

De synergie van radiologie en CAD/CAM

Bij de planning van behandelingen kunnen data verkregen met conebeamcomputertomografie en andere driedimensionale technieken worden gecombineerd in één model. In dat model kunnen uitgebreide behandelingen worden gepland en prothetische voorzieningen worden voorbereid. De planning en productie van de uiteindelijke prothetische constructie kan vervolgens met behulp van Computer Aided Design en Computer Aided Manufacturing plaatsvinden. Het is de verwachting dat door de technologische ontwikkelingen dergelijke processen een steeds grotere rol zullen gaan spelen aan de tandartsstoel.

Meer WJ van der. De synergie van radiologie en CAD/CAM
Ned Tijdschr Tandheelkd 2016; 123: 205-209
doi: 10.5177/ntvt.2016.04.16124

Introductie

Bij de moderne plannings- en productieprocessen in de tandheelkunde spelen digitale 'workflows' een steeds grotere rol. Bij dergelijke workflows worden driedimensionale datasets van de patiënt gebruikt om diagnostiek te bedrijven, een behandeling te plannen en/of om onderdelen voor de uiteindelijke behandeling of zelfs een complete restauratieve oplossing te produceren.

De eerste beschrijving van een complete digitale workflow voor het maken van een kroon werd beschreven in 1973 door Francois Duret (Duret, 1973). Hij beschreef het gebruik van een intraorale scanner om het traditionele afdrukken te vervangen en stelde voor een computer te gebruiken voor het ontwerpen van een kroon en een kleine freesmachine voor het produceren van dit ontwerp. Dit idee werd 1980 daadwerkelijk uitgevoerd door de Zwitserse tandarts Werner Mörmann en de elektrotechnisch ingenieur Marco Brandestini. Pas in 1987 werd dit systeem door Sirona Dental Systems op de markt gebracht onder de naam CEREC, hetgeen een afkorting is van Chair-side Economical Restoration of Esthetic Ceramics (afb. 1) (Birnbau en Aaronson, 2008). Dit was het eerste systeem waarmee aan de stoel een inlay of kroon kon worden geproduceerd met behulp van computer aided design en computer aided manufacturing, kortweg CAD/CAM genoemd. Dit systeem was zijn tijd ver vooruit, en misschien werd het daardoor geen doorslaand succes. Enerzijds omdat het nog bijzonder lastig was een kroon te produceren. De soft- en hardware waren nog te beperkt in de mogelijkheden. Een ander nadeel van het CEREC-systeem was dat het een gesloten systeem was. Met andere woorden, de tandarts moest ook alle handelingen zelf uitvoeren en kon de digitale afdruk niet naar een tandtechnisch laboratorium sturen dat hem kon helpen bij het ontwerpen of bij het produceren van de inlay of de kroon. Het CEREC-systeem

Leerdoelen

Na het lezen van dit artikel heeft u:

- kennisgenomen van de rol van conebeamcomputertomografie (CBCT) in de planning van tandheelkundige behandelingen;
- een overzicht van de ontwikkelingen hierin en wat de toekomst nog zou kunnen brengen.

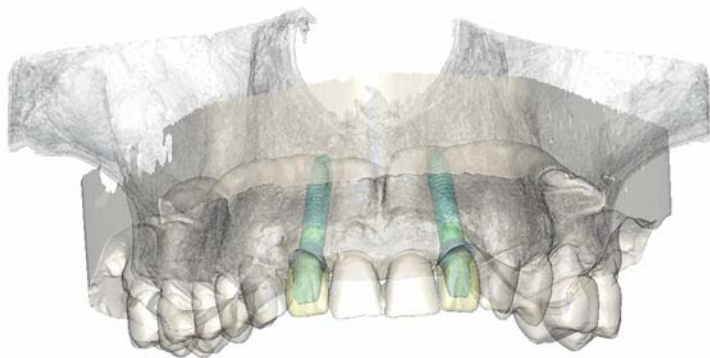
maakte wel een snelle evolutie door waardoor de bediening steeds gemakkelijker en gebruikersvriendelijker werd. Verder werden de restauratieve mogelijkheden steeds verder uitgebreid en was het systeem niet meer beperkt tot een enkele inlay of kroon.

Parallel aan de uitgebreide ontwikkeling van het CEREC-systeem, werden in de jaren 90 van de vorige eeuw driedimensionale scanners (3D-scanners) ontwikkeld voor het scannen van middelgrote en grote objecten. Deze scanners werden in onderzoek gebruikt voor het scannen van gipsmodellen van de dentitie en voor het scannen van het aangezicht. Ze bleken nauwkeurig genoeg voor het uitvoeren van anatomische metingen aan het gezicht en voor het uitvoeren van orthodontische analyses (Kuroda et al, 1996; Kusnoto en Evans, 2002; Khambay et al, 2008; Lübbers et al, 2010). Dit leidde in eerste instantie tot de introductie van 3D-scanners in de tandtechnische labs om modellen en afdrukken te kunnen scannen en op deze wijze kronen en bruggen op de computer te kunnen ontwerpen.

Begin van deze eeuw werd in de tandheelkunde conebeamcomputertomografie (CBCT) geïntroduceerd. Daarmee werd het mogelijk om met een relatief geringe röntgendosis een driedimensionale röntgendataset van de patiënt te verkrijgen (Holberg et al, 2005). Dergelijke



Afb. 1. Het originele CEREC I-systeem.



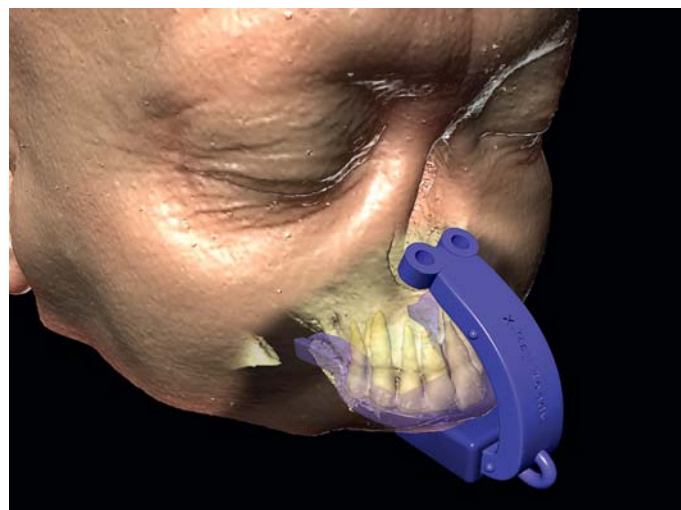
Afb. 2. Beeld verkregen door de combinatie van CBCT-data en een driedimensionaal model van de dentitie, te gebruiken voor het plannen van de plaatsing van implantaten. (Beeld: ©DENTSPLY Implants)

datasets werden al snel ingezet in de orthodontie, de mka-chirurgie en de implantologie (Holberg et al, 2005; Bamgbose et al, 2008). Behandelpanning op basis van driedimensionale röntgenbeelden was voor de implantologie al mogelijk met speciale software en conventionele CT-beelden (Mupparapu en Singer, 2004). Maar omdat er voor een CBCT-opname minder straling nodig was dan voor een CT-opname, was het bezien vanuit het ALARA-principe eerder te rechtvaardigen om voor implantologie een CBCT te maken. De software voor de planning van het plaatsen van de implantaten was al in 1993 geïntroduceerd, maar maakte een uitgebreide ontwikkeling door en leidde geleidelijk een nieuwe fase in voor de planning van tandheelkundige behandelingen (Mupparapu en Singer, 2004). Ten eerste bleek het noodzakelijk om meer driedimensionale datasets te combineren in 1 dataset. Zo moesten de CBCT-röntgendata worden gecombineerd met een driedimensionaal model van de dentitie (afb. 2). Dit is noodzakelijk omdat de planning gebruikt werd voor het produceren van een plaatsingsmal die op de dentitie van de patiënt moest passen als stabilisatie van de mal. Ten tweede werd een relatief nieuwe technologie gebruikt voor het produceren van de plaatsingsmal: driedimensionaal printen.

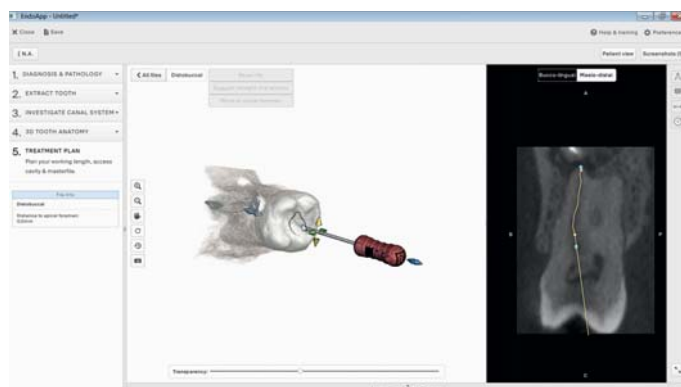
Combineren van driedimensionale datasets

Het plaatsen van implantaten met behulp van driedimensionale datasets werd met de introductie van de CBCT ook door andere bedrijven overgenomen. Zowel fabrikanten van implantaten (Nobel Bifocale, Stroman) als fabrikanten van CBCT-apparaten (Sirona) kwamen met hun eigen software om implantaten te plaatsen en een bijbehorende service om de plaatsingsmal te produceren. Ook in deze applicaties was het nodig verschillende driedimensionale datasets te combineren.

Vrijwel alle softwareapplicaties hadden een combinatie van nadelen als hoge prijs, beperkingen van het te gebruiken merk implantaten, het feit dat het niet mogelijk was om zelf de plaatsingsmal te ontwerpen en een relatief hoge prijs van de plaatsingsmal. Dergelijke beperkingen kunnen uitgebreide inzet van de software in de markt remmen en maken de toepassing van de software bij sommige behandelingen onmogelijk. Om deze beperkingen te omzeilen



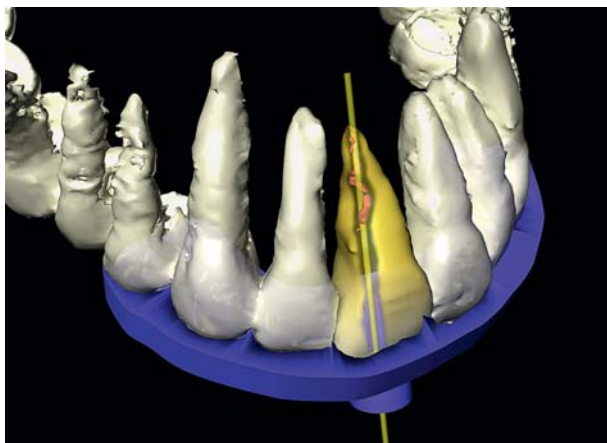
Afb. 3. Planning van implantaten in de neusbodem uitgevoerd met industriële driedimensionale software, waarbij de implantatiemal wordt ontworpen in de software en daarna wordt geproduceerd met een 3D-printer. Deze implantaten worden geplaatst voor de maxillofaciale prothetiek.



Afb. 4. Gebruik van nieuwe 3D-endo™ software voor het plannen van een endodontische behandeling op basis van CBCT-data.

maakten sommige klinici gebruik van combinaties van diverse software om zelf gecompliceerde behandelplanningen te maken en de geplande behandelingen uit te voeren (afb. 3). Ook daarbij werden verschillende driedimensionale datasets met elkaar gecombineerd in 1 model van de patiënt waar dan de planning in de software werd uitgevoerd (Ciocca et al, 2009; Van der Meer et al, 2012).

De combinatie van driedimensionale datasets voor het plannen van behandelingen bleef niet beperkt tot de implantologie, maar ook bij het plannen van osteotomieën werden driedimensionale datasets van de gebitsmodellen ingebracht en kon met behulp van een operatiewafer de osteotomie op voorspelbare wijze, conform de planning, worden uitgevoerd (Yu et al, 2011). Inmiddels blijkt de toepassing van driedimensionale planning als voorbereiding van een behandeling niet alleen beperkt tot chirurgie, maar kan tegenwoordig ook de uitvoering van endodontische behandelingen met behulp van deze technologie worden voorbereid. Binnenkort verschijnt er software waarmee een endodontische behandeling tot in detail kan worden voorbereid (3D-endo™ software) (afb. 4). Daarnaast blijkt het mogelijk om met gratis software een driedimensionale planning te maken voor de endodontische behandeling van



Afb. 5. Met behulp van gratis software kan zelfs een geleidemaal voor de endodontische behandeling van een geoblitereerd frontelement worden ontworpen, waarna deze kan worden geproduceerd met een 3D-printer.

geoblitereerde frontelementen. Hierbij wordt een geleidemaal voor een boor ontworpen in de software en geproduceerd met behulp van een driedimensionale printer (afb. 5). Met een dergelijke geleidemaal kan een sterk geoblitereerd wortelkanaal dan veilig worden vrijgemaakt (Van der Meer et al, 2015).

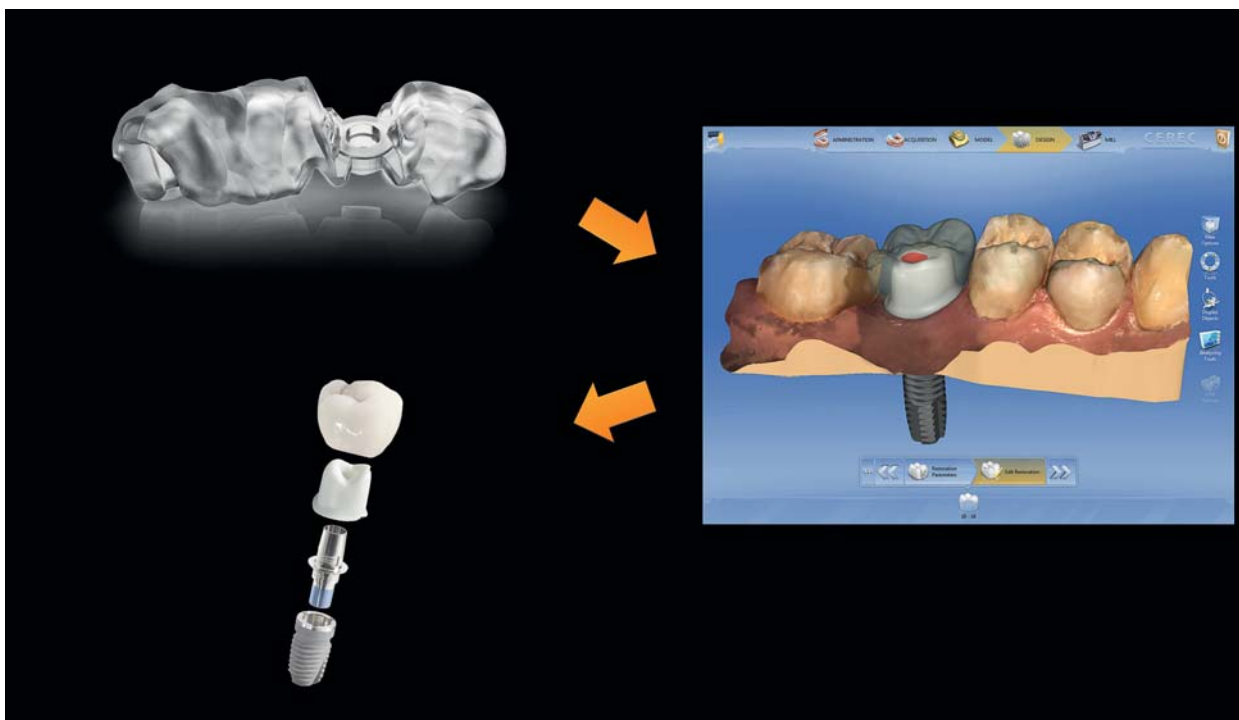
‘Prosthetically driven planning’

Vanaf het begin van de ontwikkeling van driedimensionale planningsprocedures was het duidelijk dat het voorbereiden van de plaatsing van implantaten diende te geschieden op basis van de uiteindelijke prothetische constructie, het zogenaamde ‘prosthetically driven planning’, maar dit was in de traditionele planning vaak lastig te realiseren (Zitzmann en Marinello, 1999). Het driedimensionaal voorbe-

reiden van het plaatsen van implantaten met behulp van software was al een grote sprong voorwaarts, maar werd verder uitgebreid door de uiteindelijke prothetische constructie daar waar mogelijk in de planning te betrekken (Katsoulis et al, 2009). Daardoor konden de implantaten precies op de juiste plek worden gepland en geplaatst en werd de bestaande gebitsprothese aangepast op de geplaatste implantaten. De beperking hierbij was dat de prothetische constructie nog steeds na het implanteren moest worden aangepast of gefabriceerd. Er werden dan ook concepten ontwikkeld waarbij de prothetische constructie al volledig gereed was en direct na het implanteren kon worden geplaatst (Maló et al, 2005).

Dit idee kan nog verder worden uitgebreid door een CAD/CAM-systeem te combineren met een CBCT. Dit wordt inmiddels ook al enkele jaren gedaan door Sirona, dat naast het CEREC-systeem ook een CBCT in haar productielijn heeft. Er is hiervoor een softwarekoppeling gemaakt, waardoor de planning van de CEREC kan worden geïmporteerd in de software van het CBCT-apparaat. Hierdoor is het voor tandartsen mogelijk om zelf de positie van het implantaat, de noodzakelijke boormal en ook de uiteindelijke kroon te plannen. De boormal kan zelfs aan de stoel worden geproduceerd door de CEREC-slijpmachine (afb. 6). Na het plaatsen van het implantaat en de osseointegratie van het implantaat kan met behulp van de CEREC-unit een individueel abutment en/of kroon worden ontworpen en geproduceerd (Reiz et al, 2014).

Om ook de esthetische veranderingen te simuleren bestaat er verschillende software waarmee de digitale ‘smile design’ kan worden gesimuleerd op basis van foto’s en modellen van de patiënt. Met deze software kunnen eenvoudi-



Afb. 6. In deze compleet digitale workflow van Sirona kan zowel de implantologische als de prothetische behandeling worden gepland en uitgevoerd in het CAD/CAM systeem. Linksboven is de implantaatmal te zien die aan de stoel kan worden geproduceerd met behulp van CAM, rechts de planning van de implantaatopbouw en de uiteindelijke kroon en ten slotte linksonder een voorbeeld van het eindresultaat dat met de CEREC wordt geproduceerd.

ge simulaties worden uitgevoerd en daarmee is het mogelijk om patiënten al een idee te geven van wat de invloed van veranderingen aan de frontelementen op het uiterlijk zullen zijn. Deze software staat nog in de kinderschoenen en moet worden gezien als eerste stap in de richting van een systeem waarmee een volledig virtueel behandelplan kan worden gemaakt (Zimmermann en Mehl, 2015).

Driedimensionaal printen

In het verleden was het frezen van werkstukken de enige mogelijkheid voor computer aided manufacturing van tandheelkundige prothetische constructies. Het nadeel van frezen is dat de verschillende eindproducten uit een relatief groot blok materiaal worden gefreesd waarvan het grootste deel wordt verspaand en als nutteloos afval eindigt. Een productietechniek waarbij minder afvalmateriaal wordt geproduceerd is een veel kostenefficiëntere wijze van produceren en driedimensionaal printen (3D-printen) is een dergelijke techniek. Maar deze techniek kwam pas beschikbaar na 1987 met de introductie van de eerste driedimensionale stereolithografieprinters en tevens ontbrak het voor die tijd aan biocompatibele driedimensionale printbare materialen die in de mond konden worden gebruikt. Vanaf het moment dat de 3D-printtechnologie beschikbaar kwam, werd het toegepast voor de productie van anatomische modellen op basis van CT-scans en later ook voor de productie van boormallen voor het plaatsen van implantaten die met behulp van driedimensionale software waren gepland. Sinds het begin van de jaren 90 biedt de 3D-printtechnologie veel meer mogelijkheden omdat er meer soorten, soms goedkopere, 3D-printtechnieken zijn ontwikkeld. 3D-printen wordt momenteel dan ook vaker toegepast. Sommigen onderzoekers experimenteren al met het fabriceren van op maat gemaakte implantaten met behulp van een 3D-printer. Hiertoe wordt op basis van CBCT-beelden van de wortel van een gebitselement dat geëxtraheerd zal worden een driedimensionaal model gemaakt. Dit model wordt vervolgens met behulp van een 3D-printer in titanium geproduceerd. Op deze wijze is het mogelijk een implantaat te produceren dat precies in de extractiealveole van het gebitselement past (Moin et al, 2014).

Sinds kort zijn er biocompatibele kunststoffen voor het 3D-printen verkrijgbaar speciaal voor toepassingen in de mond. Met deze materialen wordt momenteel ook geëxperimenteerd om prothetische constructies, zoals kronen en noodkronen, en allerlei hulpmiddelen, bijvoorbeeld orthodontische apparatuur en splints, te printen. Het nadeel van 3D-printen is dat de productietijd relatief lang is omdat het printen langzaam gaat. Maar ook daar komen al nieuwe technische oplossingen voor en een bedrijf in de Verenigde Staten (Carbon3D) komt spoedig met een 3D-printer die in staat zal zijn om in plaats van in enkele uren binnen een paar minuten een model te printen.

Toekomstige ontwikkelingen

Sinds de introductie van de eerste CAD/CAM-mogelijkheden 30 jaar geleden is er binnen de tandheelkunde veel gebeurd, maar de verwachting is dat pas de komende jaren

het gebruik van CAD/CAM een grote vlucht gaat nemen. Er kunnen dan meer driedimensionale data, verkregen met CBCT en andere imaging technologieën van dezelfde patiënt, worden gecombineerd in aangezichtssoftware, waarmee veranderingen in de functie of de esthetiek kunnen worden gesimuleerd. Met deze software kunnen dan gemakkelijker uitgebreide gebitsrehabilitaties worden voorbereid en het effect van behandelingen worden gesimuleerd. Deze toekomstvisies zijn niet alleen gebaseerd op de ontwikkelingen op het gebied van software, maar ook op de verwachting dat de prijzen van de hardware, zoals 3D-scanners en -printers, zullen dalen. Verwacht wordt dat de 3D-scanners door de marktwerking niet alleen goedkoper worden, maar dat hun resolutie enorm zal toenemen conform de toename in resolutie van de fotocamera's. Naast de prijsdaling en de toename in kwaliteit, zal de apparatuur eenvoudiger in het gebruik worden, waardoor handelingen als het maken van afdrucken, ook voor kronen en bruggen, kan worden uitgevoerd door hulppersoneel. Dit zal een enorme verandering betekenen voor de taakdelegatie en het basisprofiel van tandartsen.

Op het gebied van de 3D-printers is de verwachting dat er goedkope 3D-printers met een wat lagere resolutie beschikbaar komen die kunnen worden gebruikt in combinatie met de eerder genoemde biocompatibele materialen. Hierdoor zal deze technologie voor ieder tandtechnisch laboratorium en iedere tandartspraktijk beschikbaar zijn voor eindproducten die geen hoge resolutie vereisen, zoals studiemodellen of afdruklepels.

Al deze ontwikkelingen zullen ertoe leiden dat het gemakkelijker wordt om aan de stoel prothetische constructies of hulpmiddelen te produceren met verschillende technologieën (frezen of 3D-printen), waardoor de zorg efficiënter, beter en uiteindelijk ook goedkoper zou kunnen worden. Hoe de taakverdeling binnen het tandheelkundig team wordt, is nog niet duidelijk. Hulpkrachten zullen veel meer kunnen doen door de eenvoud van de technologie en tandtechnici zullen een grotere rol spelen bij het uitvoeren van de computersimulaties en planning van de behandelingen. Het takenpakket van tandartsen zal zich meer bewegen richting het diagnosticeren, indiceren en superviseren van de behandelingen. En op deze wijze zal de invloed van de technologie alle huidige taken herschikken.

Literatuur

- * Bamgbose BO, Adeyemo WL, Ladeinde AL, Ogunlewe MO. Conebeam computed tomography (CBCT): the new vista in oral and maxillofacial imaging. *Nig Q J Hosp Med* 2008; 18: 32-35.
- * Birnbaum NS, Aaronson HB. Dental impressions using 3D digital scanners: virtual becomes reality. *Compend Contin Educ Dent* 2008; 29: 494, 496, 498-505.
- * Ciocca L, Mingucci R, Bacci G, Scotti R. CAD-CAM construction of an auricular template for craniofacial implant positioning: a novel approach to diagnosis. *Eur J Radiol* 2009; 71: 253-256.
- * Duret F, Empreinte Optique, in Faculté d'Ondontologie. Lyon: Université Claude Bernard, 1973. Academisch proefschrift.
- * Holberg C, Steinhäuser S, Geis P, Rudzki-Janson I. Cone-beam computed

tomography in orthodontics: benefits and limitations. *J Orofac Orthop* 2005; 66: 434-444.

- * Katsoulis J, Pazera P, Mericske-Stern R. Prosthetically driven, computer-guided implant planning for the edentulous maxilla: a model study. *Clin Implant Dent Relat Res* 2009; 11: 238-245.
- * Khambay B, Nairn N, Bell A, Miller J, Bowman A, Ayoub AF. Validation and reproducibility of a high-resolution three-dimensional facial imaging system. *Br J Oral Maxillofac Surg* 2008; 46: 27-32.
- * Kuroda T, Motohashi N, Tominaga R, Iwata K. Three-dimensional dental cast analyzing system using laser scanning. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1996; 110: 365-369.
- * Kusnoto B, Evans CA. Reliability of a 3D surface laser scanner for orthodontic applications. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2002; 122: 342-348.
- * Lübbers HT, Medinger L, Kruse A, Grätz KW, Matthews F. Precision and accuracy of the 3dMD photogrammetric system in craniomaxillofacial application. *J Craniofac Surg* 2010; 21: 763-767.
- * Maló P, Rangert B, Nobre M. All-on-4 immediate-function concept with Brånemark System implants for completely edentulous maxillae: a 1-year retrospective clinical study. *Clin Implant Dent Relat Res* 2005; 7 Suppl 1: S88-S94.
- * Meer WJ van der, Raghoobar GM, Gerrits PO, Noorda WD, Vissink A, Visser A. Digitally designed surgical guides for placing implants in the nasal floor of dentate patients: a series of three cases. *Int J Prosthodont* 2012; 25: 245-251.
- * Meer WJ van der, Vissink A, Ng YL, Gulabivala K. 3D Computer aided treatment planning in endodontics. *J Dent* 2015; 45: 67-72.
- * Moin DA, Hassan B, Parsa A, Mercelis P, Wismeijer D. Accuracy of preemptively constructed, cone beam CT-, and CAD/CAM technology-based, individual Root Analogue Implant technique: an *in vitro* pilot investigation. *Clin Oral Implants Res* 2014; 25: 598-602.
- * Mupparapu M, Singer SR. Implant imaging for the dentist. *J Can Dent Assoc* 2004; 70: 32.
- * Reiz SD, Neugebauer J, Karapetian VE, Ritter L. Cerec meets Galileos-integrated implantology for completely virtual implant planning. *Int J Comput Dent* 2014; 17: 145-157.
- * Yu H, Cheng J, Cheng AH, Shen SG. Preliminary study of virtual orthognathic surgical simulation and training. *J Craniofac Surg* 2011; 22: 648-651.
- * Zimmermann M, Mehl A. Virtual smile design systems: a current review. *Int J Comput Dent* 2015; 18: 303-317.
- * Zitzmann NU, Marinello CP. Clinical and technical aspects of implant-supported restorations in the edentulous maxilla: the fixed partial denture design. *Int J Prosthodont* 1999; 12: 307-312.

Summary

The synergy of radiology and CAD/CAM

For treatment planning purposes, data acquired with cone-beam computer tomography and data from other three-dimensional imaging techniques can be combined in a single dataset. With the aid of this combined dataset extensive treatment planning and prosthetic solutions can be realised. The planning and production of the definitive prosthetic solution can then be accomplished using computer-aided design and computer-aided manufacturing technologies. These technological developments are expected to play an increasingly significant role for chair-side solutions.

Bron

W.J. van der Meer

Uit de afdeling Orthodontie en het W.J. Kolff Institute of Biomedical Engineering and Materials Science van het UMC Groningen

Datum van acceptatie: 1 maart 2016

Adres: W.J. van der Meer, UMCG, Antonius Deusinglaan 1, 9713 AV Groningen

w.j.van.der.meer@umcg.nl