt door biomechanische factoren. Computermodellen worden gebruikt om plaats en hoogte van spanningen in het bot te berekenen. Bouw van modellen en berekening vindt plaats met behulp van de eindige-elementenmethode. Verdere ontwikkeling van software en hardware maakte het 25 jaar geleden mogelijk om complexere driedimensionale modellen te bouwen. Algemeen doel van het proefschrift uit 1992 was de ontwikkeling van een state-of-the-art computermodel van een edentate onderkaak met tandheelkundige implantaten en vervolgens de invloed van een aantal parameters te berekenen op plaats en hoogte van spanning in het bot. In het oog springende resultaten waren dat er weinig verschil is tussen 2 en 4 implantaten in het interforaminale gebied en dat de lengte van implantaten een verwaarloosbaar effect heeft op de hoogte van de spanning. Klinisch onderzoek heeft na die tijd aangetoond dat deze resultaten overeenkwamen met de werkelijkheid.

Meijer HJA. Serie: Proefschriften 25 jaar na dato. Biomechanische analyse van bot rond tandheelkundige implantaten in een edentate onderkaak

Ned Tijdschr Tandheelkd 2018; 125:145-148

doi: <https://doi.org/10.5177/ntvt.2018.03.17191>

## Inleiding

Veranderingen in het bot rond permucosale implantaten kunnen worden veroorzaakt door biomechanische factoren. Tijdens functie worden er krachten uitgeoefend op de suprastructuur en vervolgens op de implantaten en het omgevende bot. Dit zal leiden tot deformatie en spanningen in het bot rond de implantaten om deze krachten op te vangen. Bot heeft de mogelijkheid om zich aan herhaaldelijk optredende spanningen aan te passen, wat 'adaptive bone remodeling' wordt genoemd. Aan de andere kant, indien deze spanningen te groot zijn, bestaat het risico dat er geen aanpassing optreedt, maar dat het bot zal verdwijnen (Skalak, 1983; Greenstein et al, 2013; Sotomaior et al, 2016). Computermodellen worden gebruikt om plaats en hoogte van spanningen te berekenen. Bouw van modellen en berekening vindt plaats met behulp van de eindige-elementenmethode (in het Engels Finite Element Analysis), vooral indien het ingewikkelde constructies betreft. Met de eindige-elementenmethode worden constructies opgedeeld in een (eindig) aantal elementen en worden deze elementen aan elkaar gekoppeld door middel van knooppunten. Aan deze koppelingen wordt, afhankelijk van het soort element, een aantal eisen (randvoorwaarden) gesteld. Indien een model wordt opgedeeld in slechts weinig elementen krijgt men een zeer vereenvoudigde, niet nauwkeurige, afspiegeling van de werkelijkheid. Een opdeling in heel veel kleine elementjes geeft een grotere

## Leerdoelen

Na het lezen van dit artikel:

- heeft u inzicht in hoe computermodellen kunnen worden gebruikt bij het berekenen van wat voor spanningen kauwkrachten op implantaten kunnen veroorzaken;
- weet u wat de richting van het implantaat, de lengte, het aantal implantaten, de plaats en het aanbrengen van een staaf hebben op de spanning in het bot.

nauwkeurigheid, maar heeft als consequentie een complexe berekening met veel rekentijd. Uitkomstmaten zijn bijvoorbeeld verplaatsingen en spanningen op de knooppunten van een model (Huiskes et al, 1987). De methode wordt vooral ingezet in de luchtvaartindustrie, de ruimtevaart, de scheepvaart en de weg- en waterbouwkunde, waar bijvoorbeeld constructies kunnen worden geoptimaliseerd op het gebied van de te gebruiken materialen, de sterkte en het gewicht. Maar ook in de geneeskunde is de methode al in de jaren 1970 gebruikt bij het berekenen van mechanisch gedrag van longen onder invloed van aan- en

## Wat weten we?

Computermodellen kunnen spanningen in bot rond tandheelkundige implantaten voorspellen. Een nauwkeurige berekening is echter niet mogelijk, waardoor computermodellen geen exacte afspiegeling van de klinische werkelijkheid zijn. Een analyse van het effect van veranderingen in computermodellen op spanningen in bot is wel mogelijk.

## Wat is nieuw?

Computermodellen zijn sterk verbeterd en hebben een grote vlucht genomen binnen de tandheelkunde. Er zijn veel nieuwe materialen ontwikkeld en het wordt gezien als de ultieme methode om complexe modellen te bouwen en vervolgens spanningen te berekenen. Klinisch onderzoek heeft aangetoond dat resultaten van computermodellen overeenkomen met de werkelijkheid.

## Praktijktoepassing

Computermodellen zijn uitstekend geschikt om op korte termijn inzicht te krijgen in een mogelijk effect van veranderingen in ontwerp en materiaaleigenschappen, zonder dat patiënten worden blootgesteld aan het risico op complicaties. Indien geverifieerd met computermodellen kunnen nieuwe toepassingen met minder risico worden geëvalueerd in een klinische setting en uiteindelijk hun weg vinden naar de algemene praktijk.

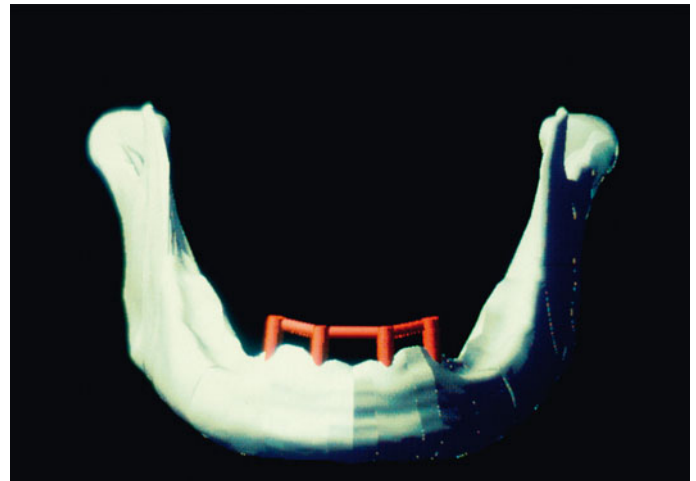
afwezigheid van zwaartekracht (Matthews en West, 1972). Verrassend genoeg is uit dezelfde tijd al een onderzoek te vinden waarin met behulp van een zeer eenvoudig eindig-elementenmodel spanningen werden vergeleken in bot rondom een bladimplantaat en een pinvormig implantaat (Tesk en Widera, 1973). In die beginjaren werden computermodellen echter nog maar weinig gebruikt in de geneeskunde. Enerzijds door de beperkte mogelijkheden die de methode in het begin bood, anderzijds door scepsis van de geneeskundige beroepsgroep ten opzichte van simulatie van functies van het menselijk lichaam door een computermodel. Als illustratie: tussen 1973 en 1990 werden slechts 16 eindig-elementenonderzoeken gepubliceerd op het gebied van tandheelkundige implantologie, terwijl na die tijd meer dan 1.000 eindig-elementenonderzoeken zijn gepubliceerd op dit vakgebied (PubMed, National Library of Medicine).

### Het proefschrift

Het in het proefschrift beschreven onderzoek begon in 1988 en resulteerde in het proefschrift getiteld 'A biomechanical study on bone around dental implants in an edentulous mandible' (Meijer, 1992). Tot die tijd werden met behulp van de eindig-elementenmethode relatief gesimplificeerde modellen, voor het grootste deel tweedimensionaal, gebruikt voor de analyse van spanningen in het bot rond tandheelkundige implantaten. Na ontwikkeling van een eerste, gesimplificeerd, tweedimensionaal computermodel van een edentate onderkaak met implantaten bleek dat verdeling van corticaal en spongieus bot (met ieder specifieke materiaaleigenschappen) en de mogelijkheid tot doorbuiging van het computermodel (in welk anatomisch gebied van de kaak wordt het model vastgehouden ten opzichte van waar de krachten worden uitgeoefend) van sterke invloed waren op de hoogte van spanningen. Daarnaast werd met een tweedimensionaal model geen inzicht verkregen in doorbuiging van het model in het derde, voorachterwaartse vlak, terwijl bleek dat daar wel rekening mee moest worden gehouden. Daarom werd in een vroeg stadium van het onderzoek besloten om over te gaan tot de ontwikkeling van anatomisch gevormde driedimensio-



Afb. 1. Verse, menselijke edentate kadaveronderkaak met weinig botresorptie.

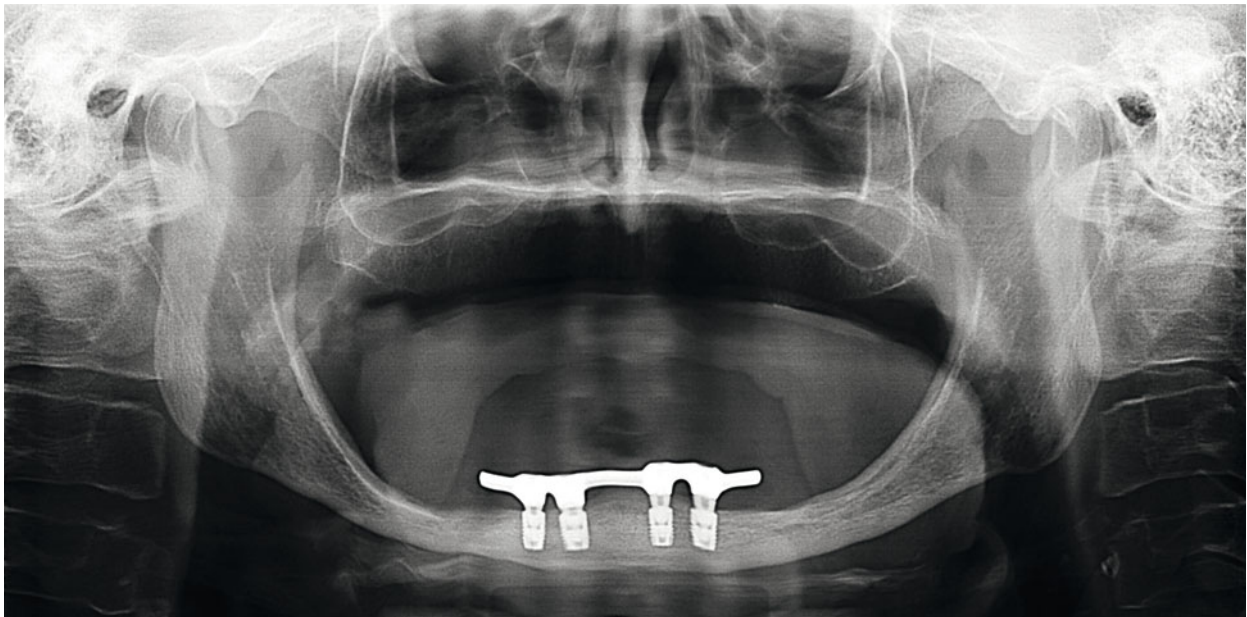


Afb. 2. Computermodel (van kaak van afb. 1) met 4 implantaten en staafmesostructuur.

nale modellen. De verdere ontwikkeling van commercieel verkrijgbare eindig-elementensoftware (met een kortere rekentijd) met bijbehorende hardware maakte het mogelijk om die keuze voor complexe driedimensionale modellen te maken. Algemeen doel van het proefschrift was de ontwikkeling van een state-of-the-art computermodel en vervolgens de invloed van een aantal parameters te berekenen op plaats en hoogte van spanning in het bot.

Voor de anatomische vormgeving van een edentate onderkaak werd gebruikgemaakt van verse, menselijke kadaverkaken (afb. 1). Met behulp van een cryomicrotoom werden doorsnedes gemaakt van de gehele kaak. Na kleuring werden de doorsnedes gefotografeerd en contour en grens tussen corticaal en spongieus bot, samen met referentiepunten, op papier overgenomen. Iedere tracing werd gedigitaliseerd en vervolgens in een eindig-elementenprogramma weer samengesteld tot de driedimensionale vorm van de edentate onderkaak. Implantaten en suprastructuur werden gemodelleerd met behulp van het computerprogramma (afb. 2). Corticaal bot, spongieus bot en implantaatsysteem werden elasticiteitseigenschappen gegeven behorend bij het materiaal. Het model werd gesteund ter plaatse van de beide processii condylaris en belast ter plaatse van de suprastructuur met verticale, horizontale en schuin aangebrachte krachten. Spierkracht werd gesimuleerd ter plaatse van de kaakhoek. In totaal werden 3 modellen vervaardigd op grond van 3 kadaveronderkaken, te weten 1 model met weinig resorptie, 1 met matige resorptie en 1 met extreme resorptie (Klasse III, V en VII volgens de indeling van Cawood en Howell uit 1988). Vervolgens werd de invloed van het aantal implantaten, de lengte van de implantaten en het ontwerp van de suprastructuur berekend op plaats en hoogte van spanning in peri-implantair bot. De volgende resultaten waren het opvallendst:

- De richting van de belasting had een grote invloed, waarbij schuinlaterale en horizontale krachten een veel grotere spanning in het bot veroorzaakten dan een verticale kracht in de asrichting van het implantaat.
- De inclinatie van implantaten had een grote invloed.



Afb. 3. Röntgenopname met 4 implantaten van 6 mm lengte in een edentate onderkaak.

- Er was weinig verschil tussen belasting van solitaire implantaten en implantaten verbonden door een staaf, indien belasting gelijkmatig plaatsvond.
- Er was weinig verschil bij 2 en 4 implantaten in het interforaminale gebied.
- De introductie van een moment door het labiaal van de implantaten plaatsen van een staaf veroorzaakte een grotere spanning.
- Het toepassen van distale extensies aan een staaf en hierop belasting uitoefenen gaf een grotere spanning in het bot bij het dichtstbij gelegen implantaat.
- Een afnemende kaakhoogte gaf hogere spanningen door een grotere deformatie van de kaak.
- De lengte van implantaten had een verwaarloosbaar effect op de hoogte van de spanning.

In de discussie werd aangegeven dat niet bekend was welke spanningswaarden precies voor aanpassing van bot kunnen zorgen en welke resorptie veroorzaken. Computermodellen zijn vooral geschikt om verschillen tussen aangebrachte parameters te zien, zonder dit direct bij een patiënt te testen. Een verdere limitatie is dat enkele randvoorwaarden worden ingevuld die mogelijk niet de werkelijkheid representeren. Voorbeelden hiervan zijn de (variatie in) materiaaleigenschappen van bot en de connectie van implantaat aan bot in een computermodel (osseo-integratie simulerend). De resultaten van het onderzoek gelden niet voor vergelijkbare implantaatconstructies in de bovenkaak. In de bovenkaak gelden andere randvoorwaarden met betrekking tot steun van het computermodel en dientengevolge doorbuiging van de botstructuur. Als aanbeveling voor verder onderzoek werd gesuggereerd om bepaalde variabelen te testen in een klinisch onderzoek met röntgenologische follow-up.

### Ontwikkelingen sinds 1992

Eindige-elementenmodellen hebben een grote vlucht genomen binnen de tandheelkunde. Er zijn veel nieuwe

materialen ontwikkeld en het wordt gezien als de ultieme methode om complexe modellen te bouwen en vervolgens spanningen te berekenen (Trivedi, 2014). Men ziet grote voordelen ten opzichte van klinisch onderzoek. Men krijgt inzicht in de biomechanica van fractures, de experimenten zijn te herhalen, er zijn geen ethische afwegingen en modificaties in model en randvoorwaarden zijn snel uit te voeren. Ook in de tandheelkundige implantologie wordt het veelvuldig toegepast, mede door een sterke software-ontwikkeling die modellen dicht bij de klinische werkelijkheid heeft gebracht (Murakami en Wakabayashi, 2014). Ook is de snelheid van de berekeningen fors toegenomen. Was er in 1992 voor analyse van een model nog meer dan 20 uur nodig; nu ligt dat voor een vergelijkbare vraagstelling in de buurt van 20 minuten. Dit betekent dat men meer variaties en complexere modellen kan doorrekenen in dezelfde tijd. Maar nog steeds geldt: computermodellen kunnen de klinische werkelijkheid niet compleet kopiëren. Klinische onderzoeken dienen eindige-elementenmodellen te completeren (Trivedi, 2014).

Twee modellen uit het proefschrift hebben een duidelijk klinisch vervolg gekregen. De eerste behoort bij de conclusie dat er weinig verschil was in spanning in het peri-implantaire bot bij 2 implantaten in de edentate onderkaak vergeleken met 4 implantaten. De klinische implicatie hiervan zou zijn dat in een klinisch onderzoek peri-implantaire botveranderingen vergelijkbaar zouden moeten zijn bij een overkappingsprothese op 2 implantaten vergeleken met een overkappingsprothese op 4 implantaten. In 1998 is een proefschrift voltooid door Batenburg waarin een vergelijking werd gemaakt tussen een groep patiënten met 2 en een groep met 4 implantaten in de edentate onderkaak (Batenburg, 1998). Resultaten na 1, 5 en 10 jaar lieten tussen de groepen geen verschil zien qua overleving van de implantaten en qua botveranderingen op röntgenopnamen (Batenburg et al, 1998; Visser et al, 2005; Meijer et al, 2009). Een tweede voorbeeld betreft



de toepassing van korte implantaten. De computermodellen werden uitgevoerd met implantaat lengtes van 14 mm, 10 mm en 6 mm. Deze laatste implantaat lengte werd in die periode als absoluut onrealistisch gezien. Op grond van de modelonderzoeken werd echter geconcludeerd dat de lengte van implantaten een verwaarloosbaar effect had op de hoogte van de spanning. De klinische implicatie hiervan zou zijn dat korte implantaten in staat zouden moeten zijn om functionele krachten te weerstaan zonder progressief peri-implantair botverlies. In 2014 is een proefschrift voltooid door Guljé waarin de toepassing van korte implantaten werd onderzocht (Guljé, 2014). Resultaten na 1 jaar van 6 mm-implantaten onder een overkappingsprothese in de onderkaak toonden een implantaatoverleving van 96% en peri-implantair botverlies van 0,1 mm. Guljé concludeerde dat 6 mm-implantaten een solide basis vormen voor een overkappingsprothese in de onderkaak (afb. 3) (Guljé et al., 2012). Ongetwijfeld heeft de sterke verbetering van implantaatoppervlakken in recente jaren ertoe geleid dat kortere implantaten pas in een latere fase werden vertrouwd en klinisch getest.

### Slotbeschouwing

De resultaten van het proefschrift hebben bijgedragen aan de introductie en het vertrouwd maken van computermodellen in de tandheelkunde, in het bijzonder de tandheelkundige implantologie. Conclusies met betrekking tot ontwerp van implantaten en suprastructuur zijn in veel gevallen juist gebleken na klinisch onderzoek. Computermodellen hebben een grote ontwikkeling doorgemaakt, maar zijn nog steeds geen nauwkeurige afspiegeling van de klinische werkelijkheid. Wel zijn ze uitstekend geschikt om op korte termijn inzicht te krijgen in een mogelijk effect van veranderingen in ontwerp en materiaaleigenschappen, zonder dat patiënten worden blootgesteld aan het risico op complicaties.

### Literatuur

- \* Cawood JJ, Howell RA. A classification of the edentulous jaws. *Int J Oral Maxillofac Surg* 1988; 17: 232-236.
- \* Batenburg RHK. Implants supporting mandibular overdentures. A prospective comparative study. Groningen: Rijksuniversiteit Groningen, 1998. Academisch proefschrift.
- \* Batenburg RH, Raghoobar GM, Oort RP van, Heijdenrijk K, Boering G. Mandibular overdentures supported by two or four endosteal implants. A prospective, comparative study. *Int J Oral Maxillofac Surg* 1998; 27: 435-439.
- \* Greenstein G, Cavallaro J, Tarnow D. Assessing bone's adaptive capacity around dental implants. A literature review. *JADA* 2013; 144: 362-368.
- \* Guljé FL. Short dental implants. Groningen: Rijksuniversiteit Groningen, 2014. Academisch proefschrift.
- \* Guljé FL, Raghoobar GM, Meulen JP ter, Vissink A, Meijer HJA. Mandibular overdentures supported by 6 mm dental implants; a 1-year prospective cohort study. *Clin Impl Dent Rel Res* 2012; 14 (suppl. 1): e59-e66.
- \* Huiskes R, Weinans H, Grootenboer HJ, Dalstra M, Fudala B, Slooff TJ.

### Onderzoek en wetenschap

- Adaptive bone-remodeling theory applied to prosthetic-design analysis. *J Biomech* 1987; 20: 1135-1150.
- \* Matthews FL, West JB. Finite element displacement analysis of a lung. *J Biomech* 1972; 5: 591-600.
- \* Meijer HJA. A biomechanical study on bone around dental implants in an edentulous mandible. A finite element analysis and a design for a radiographic analysis. Utrecht: Rijksuniversiteit Utrecht, 1992. Academisch proefschrift.
- \* Meijer HJA, Raghoobar GM, Batenburg RHK, Visser A, Vissink A. Mandibular overdentures supported by two or four endosseous implants: a 10-year clinical trial. *Clin Oral Impl Res* 2009; 20: 722-728.
- \* Murakami N, Wakabayashi N. Finite element contact analysis as a critical technique in dental biomechanics: a review. *J Prosthodont Res* 2014; 58: 92-101.
- \* Sklalak R. Biomechanical considerations in osseointegrated prostheses. *J Prosthet Dent* 1983; 49: 843-848.
- \* Sotto-Maior BS, Mercuri EGF, Senna PM, Assis NMSP, Francischone CE, Del Bel Cury AA. Evaluation of bone remodeling around single dental implants of different lengths: a mechanobiological numerical simulation and validation using clinical data. *Comput Methods Biomech Biomed Engin* 2016; 19: 699-706.
- \* Tesk JA, Widera O. Stress distribution in bone arising from loading on endosteal dental implants. *J Biomed Mater Res Symposium* 1973; 4: 251-261.
- \* Trivedi S. Finite element analysis: A boon to dentistry. *J Oral Biol Craniofac Res* 2014; 4: 200-203.
- \* Visser A, Raghoobar GM, Meijer HJA, Batenburg RHK, Vissink A. Mandibular overdentures supported by two or four endosseous implants. *Clinical Oral Implants Research* 2005; 16: 19-25.

### Summary

#### Dissertations 25 years after date 49. A biomechanical analysis of bone around dental implants in an edentulous mandible

*Changes in the bone around perimucosal endosseous implants can be caused by biomechanical factors. Computer models are used to calculate the location and magnitude of stresses in the bone. The finite element method is used for the construction and calculation of models. The ongoing development of software and hardware 25 years ago made it possible to construct more complex 3-dimensional models. The general aim of the dissertation was to develop a state-of-the-art computer model of an edentulous mandible with dental implants and then to calculate the influence of a number of parameters on the location and magnitude of stresses in the bone. Conspicuous results were that there is hardly any difference between 2 and 4 implants in the interforaminal region and that the length of implants has a negligible effect on the magnitude of stresses. Clinical studies have subsequently demonstrated that these results are in line with reality.*

### Bron

H.J.A. Meijer

Uit de afdeling Mondziekten, Kaak- en Aangezichtschirurgie van het Centrum voor Tandheelkunde en Mondzorgkunde in Groningen/UMC Groningen

Datum van acceptatie: 8 januari 2018

Adres: prof. dr. H.J.A. Meijer, UMC Groningen, postbus 30.001, 9700 RB Groningen

h.j.a.meijer@umcg.nl