

Pregledni prispevek/Review article

RAČUNALNIŠKO VODENO PREDOPERATIVNO NAČRTOVANJE IN VSADITEV ZOBNIH IMPLANTATOV

COMPUTER GUIDED PRE-OPERATIVE PLANNING AND DENTAL IMPLANT PLACEMENT

Dušan Grošelj,¹ Ksenija Renner-Sitar,² Aleš Kukovič,³ Helena Grošelj⁴

¹ Katedra za ustne bolezni in parodontologijo, Odsek za dentalno medicino, Medicinska fakulteta Ljubljana, Hrvatski trg 6, 1000 Ljubljana

² Katedra za stomatološko protetiko, Odsek za dentalno medicino, Medicinska fakulteta Ljubljana, Hrvatski trg 6, 1000 Ljubljana

³ Klinični inštitut za radiologijo, Klinični center, Zaloška 7, 1525 Ljubljana

⁴ Megfid d.o.o., Langusova ul. 7, 1000 Ljubljana

Izvleček

Izhodišča

Zobni implantati so v dentalni medicini poleg fiksne, snemne in maksilofacialne protetične oskrbe ena od zanesljivih možnosti funkcionalne in estetske rehabilitacije delne ali popolne brez zobnosti. Kirurški in protetični zapleti v implantologiji so pogosto nepričakovane posledice neustrezne diagnoze, načrtovanja in vsaditve implantata. V tem članku predstavljamo tehniko, ki uporablja visoko tehnologijo programske opreme in tudi hitre izdelave prototipov, imenovane stereolitografija. Programska oprema za postavljanje zobnih implantatov potrebuje kot osnovo visoko kakovosten digitalni zapis CT. Z njim je možno opraviti natančno predoperativno diagnostiko z izdelavo tridimenzionalnega predoperativnega načrta. Na osnovi CT digitalnega zapisa in virtualnega predoperativnega načrta oblikujejo pri podjetju Materialise tudi individualno kirurško delovno vodilo, ki med operacijo prenese delovni načrt v bolnikova usta.

Zaključki

Prednosti računalniško vodene implantologije so v bolj pripravljenem kirurškem posegu z boljšo predstavitvijo kritičnih anatomskih struktur, v natančnejši oceni razpoložljive kostnine s podatki o njeni kakovosti, varnejšem in hitrejšem operaterjevem delu, manj pogosti uporabi kostnih transplantatov, kakovostnem sodelovanju med specialisti, laboratorijem in boljši komunikaciji z bolnikom. Rentgenska preiskava kirurškega področja za računalniško vodeno načrtovanje vsajanja implantatov je zaradi visokih stroškov priporočljiva, kadar potrebujemo najvišjo mero informacije na mestu načrtovane implantacije.

Ključne besede

digitalni zapis CT čeljusti; radioopačna proteza; kirurška vodila; stereolitografija; računalniško vodeno oblikovanje

Abstract

Background

Implants in dentistry are, besides fixed, removable and maxillofacial prosthodontics, one of the reliable possibility to make functional and aesthetic rehabilitation of the edentulism. Surgical and prosthodontic implant complications are often an inattentive consequence of wrong diagnosis, planning, and placement. In this article we present a technique using a highly advanced software program along with a rapid prototyping technology named stereolithography. A planning software for implant placement needs basically the high

Avtor za dopisovanje / Corresponding author:

Doc. dr. Dušan Grošelj, dr. dent. med., Katedra za ustne bolezni in parodontologijo, Odsek za dentalno medicino, Medicinska fakulteta v Ljubljani, Hrvatski trg 6, 1000 Ljubljana, e-mail: dusan.groselj@mf.uni-lj.si

quality computed tomographic scan of one or both jaws for making accurate preoperative diagnostics and 3D preoperative plan. Later individual drill guide is designed and generated based on both the CT images and the preoperative planning. The patient specific drill guide transfers the virtual planning to the patient's mouth at time of surgery.

Conclusions

The advantages of computer guided implantology are the better prepared surgery with visualisation of critical anatomic structures, assessment of available bone and data about bone quality, increased confidence for the surgeon, decreased operative time, less frequent use of bone grafts, higher quality of collaboration between specialists and prosthetic lab and better communication with patients. Radiographic examination of the operation field for computer guided planning for implant placement is due to high costs justified as the most important information source on the areas to be implanted.

Key words

CT scan of the jaw; scan prosthesis; drill guides; stereolithography; computer-aided design

Uvod

Raziskave zadnjih desetletij na področju oralne implantologije, posebno osteointegracije zobnih implantatov ali vsadkov, so pripeljale do spoznanj, ki jo uvrščajo med visoko uspešno in napovedljivo restavrativno zdravljenje bolnikov z delno ali popolno brez-zobostjo tudi v visoki starosti.¹⁻⁵ Tehnika osteointegracije zagotavlja dolgotrajno preživetje biokompatibilnega titanovega implantata v čeljustni kosti z ohranjanjem stabilne ravni marginalne kosti. Zaželeno je, da za vsaditev izberemo takšna mesta, ki imajo dovolj kortikalne in spongiozne kosti in lahko zagotovijo ustrezno primarno stabilizacijo. V primeru šibke učvrstitve so med celjenjem možni mikropremiki implantata, ki imajo lahko za posledico njegovo fibrozno inkapsulacijo.⁶ Implantati, vsajeni v kost slabe kakovosti, tj. brez kompaktne substance s šibko mineralizacijo trabekul in ostanki bolezenskih procesov v kosti, kažejo pogosteje neuspehe.

Med številnimi dejavniki, ki botrujejo uspešni implantaciji, so pravilna predoperativna diagnoza z načrtom zdravljenja, ocena vertikalne dimenzije z analizo okluzije, predoperativna protetična izdelava zobnih nadomestkov, kirurško vodilo, ki zagotavlja primeren položaj in vstavitvev implantata ter ustrezno stabilizacijo.⁷⁻⁹

S primernim rentgenskim slikanjem je možno pridobiti podatke o višini in širini kosti, debelini kompakte, stopnji mineralizacije in količini spongiozne substance področij, kjer načrtujemo implantate. Rentgenološke metode, ki se uporabljajo za ovrednotenje obstoječe kosti, so: intraoralno periapikalno slikanje, ortopantomografsko slikanje (ortopan ali OPT), konvencionalno tomografsko slikanje, spiralna računalniška tomografija čeljusti in v novejšem času tudi obetavna CT metoda stožčastega snopa.^{6, 10-14} Standardni zobni posnetki najpogosteje ne dajo dovolj informacij o obliki in količini kosti, da bi bilo možno napovedati protetični izid zdravljenja z implantati. Kaj hitro se lahko zgodi, da si je operaterju, ki dela z mentalno navigacijo, težko predstavljati položaj končne proteze z zobnimi kronami ali prevlek fiksnoprotetičnih sider, kot si jih je v načrtu zamislil protetik. Zato lahko implantate postavi na manj ustrezno mesto. Kompromisna rešitev ne predstavlja le estetske in biomeha-

nične težave, temveč zahteva tudi spremembo načrta zdravljenja, ki je bil predoperativno predstavljen bolniku.

Slike prečnih prereзов čeljustne kosti nam ponujata konvencionalno tomografsko slikanje in spiralni CT. Vendar digitalni zapis CT nudi več informacij in možnosti na račun sorazmerno večjega odmerka absorbiranega sevanja ter višje cene. Če delamo na čeljustni kosti sistemsko ali lokalno zdravstveno prizadetih bolnikov, je tridimenzionalni CT digitalni zapis upravičen.⁸ Vtis o volumnu kosti lahko dobimo tudi, če od celotnega zobiščnega nastavka na vestibulooralnem prerezu mavčnega modela odštejemo debelino sluznice (bone mapping), kar merimo pod lokalno anestezijo.^{7, 15} Načrtovanje zdravljenja po obširni anamnezi, kliničnem pregledu, rentgenski preiskavi in natančni diagnozi nam zelo pomaga pri izbiri implantatov glede na njihov premer, dolžino, mesto vsaditve, orientacijo in število. Kolikor se nam kostna množina in kakovost ne zdita primerni, poiščemo druge načine zdravljenja, tudi take brez vključitve implantatov.

S pomočjo danes na trgu dosegljive izpopolnjene tridimenzionalne programske opreme SimPlant (Materialise NV, Leuven, Belgija), ki potrebuje kot osnovo kakovostni CT čeljusti (dentalni CT npr. v formatu DICOM), lahko zanesljivo prenesemo predoperativni načrt na kirurško polje in pomagamo kliničnemu zdravniku, da vsadi implantate tudi v mejnih primerih z manjšo širino zobiščnega nastavka, pri visokih estetskih zahtevah ali kjer je natančnost vsajanja lahko kritična za uspešen izid zdravljenja.¹⁶⁻¹⁹ Programska oprema SimPlant je združljiva z vsemi vrstami implantatov. Prvi korak pri delu z računalniško programsko opremo je, da bolnika najprej oskrbimo z začasnim radioopačnim zobnim nadomestkom, ki ga mora nositi med računalniško tomografijo čeljusti. Po konverziji in segmentiranju digitalnega zapisa (tridimenzionalna predstavitev anatomije, čiščenje odbitih žarkov, artefaktov) prikazemo na zaslonu dvodimenzionalno sliko aksialnih, panoramskih in prečnih rezov čeljusti ter njeno virtualno tridimenzionalno predstavitev, ki jo lahko obrčamo in režemo po milimetrih v aksialni in prečni, tj. vestibulooralni smeri. Pri vseh pogledih imamo tudi možnost uporabe velikih povečav in s tem natančne kontrole detajlov. Na vseh projekcijah lahko natanče-

no opredeljujemo položaj zobnih kron bodočega končnega izdelka hkrati z virtualno postavljenimi implantati, pri čemer lahko bolje upoštevamo biomehanske in estetske zahteve rehabilitacije. Anatomske zobne krone so rentgensko kontrastne in nas vodijo pri določanju meziodistalnega in vestibulooralnega položaja, smeri, dolžine in premera implantatov med računalniškim načrtovanjem. Opredelitev višine, širine, gostote čeljustne kosti (Hounsfieldove enote), položaja mandibularnega kanala, incizivnega kanala in tudi maksilarnega sinusa z nosno votlino postane enostavna ob delu z računalnikom, zlasti z uporabo orodij, kot so detektor kolizije, fenestracije in neustreznih smeri podolžnih osi v restavrativnem prostoru, ter simulacije volumna morebiti potrebnih kostnih transplantatov. V računalniku lahko torej naredimo kirurško simulacijo idealne postavitve implantata, ker sta nam poznana njegova natančna velikost in optimalno mesto za vsaditev. Operater predoperativno postavlja implantate bodisi v dvodimenzionalnih ali tridimenzionalnih računalniških slikah. Popravki slik v dveh dimenzijah vodijo avtomatično do korekcij slik v treh dimenzijah in obratno.

Sedanja računalniška tehnologija podpira tudi računalniško vodeno oblikovanje in izdelavo statičnega sistema za navigacijo med operacijo, tj. kirurškega vodila (SurgiGuide, Materialise NV, Leuven, Belgija) za vodenje svedra pri vrtanju kosti za vse vrste implantatov. Vodila naročimo na osnovi lastnega predoperativnega načrta v programski opremi, lahko kar po elektronski pošti pri Materialise. Tam z lasersko tehnologijo v petih delovnih dnevih izdelajo stereolitografski (SL) anatomski model čeljusti (Rapid Prototyping) in kirurško vodilo ali samo kirurško vodilo, če je le-to predvideno za naslanjanje na zobeh ali na sluznici čeljustnic. SurgiGuide izdelajo iz akrilata Stereocol (Zeneca Specialties, Brackley, Manchester, UK), ki ga je možno polimerizirati s svetlobo in ima odobritev FDA za uporabo v kirurgiji.²⁰

Postopek zdravljenja v bistvu zaključimo predoperativno že v simulatorju z združevanjem kirurškega in protetičnega načrtovanja, kar nam omogoča največji možni izkoristek lokalnih kostnih danosti, natančno vsaditev implantatov, ogibanje poškodbam sosednjih struktur ter upoštevanje biomehaničnih in estetskih zahtev pri rehabilitaciji brez zobnosti.^{6,9}

V tem članku bomo na primeru brez zobnosti v levi polovici maksile predstavili postopek, ki uporablja visoko tehnologijo programske opreme SimPlant za predoperativno postavitev zobnih implantatov, izdelavo kirurškega vodila s tehniko stereolitografije za vsaditev implantatov, ki so potrebni za kasnejšo fiksno protetično oskrbo delne brez zobnosti.

Izdelava radioopačne proteze

Rentgensko kontrastno protezo za skeniranje lahko naredijo v zobotehničnem laboratoriju na podlagi diagnostične modelacije zobnih nadomestkov v vosku, ki je narejena na študijskem mavčnem modelu ali kot duplikat ustrezne totalne proteze, ki je še v funkciji (Sl. 1 in Sl. 2).



Sl. 1. Predoperativno stanje delne brez zobnosti z dotrajano fiksno protetično rehabilitacijo.

Figure 1. Pre-operative status of partial edentulism with worn out prosthesis.

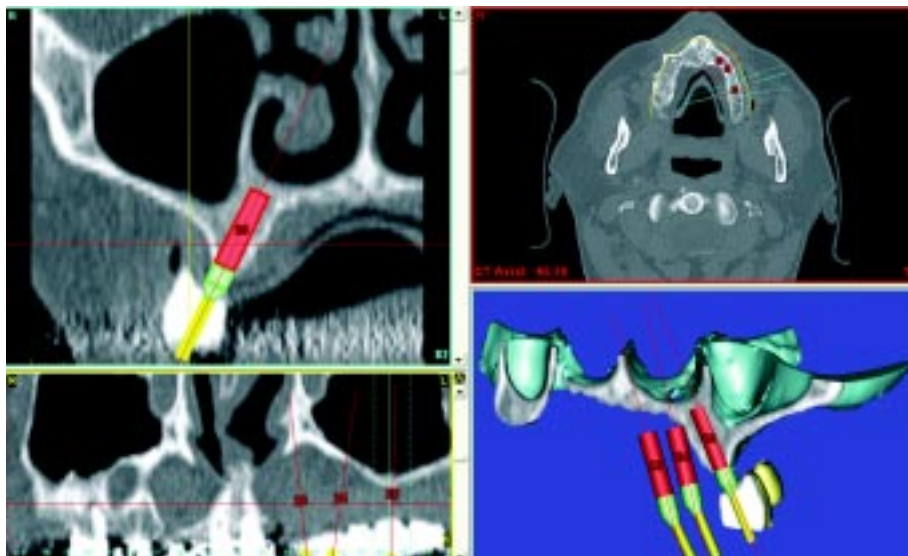


Sl. 2. Radioopačna proteza za skeniranje, narejena na osnovi pravilne postavitve zob.

Figure 2. The radiopaque scan prosthesis based on correct tooth set-up.

Proteza za skeniranje je razločno vidna na posnetkih, ki so pripravljene na osnovi reformatiranih digitalnih zapisov CT; omogoča pregledovanje idealne postavitve umetnih zob. Postavitev je pomembna za bodoči dokončni zobni nadomestek pri računalniškem načrtovanju implantatov (Sl. 3).

Radioopačni protezi je pred polimerizacijo vmešan barijev sulfat kot radioopačni označevalec ali pa so v protezno bazo vdeleni tovarniški zobje z barijevim sulfatom, npr. Vivo Tac/Ortho Tac (Ivoclar, Vivadent).^{20, 21} Bolnika je treba poučiti, da za stabilizacijo proteze med postopkom skeniranja uporabi adheziv za proteze. Na ta način se položaj, smer, dolžina in premer simuliranih implantatov in implantatnih nazidkov (analogi zobnih krnov) gibljejo znotraj meja, ki jih določa načrtovana protetična restavracija. Na splošno se izdelava radioopačne proteze razlikuje v primerih, če načrtujemo kirurško vodilo, oprto na zobeh ali na kosti, od primerov, ko je SurgiGuide pripravljen za neposredno oporo na sluznici.



Sl. 3. Reformatirani digitalni zapis CT v SimPlant programski opremi, ki kaže prečni, aksialni, panoramski in prečno prerezani tridimenzionalni pogled z implantati. Modri pravokotnik in modri črte na 2D slikah označujejo aktivni rez v območju zoba 26. Akrilatne začasne krome imajo dodan barijev sulfat in so razločno vidne na prečnem, panoramskem in tridimenzionalnem pogledu. Implantati so rdeče barve, implantatni nazidki zelene, medtem ko rumena os označuje restavrativni prostor. Horizontalna rdeča črta na prečni in panoramski sliki prikazuje višino reza na aksialnem pogledu.

Figure 3. Reformatted CT scan in SimPlant software shows coronal, axial, panoramic and cross section of 3D view with implants. Blue rectangle and blue lines on 2D images denote active cut in the region of tooth 26. The clear cold-polymerising resin of provisional crowns is mixed with barium sulfate to make teeth clearly visible on cross sectional, panoramic and 3D views. The implants are red, the abutments green while yellow axis marks restorative space. Horizontal red line in cross section and panoramic images show the height of slice on axial view.

Zajemanje digitalnega zapisa CT čeljusti

Najbolj primeren je spiralni CT (tudi helical ali volume acquisition CT), pri katerem gre za sočasno translacijsko gibanje bolnika, medtem ko vir rentgenskih žarkov kroži okrog njega. Na ta način se med skeniranjem celotnega izbranega volumna kontinuirano zajemajo podatki. Potrebno je slediti običajnemu protokolu skeniranja, toda priporočenih je še nekaj napotkov za radiologe:^{20,22}

- CT sken je potrebno narediti s pravilno vstavljenim radioopačnim fiksnim ali snemnim zobnim namdestkom.
- Vse snemne kovinske proteze in nakit, ki bi lahko motili skeniranje, je potrebno pred postopkom odstraniti.
- Bolnik naj bo pritrjen s podstavki, posebej glava. Ležati mora vznak na mizi za skeniranje.
- Nameščen naj bo udobno in se med postopkom ne sme premikati, sicer je skeniranje potrebno ponoviti. Normalno dihanje je še sprejemljivo. Bolnika je potrebno opozoriti, da med slikanjem ne požira slin, saj le-to lahko vodi k nastanku kinetičnih artefaktov.

- Pri skeniranju mora biti aksialni rez CT paralelen z okluzalno ravnino zgornjih ali spodnjih zob, odvisno od tega, ali skeniramo zgornjo ali spodnjo čeljust. Nagib gantrija je 0°.

- Optimalno je, da določimo okluzalno ravnino po pravilno vstavljeni radioopačni protezi v ustih. Če proteze ni, poravnamo glavo glede na obstoječe zobe ali pri brez zobem bolniku z ozirom na alveolarni greben.

- Pred postopkom skeniranja naredimo za usmeritev stranski posnetek, imenovan topogram (localizer, scout view).

- Težavno orientacijo lahko pred postopkom skeniranja izboljšamo tako, da naredimo stranski posnetek, imenovan Localizer, Scoutview ...

- Med skeniranjem je treba stabilizirati odnos med čeljustmi. Bolnika je priporočljivo skenirati z rahlo razklenjenimi čeljustmi. Zobozdravnik lahko vnaprej pripravi grizni blok, npr. iz odtisne mase, in nauči bolnika, kako ga je treba vstaviti pred skeniranjem.

- Prvi rez postavimo pod spodnji rob mandibule, medtem ko zadnjega umestimo nad kronami spodnjih naravnih ali radioopačnih zob; če pa zob ni, ga naravnamo nad zgornji rob zobiščnega nastavka. Na zadnjem rezu ne sme biti vidne niti kosti niti zob. Dobro je preveriti prvi rez, preden nadaljujemo s skeniranjem ali pa uporabiti referenčni rez nizkega odmerka. Tipični digitalni zapis mandibule ima 40–50 aksialnih slik debeline 1 mm z rekonstrukcijskim razmakom enega milimetra.

- Pri maksili naredimo prvi rez pod kronami zgornjih naravnih ali radioopačnih zob, če pa gre za brez zobega bolnika, ga postavimo pod spodnji rob zobiščnega nastavka. Prvi rez ne sme vsebovati niti kosti niti zob. Pomembno je, da vključimo celotno radioopačno protezo v postopek skeniranja. Zadnji rez po navadi postavimo 4–5 mm nad kostno dno nosne votline. Za implantate, ki segajo v lično kost, se mora zadnji rez postaviti na sredi orbite (sutura frontozygomatika) le po naročilu zdravnika. Tipični digitalni zapis maksile vsebuje 30–40 aksialnih slik debeline reza 1 mm in z rekonstrukcijskim presledkom 1 mm. Preverimo prvi rez, preden nadaljujemo s skeniranjem. Če na koncu po-

stopka ugotovimo, da je treba skenirati nižje, se ne vračamo nazaj in ne nadaljujemo rezov, temveč začnemo skenirati znova.

Splošna navodila za skeniranje

- Nastavitev višine mize je takšna, da je mandibula ali maksila v sredini polja skeniranja.
- Vsi rezi naj bodo rekonstruirani pod enakimi pogoji (vidno polje, postavitev rekonstrukcije, rekonstrukcijski algoritmi ...).
- Skeniranje s preširokim vidnim poljem lahko prizadene resolucijo rekonstruiranih slik. Skeniranje s premajhnim vidnim poljem lahko povzroči, da na aksialnih rezih ne prikažemo celotne mandibule.
- Za boljšo kakovost dvo- in tridimenzionalnih rekonstrukcij je smiselno uporabiti manjši rekonstrukcijski presledek, kot je debelina reza. Po navadi uporabljamo 30–50 % prekrivanja slik (primer: debelina reza 1 mm, rekonstrukcijski presledek 0,7 mm). S tem ne vplivamo na odmere pri preiskavi, omogočimo pa mnogo boljše rekonstrukcije.
- Zaželeno je, da debelina reza ni večja od 1 mm.
- Vsi naravni zobje in zobje v radioopačni protezi morajo biti v celoti vidni na slikah, in sicer vse do njihove okluzalne ravnine.

Rekonstrukcija slik

- Za rekonstrukcijo slik je potrebno uporabiti ustrezen rekonstrukcijski algoritem ali kernel. Ker nas zanimajo predvsem kostne strukture, je potrebno uporabiti rekonstrukcijski algoritem, ki okrepi robove. Ta algoritem omogoča dobro prostorsko ločljivost, ki je za prikaz skeleta izjemnega pomena. Te rekonstrukcijske algoritme imenujemo visoko kontrastni ali kostni algoritmi.
- Rekonstruiranje slike naj poteka z matrico vsaj 512×512 (priporočljivo 1024×1024) in z vidnim poljem, ki vključuje celotni zobni lok. Priporočamo vidno polje med 14,0 in 17,0 cm.
- Rabimo le aksialne slike, zato ni potrebno opraviti dodatnih rekonstrukcij slik.
- Slike je potrebno shraniti v dogovorjenem formatu na dogovorjenem mediju (optični disk, ZIP-drive, CD ...), kot je specificirano na napotnici za skeniranje. Slike odnese bolnik zobozdravniku za obdelavo s programsko opremo. Če te opreme zobozdravnik nima, lahko to delo naroči po elektronski pošti v Materialise.

Parametri skeniranja

V Razpredelnici 1 so navedeni parametri skeniranja, ki jih priporoča Materialise v svojih navodilih (Razpr. 1).²²

Konverzija digitalnega zapisa CT s programsko opremo SimPlant

Konverzija CT podatkov je možna samo s programsko opremo SimPlant Pro ali SimPlant Master, tretja programska oprema SimPlant Planner je odvisna od servisa, kjer bodo ustvarili okolje za računalniško načrtovanje.

Razpr. 1. *Parametri skeniranja: uporabljajte naslednje parametre za zajemanja digitalnega zapisa z najmanjšimi možnimi odkloni od le-teh.*²²

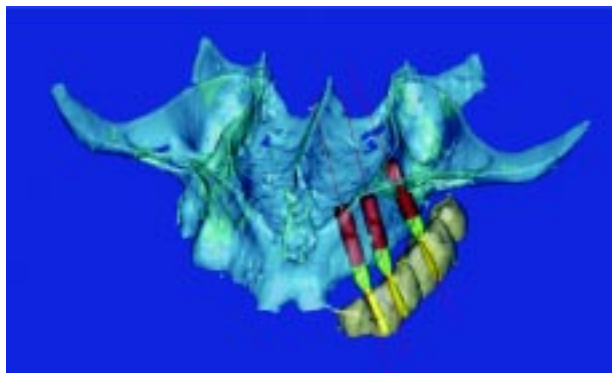
Table 1. *Scanning parameters: use the following scan parameters or the closest approximation possible.*²²

Matrica Matrix	512 × 512 (1024 × 1024)
Vidno polje (FOV) Field of view	med 140 in 170 mm between 140 and 170 mm
Debelina reza Slice thickness	1,0 mm
Premik mize na rotacijo (pitch) Feed per rotation (pitch)	1,0 mm
Rekonstrukcijski razmak Reconstructed slice increment	1,0 mm (ali 0,7) 1,0 mm (or 0.7)
Rekonstrukcijski algoritem Reconstruction algorithm	kostni bone or high resolution
Nagib gantrija Gantry tilt	0°

Tridimenzionalna računalniška simulacija s postavitvijo implantatov

Z uporabo programske opreme za natančno predoperativno načrtovanje zdravljenja dosežemo višjo raven varnosti za bolnika in manj stresen operativni postopek za terapevta. Načrtovanje z računalnikom nam omogoča optimalno postavitev implantatov v čeljustno kost ob upoštevanju bioloških danosti in estetike. Parodontolog in protetik lahko simulirata postavljanje in premikanje implantatov v treh dvodimenzionalnih pogledih (prečnem z ozirom na podolžno os zoba, panoramskem in aksialnem) ter tudi v tridimenzionalnem modelu čeljusti (Sl. 3). Iz podatkovne baze najbolj uporabljanih vrst implantatov je možno izbiranje in postavljanje njihovih tridimenzionalnih replik natančnih dimenzij. Poleg tega je edinstvena pridobitev programske opreme tudi v tem, da prikaže prozorno kost, ki omogoča operaterju natančno postavljanje implantatov v zdravo kost, ne da bi pri tem zaželevali ob vitalne anatomske strukture (Sl. 4).

V programu lahko tudi izberemo načrtovanje z avtomatskim preverjanjem gostote kosti, ustrezne razdalje med implantati in vzporednosti med njimi ter razdalje do kostne površine s postopkom fenestracije ali dehiscence. Pri delu nam izredno pomaga možnost uporabe povečav slike in premikanje po milimetrskih prečnih in vodoravnih rezih.¹⁶ Na ta način preverjamo detajle pri pozicioniranju implantata v kosti ali odnosov do sosednjih anatomskih struktur. Za koristnega pri virtualnem postavljanju se izkaže tudi zvočni signal, ki nas opozarja na premajhno varnostno razdaljo do alveolarnega, incizivnega kanala, sosednjega implantata ali na križanje osi implantatnih nazidkov v restavrativnem prostoru. Po opravljenem postopku segmentacije lahko prikažemo ali skrijemo posamezne segmente dentoalveolarnega sistema (zobe, krone ali bazo radioopačne proteze, čeljustno kost, alveolarni ali incizivni kanal in implantate) in tako omogočimo preglednost operativnega področja z različnih strani. Vrtine, izvrtane v sredino kron radioopač-

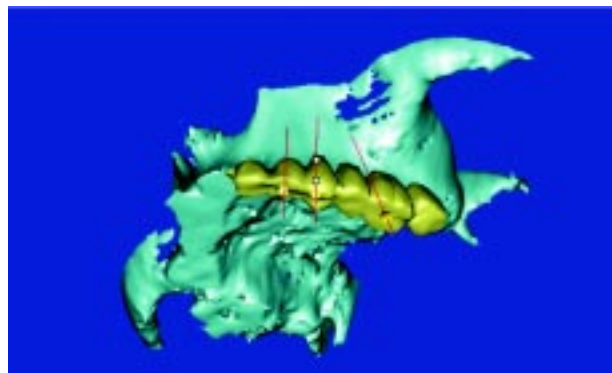


Sl. 4. Tridimenzionalni pogled v transparentnem načinu za kostno tkivo med simulacijo postavitve implantatov. Parodontolog in protetik določita dolžino in smer implantatov (rdeče) in implantatnih nazidkov (zeleno). Rumena os, ki se podaljšuje v radioopačne krone, je pomembna za biomehaniko in estetiko končne izdelka.

Figure 4. 3D view in transparent mode for bone during implant positioning simulation. Periodontist and prosthodontist determine the length and direction of implants (red) and abutments (green). Yellow axis perforating a radiopaque crown is important to biomechanics and aesthetic of definitive prosthesis.

ne proteze, vodijo do mesta na kosti z optimalnim položajem implantata s stališča estetike in biomehanike. Vrtine, ki so vidne v vestibulooralnih in meziodistalnih prerezih radioopačne proteze, služijo protetiku in operaterju pri odločanju o morebitni uporabi kotnih implantatnih nazidkov (abutment) ali kompromisni minimalni spremembi smeri, položaja, dolžine in/ali premera implantata oz. o povečanju dela resorbirane alveolarne kosti npr. z vodeno kostno regeneracijo na mestih, kjer je potrebno prekrivanje razgaljenih navojev implantata. Sprememba pogleda z dvodimenzionalnih slik na tridimenzionalni model nam omogoča orientacijo o preboju podolžne osi implantata na kronskega delu suprastrukture, kar prispeva pri vrednotenju še primerne kota med krono in implantatom ali pa sproži potrebo po korekciji položaja implantata ali implantatnega nazidka, če je le-ta možna (Sl. 5).

Optimalna biomehanika zagotavlja aksialno obremenjevanje tako implantata kakor tudi protetične suprastrukture v razpoložljivi kosti.²³ Ko zaključimo z računalniškim virtualnim načrtovanjem in shranimo datoteko, imamo na razpolago tudi natančen popis potreb za pravočasno naročanje delov implantata za operativni poseg, računalniško vodeno kirurško vodilo in morebiti tudi takojšnjo izdelavo protetične suprastrukture, če gre za takojšnjo obremenitev (immediate loading). Nadaljnji postopek je naročanje kirurškega vodila pri Materialise s pravilno izpolnjenim naročilom, v katerem je pomembno opisati tip in dimenzije implantata, s katerim delamo, zaporedje uporabljenih svedrov, predvsem premer in tip, ter način nasona vodila (na kost, na obstoječe zobe ali na sluznico čeljusti).



Sl. 5. Izbira tridimenzionalnega pogleda čeljusti in selektivni prikaz posameznih segmentov z možnostjo rotacije olajšujeta odločitev za najboljše mesto vsaditve v razpoložljivi kosti in optimalne elemente protetične suprastrukture.

Figure 5. Choosing 3D view of the jaw and selection of single segments with possibility of rotation, make easier decision of the best site for implant placement in available bone and optimal elements for prosthetic suprastructure.

Izdelava stereolitografskega vodila SurgiGuide in metoda statične navigacije

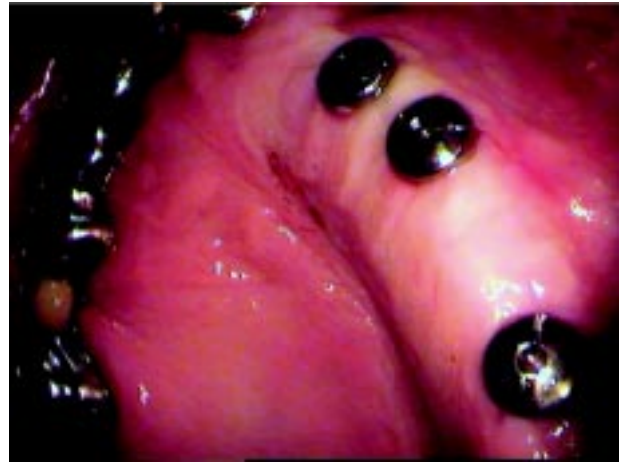
V tej fazi se v podjetju Materialise s strojem za hitro izdelavo prototipov po načelu stereolitografije izdelajo stereolitografski modeli. Stereolitografijo lahko uporabljajo za natančno modeliranje različnih delov človeškega telesa. Postopek je zelo podoben tistemu pri CT skenerju, kjer se neki anatomske predel telesa razreže po pravilnih presledkih. Stereolitografske modele izdelajo plast za plastjo. Optični sistem za skeniranje usmerja laser, ki izriše sliko v raztopino akrilata po eno milimetrsko plast naenkrat. Laser polimerizira površinsko plast akrilata ob kontaktu. Za čeljustne modele so dosegli natančnost pod 1 mm.²⁴ Po polimerizaciji prve plasti modela se mehanična mizica, ki leži takoj pod površino, premakne navzdol za 1 mm in pri tem pomakne prej fotopolimerizirano plast akrilata s seboj. Laser potem polimerizira naslednjo plast tekočega akrilata, ki se nahaja nad predhodno že strjeno plastjo. Tako je mogoče ustvariti celotni SL model bolnikove čeljusti. Postopek polimerizacije ni popolnoma zaključen v posodi s tekočim akrilatom, zato je potrebno preostalih približno 20 % fotopolimerizirati z enoto, ki seva ultravijolično svetlobo.²⁰ Tudi kirurško vodilo za vodenje svedra izdelajo na podoben način. Naredijo ga po površinski kostni anatomiji SL modela, s katerim je povezan preko vrste majhnih trikotnikov, ki jih potem odstranijo na koncu procesa izdelave. SL stroj prebere premer in smer virtualno postavljenega implantata tudi nad ravnijo kosti ter selektivno polimerizira akrilat okrog njega, pri čemer oblikuje cilindrično ploščico, ki se nahaja nad vsakim



Sl. 6. Na levi strani je stereolitografski model bolnikove zgornje čeljusti, ki je delno brezzoba na levi polovici. Desno sta stereolitografski vodili, ki s kovinskimi obročki različnih premerov natančno usmerjata svedre pri osteotomiji.

Figure 6. On the left there is a stereolithographic model of partially edentulous left site maxilla. On the right there are two stereolithographic guides which direct drills by osteotomy using metal cylinders of different diameters.

implantatom. Zobotehnik odstrani podporne akrilatne trikotnike in vstavi potem še nerjaveče jeklene obročke v cilindrične ploščice. Tako nastanejo kirurška vodila SurgiGuide, ki ležijo neposredno na kosti z nerjavečimi jeklenimi cevkami za vodenje svedra, ki glede na lego ustrezajo posameznim načrtovanim implantatom (Sl. 6). Jeklene cevke so 5 mm visoke in za 0,2–0,3 mm širše v notranjem premeru, kot je sveder za osteotomijo. Po navadi sta potrebni 2 kirurški vodili, za vsak premer svedra posebno vodilo. Te mere omejujejo deviacijo smeri implantata na manj kot 5° .^{20,22} Če primerjamo natančnost vstavitve implantatov med konvencionalnimi vodili in SL vodili, so slednji izrazito bolj natančni.²⁵ Kirurško vodilo na osnovi virtualnega načrta v programski opremi prenese v ustno votlino natančno globino, smer ter meziodistalni in vestibulooralni položaj vsakega implantata, s čimer se izboljša natančnost vsaditve. Na vestibularni strani vodila je ob vsaki kovinski cevki tudi odprtina za iztok fiziološke tekočine, ki služi med vrtnjem za zunanje ohlajanje svedra z irigacijo. Vodilo je mogoče sterilizirati z uporabo standardnih metod sterilizacije, razen s toploto suhega sterilizatorja in avtoklava. Pred operativnim posegom je primerno preveriti stabilnost vodila na SL modelu za kostno oprti SurgiGuide ali na mavčnem modelu, če gre za na sluznici ali zobeh oprto SL vodilo. Prileganje mora biti natančno in samo v enem položaju. Še enkrat je potrebno preveriti razdalje do anatomskih orientacijskih točk, npr. do sosednjih zob, mentalnega foramna in mesto ter smer kovinskih obročkov. Če smo zadovoljni s prenosom virtualnega načrta na bolnika, se lahko vodila sterilizirajo in potrdi termin operacije. Klasični pristop je dvig mukoperiostalnega režnja in prilagoditev prvega SL vodila za dvomilimetrski spiralni sveder. Paziti je treba, da režnenj ne moti natančne postavitev



Sl. 7. Stanje 6 mesecev po operaciji in osteointegraciji implantata. Implantati so pokriti z vijaki za celjenje.

Figure 7. Subject status six months after surgery and osseointegration of implants. The implants are covered with healing screws.



Sl. 8. Prikazana je dokončna fiksno protetična oskrba bolnikove zgornje čeljusti.

Figure 8. There are definitive bridges in patient's maxilla.

kirurškega vodila. Drugo SL vodilo, ki je namenjeno širšemu premeru svedra za osteotomijo, se uporablja na podoben način. Novejši sistemi (SAFE) imajo samo eno vodilo, v katerem se menjujejo le notranje jeklene cevke različnih dimenzij in imajo predvidene posebne svedre, ki so opremljeni z naslonom po analogiji stoperjev na endodontskih iglah. Vodilo se sname šele po končni vsaditvi implantata. Ko so implantati vsajeni, sledimo konvencionalnemu protokolu, ki je odvisen od vrste uporabljenega implantatnega sistema (Sl. 7, Sl. 8).

Razpravljanje

S hitrim napredkom računalniške tehnologije je danes mogoče izboljšati načrtovanje kirurških posegov v tridimenzionalnem prostoru navidezne resničnosti

ne le v različnih vejah medicine, temveč tudi v dentalni medicini.²⁶⁻²⁸ Transparentni SL-modeli čeljustnih kosti omogočajo operaterju, da tudi fizično drži, pregleduje in ravna z natančno anatomsko kopijo bolnikove čeljusti pred operativnim posegom ter si s tem izboljšuje prostorsko predstavo in pridobiva prednosti pri načrtovanju zdravljenja. Uporaba metode navigacije lahko prinaša koristi s skrajšanjem operacijskega časa, večjo natančnostjo pri vsaditvi implantatov in lažjo protetično oskrbo, kar predstavlja višjo kakovost dela za parodontologa, protetika in zobotehnični laboratorij.^{25, 28-30} Gotovo pa so še potrebne nadaljnje raziskave glede ocene natančnosti in klinične uporabnosti sistemov.

Računalniška tomografija je najbolj zanesljiv in natančen način slikanja za predoperativno oceno mesta postavitve implantata. V prihodnosti je z razvojem CT in optimizacijo programske opreme pričakovati zmanjšanje hib, ki se kažejo kot artefakti zaradi odboja rtg žarkov od kovinskih zobnih restavracij ter visoka sevalna doza za kostni mozeg, žlezo ščitnico, slinavke, oči in kožo.⁶ Razvoj večrezne spiralne CT tehnologije (multi-slice) z ločljivostjo pod enim milimetrom je omogočil virtualno tridimenzionalno predstavitev čeljustnih kosti v vseh treh dimenzijah. Čeprav raven detajlov ostaja znatno pod intraoralnimi slikami, napredovanje v CT tehnologiji zadošča skoraj vsem tehničnim in morebiti tudi diagnostičnim slikovnim potrebam parodontologije.³¹⁻³³

S tridimenzionalno programsko opremo (za digitalni zapis CT pri načrtovanju zobnih implantatov), SL kirurškim vodilom in končnim protetičnim izdelkom, narejenim že predoperativno, se lahko natančno prenese načrt rehabilitacije z implantati na operativno polje in takoj rigidno poveže komaj vstavljene implantate.²⁹ Kot je pokazala multicentrična študija, je metoda takojšnje obremenitve implantatov zanesljiv postopek zdravljenja, če so uporabljali modele na osnovi tridimenzionalne programske opreme za načrtovanje implantatov in prefabricirana SL kirurška vodila oprta na sluznici ter zobno protezo za takojšnjo obremenitev.³⁴ Računalniško vodena implantologija je danes zanesljivo našla svoje mesto v dentalni medicini in je primerna metoda za načrtovanje zahtevnih primerov, a tudi za razširitev terapevtskega spektra v gerontologiji za različne klinične primere.⁵

Zaključki

Najpomembnejši vidiki računalniško podprtega zdravljenja v implantologiji so natančna diagnoza, načrt zdravljenja, ki omogoča optimalen in zanesljiv izid implantnoproetične oskrbe ter zadovoljstvo bolnika. Z uporabo programske opreme za natančno predoperativno načrtovanje zdravljenja dosežemo višjo raven varnosti za bolnika in manj stresen operativni postopek za terapevta. Računalniško načrtovanje omogoča idealno postavitev implantatov v čeljustno kost ob upoštevanju bioloških danosti kakor tudi estetike. Statična metoda navigacije s stereolitografskim kirurškim vodilom je primerna pri delni ali popolni brezzobosti oz. za fiksno- in snemnoimplantatnoproetično oskrbo.

Digitalni zapis CT nudi več informacij in možnosti na račun relativno večje doze absorbiranega sevanja ter tudi višje cene. Vendar je pri rehabilitaciji z implantati v čeljustni kosti sistemsko ali lokalno zdravstveno prizadetih bolnikov digitalni zapis tridimenzionalne CT upravičen. Rentgenska preiskava kirurškega področja za računalniško vodeno načrtovanje vsajanja implantatov je zaradi visokih stroškov priporočljiva, kadar potrebujemo največ informacije na mestu načrtovane implantacije.

Literatura

- Adell R, Eriksson B, Lekholm U, Branemark PI, Jemt T. Long-term follow-up study of osseointegrated implants in the treatment of totally edentulous jaws. *Int J Oral Maxillofac Implants* 1990; 5: 347-59.
- Rode M, Marion L, Kogoj-Rode M. Izkušnje z enosealnimi dentalnimi implantati. *Zobozdrav Vestn* 1995; 50: 196-9.
- Žerdoner D, Rode M. Uporaba dentalnih implantatov F-2 (FRATEC) v protetični rehabilitaciji. *Zdrav Vestn* 1997; 66: 433-4.
- Ihan-Hren N, Gorjanc M, Kansky AA. Uspešnost vsadkov v brez-zobih čeljustih. *Zobozdrav Vestn* 2002; 57: 9-14.
- Mericske-Stern R. Ist Alter eine Barriere für Implantate? Eine kurze Übersicht. *Quintessenz* 2006; 57: 23-32.
- Jacobs R, van Steenberghe D. Radiographic planning and assessment of endosseous oral implant, 1st ed. Berlin: Springer-Verlag, 1998.
- Marion L, Rode M, Knez H. Načrtovanje implantno-protetične oskrbe. *Zobozdrav Vestn* 1995; 50: 191-5.
- Jacobs R. Preoperative radiologic planning of implant surgery in compromised patients. *Periodontol* 2003; 33: 12-25.
- Jabero M, Sarment DP. Advanced surgical guidance technology: a review. *Implant Dent* 2006; 15: 135-42.
- Sotošek B. Nekateri novejši rentgenske slikovne metode v maksilofacialnem področju. *Zobozdrav Vestn* 1988; 43: 129-32.
- Longar M, Fidler A. Računalniška tomografija in klasične rentgenske preiskave v stomatologiji. *Zobozdrav Vestn* 2004; 59: 45-51.
- Hatcher DC, Dial C, Mayorga C. Cone beam CT for pre-surgical assessment of implant sites. *J Calif Dent Assoc* 2003; 31: 825-33.
- Araki K, Maki K, Seki K, Sakamaki K, Harata Y, Sakaino R, Okano T, Seo K. Characteristics of a newly developed dentomaxillofacial X-ray cone beam CT scanner (CB MercuRay): system configuration and physical properties. *Dentomaxillofac Radiol* 2004; 33: 51-9.
- Loubele M, Maes F, Schutyser F, Marchal G, Jacobs R, Suetens P. Assessment of bone segmentation quality of cone-beam CT versus multislice spiral CT: a pilot study. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2006; 102: 225-34.
- Allen F, Smith DG. An assessment of the accuracy of ridge-mapping in planning implant therapy for the anterior maxilla. *Clin Oral Implants Res* 2000; 11: 34-8.
- Jacobs H, Adriansens A, Verstreken K, Suetens P, Van Steenberghe D. Predictability of a three-dimensional planning system for oral implant surgery. *Dentomaxillofac Radiology* 1999; 28: 105-11.
- Dixon DR, Morgan R, Hollender LG, Roberts FA, O'Neal RB. Clinical application of spiral tomography in anterior implant placement: case report. *J Periodontol* 2002; 73: 1202-9.
- Šurlan-Popovič K. Radiološka diagnostika cist. In: Ihan-Hren N, ed. Ciste v čeljustih. Zbornik predavanj 11. Čelešnikovi dnevi, 6. strokovni seminar; 2004 Nov 27; Ljubljana. Ljubljana: Klinični center, Klinični oddelek za maksilofacialno in oralno kirurgijo, 2004; 7-9.
- Caldwell CS. Practical incorporation of computed tomography into daily implant treatment planning. *Tex Dent J* 2005; 122: 343-54.
- Lal K, White GS, Morea DN, Wright RF. Use of stereolithographic templates for surgical and prosthodontic implant planning and placement. Part I. The concept. *J Prosthodont* 2006; 15: 51-8.

21. Al-Faraje L. The benefits of computer-guided implantology & SurgiGuides in treating patients with advanced alveolar bone resorption. *Materialise Head Lines* 2003; 5: 1-3. Dosegljivo na: <http://WWW.MATERIALISE.COM>
22. Anonymous. The SimPlant and SurgiGuide Process. *Materialise Medical* 1-25. Dosegljivo na: <http://WWW.MATERIALISE.COM>
23. Van Steenberghe D, Naert I, Jacobs R, Quirynen M. Influence of inflammatory reactions vs. occlusal loading on peri-implant marginal bone level. *Adv Dent Res* 1999; 13: 130-5.
24. Smet MH. Three-dimensional skeletal visualisation with spiral computed tomography. *J Belge Radiol* 1998; 81: 23.
25. Sarment DP, Sukovic P, Clinthorne N. Accuracy of implant placement with a stereolithographic surgical guide. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2003; 18: 571-7.
26. Sojar V, Stanisavljevič D, Hribnik M, Glušič M, Kreuh D, Velkavrh U, Fius T. Načrtovanje kirurških posegov na jetrih v 3D prostoru navidezne resničnosti. In: Repše S, Stanisavljevič D, eds. *Zbornik simpozija Kirurgija jeter in vranice*; 2004; Ljubljana. Ljubljana: Kirurška šola, Klinični oddelek za abdominalno kirurgijo, 2004; 14-23.
27. Tardieu PB, Vrielinck L, Escolano E. Computer-assisted implant placement. A case report: treatment of the mandible. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2003; 18: 599-604.
28. Mischkowski RA, Zinser MJ, Neugebauer J, Kubler AC, Zoller JE. Comparison of static and dynamic computer-assisted guidance methods in implantology. *Int J Comput Dent* 2006; 9: 23-35.
29. Held U, Metzger M, Schmelzeisen R. Das »Teeth-in-an-Hour«-Konzept eine Fallpräsentation. *Quintessenz* 2005; 56: 1105-9.
30. Luckey R. Implantatpositionierung mit dem Navigationssystem RoboDent in der Oberkieferprämolarregion eine retrospektive Analyse. *Quintessenz* 2006; 57: 229-37.
31. Pistorius A, Patrosio C, Willershausen B, Mildenerberger P, Rippen G. Periodontal probing in comparison to diagnosis by CT-scan. *Int Dent J* 2001; 51: 339-47.
32. Mol A. Imaging methods in periodontology. *Periodontol* 2004; 34: 34-48.
33. Götte H. Implantate: Kugeln zur Lokalisierung von Schnittebenen für transversale Schichtaufnahmen. *Quintessenz* 2006; 57: 773-8.
34. Van Steenberghe D, Glauser R, Blomback U, Andersson M, Schutyser F, Pettersson A, Wendelhag I. A computed tomographic scan-derived customized surgical template and fixed prosthesis for flapless surgery and immediate loading of implants in fully edentulous maxillae: a prospective multicenter study. *Clin Implant Dent Relat Res* 2005; 7 Suppl 1: 111-20.

Prispelo 2006-09-26, sprejeto 2007-04-12