

ABSTRACT

Planlægningen af ortodontisk kirurgi har udviklet sig fra gipsmodeller indstøbt i artikulatør og konventionel 2d-planlægning foretaget på lateralcefalogrammer til virtuel behandlingsplanlægning med 3d-print af kirurgiske guider og patientspecifikke osteosynteseplader. Forskning har vist, at den virtuelle planlægning er favorabel baseret på forbedret kirurgisk præcision og peroperativ effektivisering. Derfor er virtuel planlægning i dag det foretrukne valg til ortodontisk-kirurgisk behandlingsplanlægning. Denne artikel beskriver trinvis et digitalt workflow for ortodontisk-kirurgisk behandlingsplanlægning frem til print af patientspecifikke osteosynteseplader. Hvert trin er kort beskrevet og illustreret ved hjælp af data fra et patienttilfælde. Forståelsen af de enkelte trin i den virtuelle planlægning er essentiel for at minimere fejl og dermed opnå et forudsigeligt og præcist kirurgisk resultat.

EMNEORD Orthognathic surgery | computer-assisted surgery | three-dimensional imaging



Korrespondanceansvarlig førsteforfatter:
MICHAEL BOELSTOFT HOLTE
Michael.Boelstoft.Holte@rsyd.dk

Digitalt workflow i ortodontisk-kirurgisk behandlingsplanlægning

MICHAEL BOELSTOFT HOLTE, udviklingschef, lektor, civilingeniør, ph.d., Kæbekirurgisk Afdeling, Sydvestjysk Sygehus Esbjerg, Syddansk Universitetshospital, 3D-Laboratoriet, Sydvestjysk Sygehus Esbjerg, Syddansk Universitetshospital, og Institut for Regional Sundhedsforskning, Det Sundhedsvidenskabelige Fakultet, Syddansk Universitet

KRISTIAN THESBJERG, overtandlæge, specialtandlæge i tand-, mund- og kæbekirurgi, Kæbekirurgisk Afdeling, Sydvestjysk Sygehus Esbjerg, Syddansk Universitetshospital

JENS JØRGEN THORN, ledende overtandlæge, specialtandlæge i tand-, mund- og kæbekirurgi, ph.d., Kæbekirurgisk Afdeling, Sydvestjysk Sygehus Esbjerg, Syddansk Universitetshospital

► Accepteret til publikation den 12. april 2021

Tandlægebladet 2021;125:xxx-xxx

DEN VIRTUELLE KIRURGISKE BEHANDLINGSPLANLÆGNING (VSP) er et effektivt arbejdsredskab i behandlingen af vækstbettinget kæbeanomali for at imødekomme behandlingens tre overordnede mål: 1) at normalisere okklusionen, 2) at harmonisere ansigtsfysiognomien og 3) at tilgodese luftvejene (1). Med den avancerede 3d-billeddiagnostik er det blevet nemmere for

behandlerne at overføre de kliniske observationer til en korrekt diagnostik. Herved kan behandlingsplanlægningen med større forudsigelighed og præcision skabe grundlaget for et optimalt funktionelt og harmonisk resultat. VSP benytter computersimuleringer til præoperativ behandlingsplanlægning og anvendes i dag rutinemæssigt på alle de danske kæbekirurgiske afdelinger. Arbejdsgangene er principielt de samme, hvad enten de foretages in-house eller i samarbejde med kommercielle udbydere med eget software og egne IT-ingeniører. Der vil i det følgende i korte træk blive gjort rede for det digitale workflow fra optagelse af de rette data i den indledende fase, den virtuelle behandlingsplanlægning, og til sammenligning imellem det planlagte og det opnåede resultat.

Nødvendige data



Fig. 1. Eksempel på nogle af de nødvendige data til den virtuelle planlægning af ortognathic kirurgisk behandling af et patienttilfælde. Fotos og CBCT i naturlig hovedholdning.

Fig. 1. Example of some of the required data for the virtual planning of orthognathic surgical treatment. Clinical photos and CBCT in natural head position.

Teknologien erstatter på ingen måde den tilgrundliggende objektive kliniske undersøgelse, de aftalte mål for behandlingen, herunder patientens behov, det gennemførte ortodontiske forarbejde, den kirurgiske erfaring og finesse i udførelse samt den fælles forståelse i det følgende samarbejde imellem patient og behandlere. 3d-teknologien er et hjælpemiddel i behandlingsplanlægningen, og anvendt korrekt er der mulighed for at optimere planlægningen og dermed opnå et mere forudsigeligt og præcist resultat. Brugen af de virtuelle teknikker har en stejl læringskurve, og en standardisering af de enkelte trin i processen er nødvendig, således at der ikke akkumuleres fejl i den endelige plan (2-4).

Arbejdsgangene i den virtuelle planlægning er:

1. Optagelse af de korrekte data af skelet, tænder, okklusion og blødtvæv.
2. Databehandling.
3. Orientering i tre dimensioner.
4. Planlægning af den ønskede ændring og virtuel simulering af de kirurgiske trin.
5. 3d-print af de ønskede kirurgiske guider til okklusion, osteotomi og planlagt position samt eventuelt print af patientspecifikke osteosynteseplader.

6. Virtuel sammenligning og kontrol af det planlagte og det udførte.
7. Slut evaluering efter endt behandling.

Digitalt workflow

I det følgende er det digitale workflow for virtuel planlægning af ortodontisk-kirurgisk behandling beskrevet trin for trin. En række kommercielle software er tilgængelige til dette formål. I denne beskrivelse er Materialise Mimics®, Materialise 3-matic® og Patterson Dolphin Imaging® anvendt.

1. Dataopsamling

Til den digitale 3d-planlægning af behandlingen skal der foretages kranial Cone Beam Computed Tomography (CBCT)-scanning med patienten i naturlig hovedholdning (5) og med kæbeledene i centric relation, defineret ved hjælp af et vokssammenbid. Der skal foreligge kliniske fotos af ansigtet i naturlig hovedholdning og okklusionen fra forskellige vinkler samt intraorale scanninger af den prækirurgiske og den planlagte ok-

klusion. Fig. 1 viser eksempler på de nødvendige data til det digitale workflow.

2. Databehandling

De rå data i form af den præoperative CBCT-scanning og den 3d-overfladescannede prækirurgiske og planlagte okklusion skal forarbejdes for at kunne generere en 3d-model af patientens kranie- og kæbeparti samt tandforhold/okklusion. Først isoleres kranie- og kæbeknogle i CBCT-scanningen vha. billedbehandling (billedsegmentering) og rekonstrueres i 3d (Fig. 2A). Det segmenterede 3d-kranieobjekt deles i underkæbe og øvre kranie, indeholdende overkæben (Fig. 2B). Intraorale scanninger af tænder og den prækirurgiske okklusion superponeres med tænder og okklusion i den rekonstruerede opdelte 3d-model af kranie og kæber. (Fig. 2C). Det er også muligt på tilsvarende vis at segmentere ansigtets bløddele, så en 3d-model kan rekonstrueres til prædiktion af bløddelsforandringer i forbindelse med de planlagte kæbeflytninger (Fig. 3). Dette er dog endnu ikke så nøjagtigt som simuleringen af hårdtvævsflytningerne.

3d-rekonstruktion af knogle og tænder

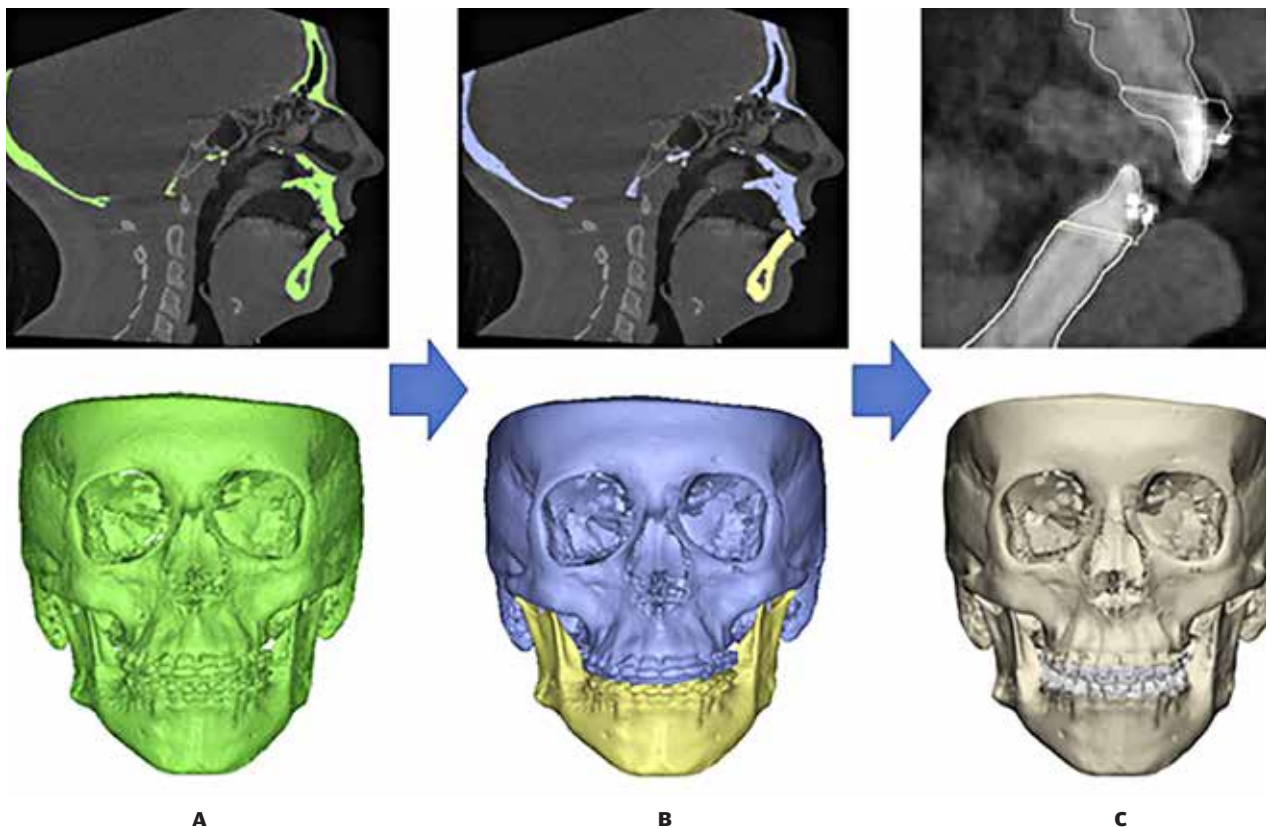


Fig. 2. Figuren viser de enkelte trin i 3d-rekonstruktionen af knogle og tænder: **A)** Segmentering af kranie- og kæbeknogle, **B)** opdeling af 3d-objektet i underkæbe og øvre kranie (indeholdende overkæben) samt **C)** kombineret af 3d-kranieobjektet med 3d-overfladescanning af den prækirurgiske okklusion.

Fig. 2. The figure shows the steps involved in the 3D reconstruction of the bone and teeth: **A)** segmentation of the cranial- and jawbone, **B)** dividing the 3D object into the mandible and the upper skull (including the maxilla), and **C)** fusing the 3D skull and the 3D surface scan of the presurgical occlusion.

3. Orientering i de tre dimensioner

Inden den virtuelle planlægning foretages, er det helt essentielt, at 3d-kranieobjektet orienteres i patientens naturlige hovedholdning i de tre planer, x-, y- og z-akse (Fig. 4). Dette indebærer analyse og replikering af hovedholdningen ved at rotere 3d-objektet (eller koordinatsystemet) i henhold til de kliniske mål og fotos af patientens ansigt og okklusion. Denne del af processen har afgørende betydning for de kirurgiske flytninger og for, at der opnås symmetrisk og harmonisk ansigtsfysiognomi.

4. Virtuel planlægning

Den planlagte kæbeoperation simuleres ved hjælp af virtuelle flytninger. For at muliggøre dette udføres virtuelle osteotomier (Fig. 5A), der opdeler kæbeknoglen i de ønskede segmenter, fx dobbelt kæbeoperation i form af LeFort I-osteotomi med eller uden deling og Bilateral Sagittal Split Osteotomy (BSSO) samt en hageosteotomi (Fig. 5B). For måling af flytninger kan der indsættes anatomiske landmærker på de flytbare dele (Fig. 5C). VSP foregår først ved flytning af de tandbærende dele til den planlagte okklusion. De tandbærende dele superponeres i okklusionen, og de respektive knoglesegmenter flyttes (Fig. 5D). Denne proces kaldes ofte "piggybacking". Med okklusionen som udgangspunkt kan patientens fysiognomi og ansigts-symmetri forbedres via kæbeflytninger i de tre planer til en position, der er i overensstemmelse med de forventninger, som patienten og klinikerne har afstemt. Fig. 6 viser et eksempel på den virtuelle planlægning med præ- og postoperative målinger. I artiklen "Schwartz K, Holte MB, Ingerslev J. Virtuel planlægning ved ortodontisk kirurgisk behandling af asymmetrier" præsenteres en konkret virtuel behandlingsplan trinvis (6).

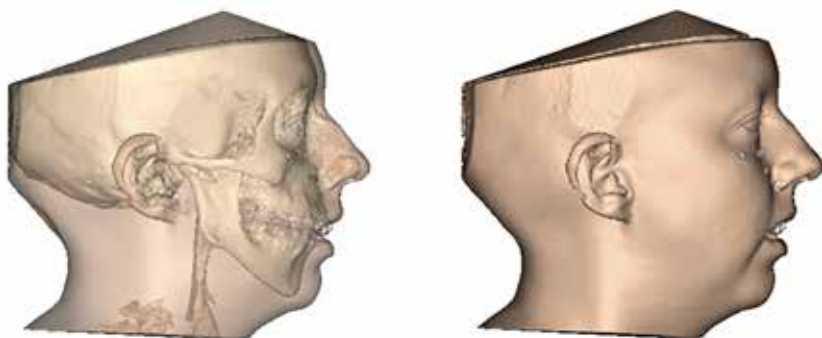
5. 3d-print af kirurgiske guider og osteosynteseplader

Når VSP er gennemført, kan kirurgiske guider i form af mellembid samt evt. bore-/skæreguider og patientspecifikke osteosynteseplader designes og fremstilles ved hjælp af 3d-print. Fig. 7 viser eksempler på intermediært mellembid samt en osteotomiguide til en hageosteotomi.

3d-rekonstruktion af bløddele



Fig. 3. Figuren viser, hvordan bløddelene rekonstrueres i 3D.
Fig. 3. The figure shows how the soft tissue is reconstructed in 3D.



klinisk relevans

Virtuel planlægning af ortodontisk-kirurgisk behandling bør følge en rationel planlægningsprotokol (digitalt workflow). Det kirurgiske resultat er en kombination af den virtuelle planlægning og kirurgens erfaring. Forståelse af de enkelte trin i den virtuelle behandlingsplanlægning er vigtig for at minimere planlægnings- og kirurgiske fejl og dermed forbedre præcisionen og det kirurgiske resultat.

Orientering i de tre planer

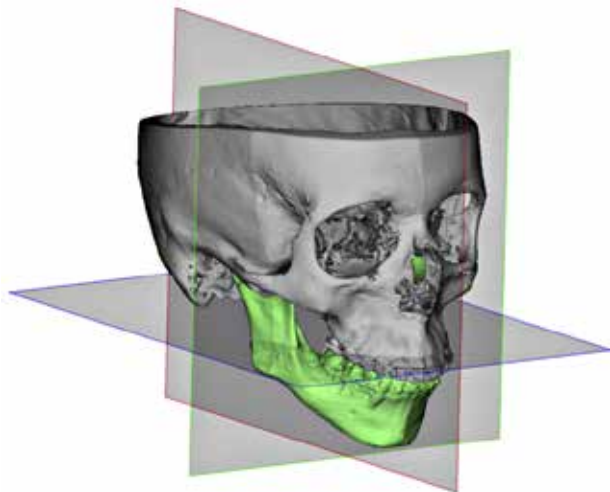


Fig. 4. Orientering af kranieobjektet i de tre planer.
Fig. 4. Orientation of the skull in the three planes.

De virtuelle osteotomier

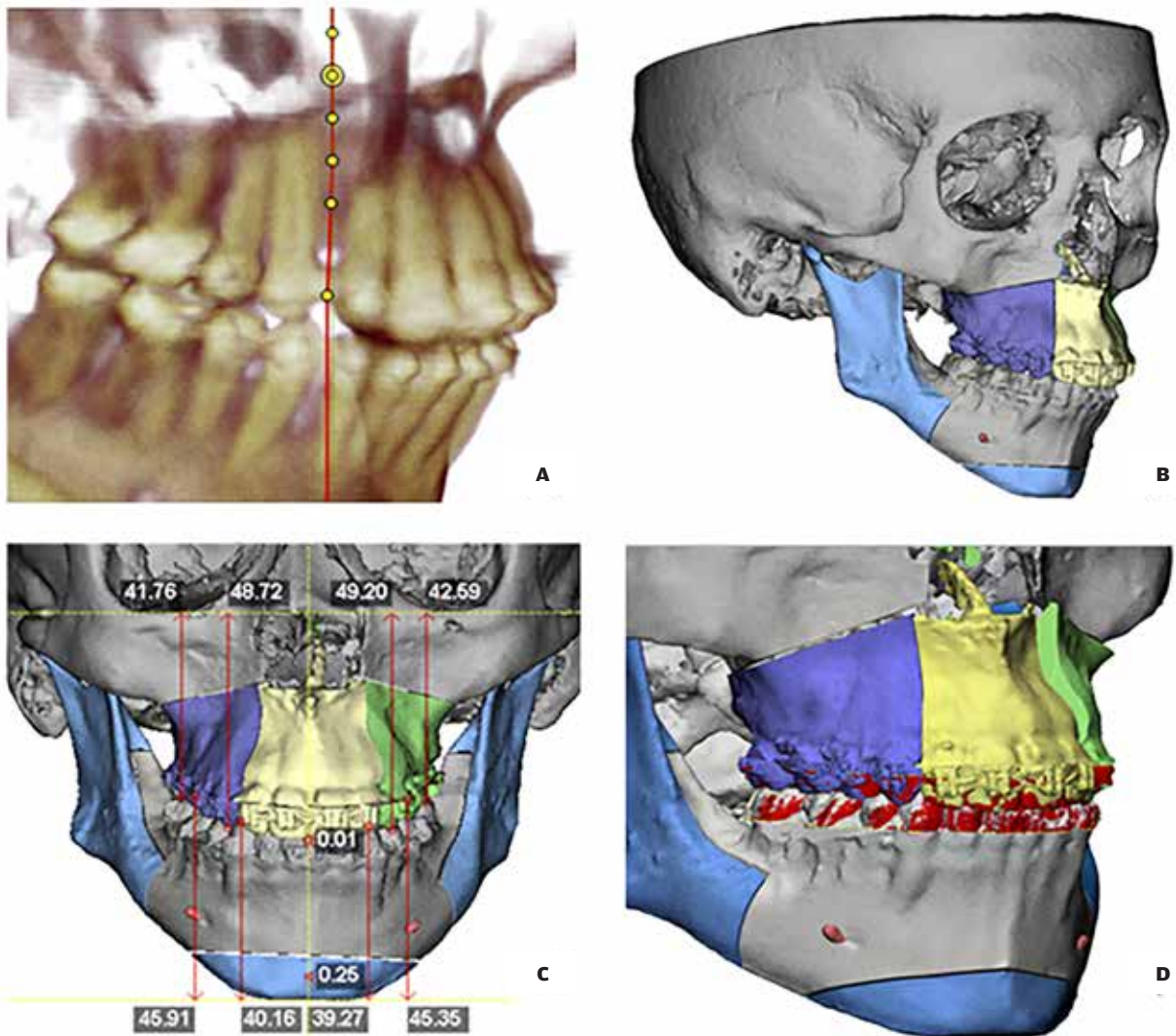


Fig. 5. Figuren viser **A-B)**, hvordan virtuelle osteotomier planlægges og udføres, **C)** hvordan anatomiske landmærker placeres til måling af symmetri og knogleflytninger, samt **D)** hvordan den intraorale scanning af den ønskede okklusion kan anvendes til at bestemme den virtuelle okklusion.

Fig. 5. The figure **A-B)** shows how virtual osteotomies are planned and executed, **C)** how anatomic landmarks are placed for measuring symmetry and bony movements, and **D)** how the intraoral scan of the desired occlusion can be used for establishing the virtual occlusion.

6. Kvalitetskontrol

Ved optagelse af postoperativ CBCT-scanning af patienten er det muligt virtuelt at kontrollere den udførte kirurgi ved sammenligning med det planlagte (Fig. 8). Denne mulighed er på nuværende tidspunkt begrænset i de eksisterende kommercielle planlægningsprogrammer.

7. Slutevaluering

Efter afsluttet behandling giver yderligere CBCT-scanning og 3d-teknikkerne en unik mulighed for at evaluere stabiliteten

af det endelige resultat efter afsluttet ortodontisk behandling og efter en passende retentionsperiode (Fig. 9).

DISKUSSION

I denne artikel præsenteres et digitalt workflow for virtuel ortodontisk-kirurgisk behandlingsplanlægning samt diskussion og perspektivering af VSP. De kommercielle planlægningsprogrammer følger overordnet set det præsenterede workflow.

Planlægningen af ortodontisk-kirurgisk behandling har gennemgået en revolutionerende udvikling de seneste 10 år (7).

Virtuel planlægning

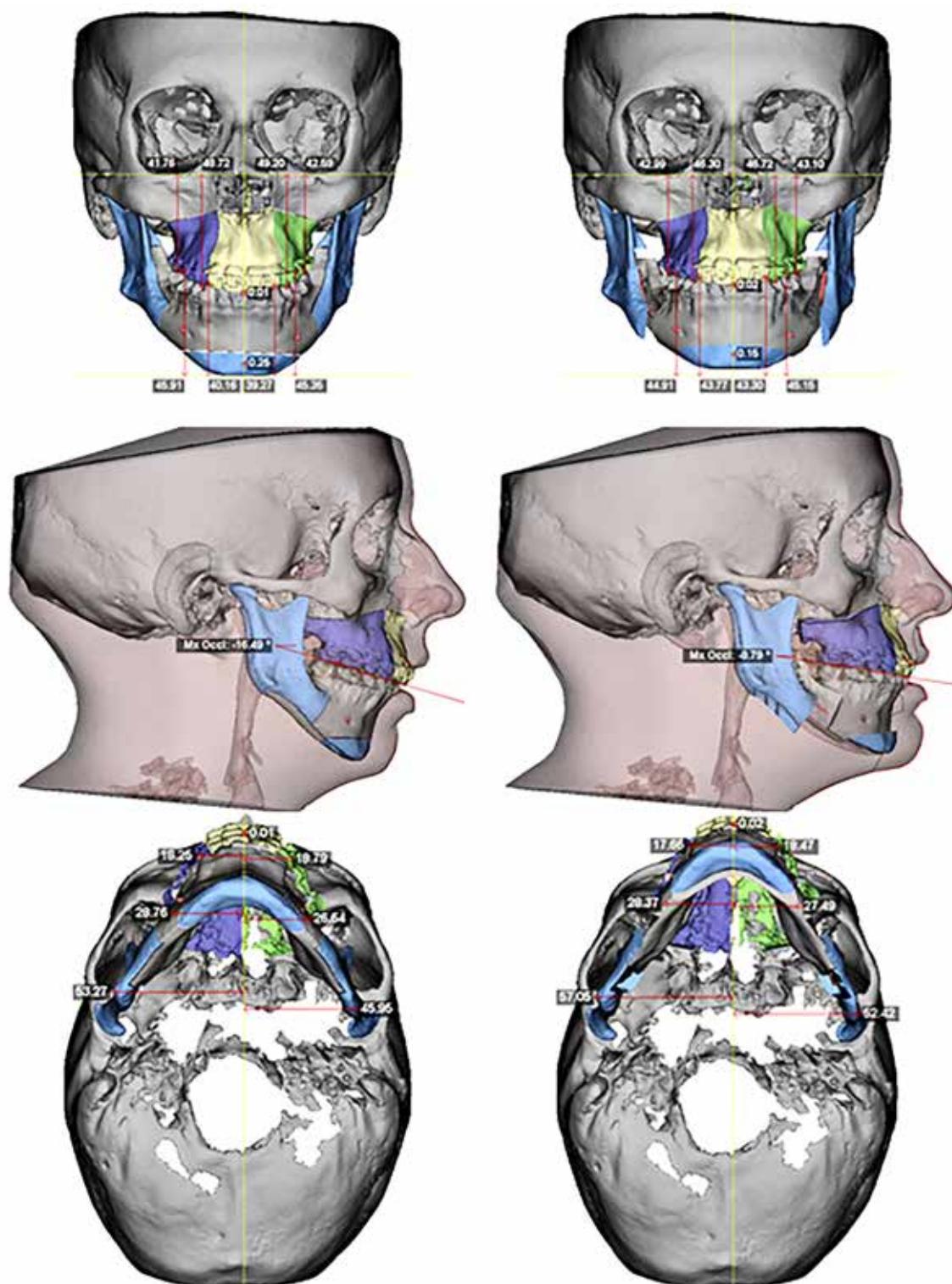


Fig. 6. Et eksempel på en virtuel plan med sammenligning af de præ- og planlagte postoperative mål.
Fig. 6. An example of a virtual plan comparing the pre- and the planned postoperative measurements.

3d-kirurgiske guider



Fig. 7. Design af 3d-printede kirurgiske guider.
Fig. 7. Design of 3D printed surgical guider.

Kvalitetskontrol

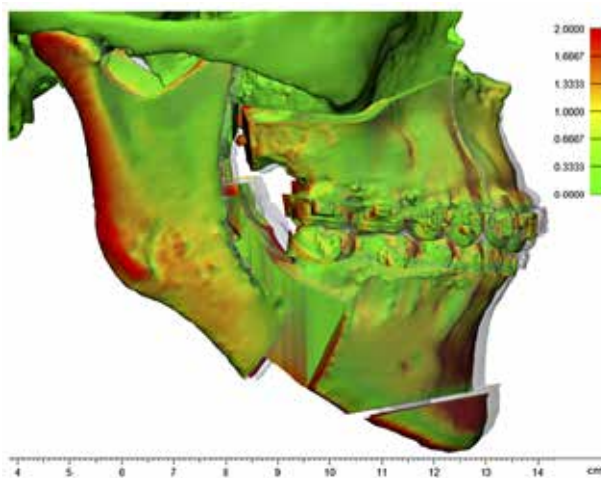


Fig. 8. Kvalitetskontrol vist som 3d-superponering og dermed sammenligning af den planlagte og den realiserede kæbeflytning.
Fig. 8. Quality control shown by superimposing and comparison of the planned and realized surgery.

Evaluering af slutresultat

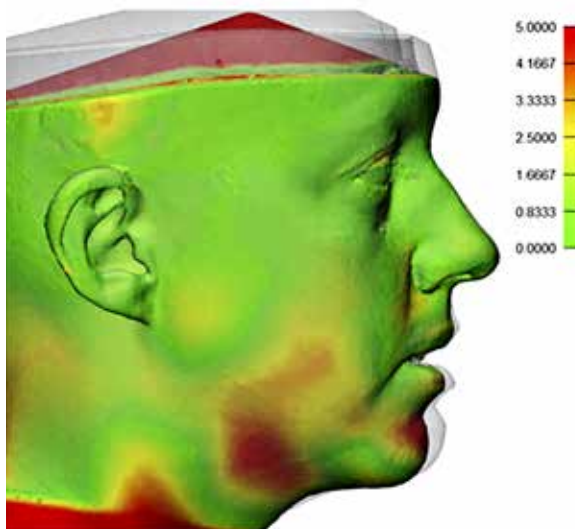


Fig. 9. Evaluering af resultatet to år postoperativt. Ansigtsofoto i profil samt blødtvævssammenligning med prædiktio vist som 3d-superponering.
Fig. 9. Evaluation of the result two years after surgery. Facial photo in profile and soft tissue comparison with prediction shown by 3D superimposition.

Skræddersyede programmer som Materialise ProPlan CMF®, KLS Martin IPS Case Designer® og Patterson Dolphin Imaging® har strømlinet og effektiviseret processen, men den virtuelle planlægning er stadig tidskrævende og kræver teknisk indsigt. Programmerne kan ikke erstatte en grundig klinisk undersøgelse, diagnosticering og behandlingsplanlægning. I nærmeste fremtid vil vi formentlig se mere automatiserede løsninger, hvor planlægningsprogrammer vha. kunstig intelligens vil kunne diagnosticere og komme med et kvalificeret bud på en behandlingsplan baseret på en afbildning af patientens fysiognomi (8,9). Yderligere patientinddragelse vil kunne opnås ved anvendelse af 3d-ansigtsbilleder og overførelse af ansigtets bløddele i behandlingsplanlægningen, hvor flytningerne kan prædikteres og forelægges patienten før endelig stillingtagen og accept af behandlingen. Uanset den kontinuerlige udvikling af planlægningssoftware er det utvetydigt nødvendigt, at kirurgen forstår de enkelte trin i den virtuelle behandlingsplanlægning og følger en rationel planlægningsprotokol (workflow). Herved mindskes risikoen for planlægnings- og kirurgiske fejl, og i sidste ende forbedres forudsigelighed og præcisionen af behandlingen (2).

Virtuel planlægning af ortodontisk-kirurgisk behandling er mere præcis end gipsmodeller og konventionel 2d-planlægning foretaget på lateralcefalogrammer (10-12). Værdiskabelsen for patienten er dog endnu ikke påvist (13-14). Forskelle mellem det planlagte og udførte på mindre end 2 mm/2° anses for en klinisk acceptabel præcision (15). Typisk opnås der en underkorrigering, hvor kæbeflytningen er mindre end den planlagte,

uden at der er opnået den fulde forståelse for dette fænomen (16). Det er også tilfældet i det aktuelle patienttilfælde, hvor der ses en underkorrigering på 2,5 mm (Fig. 8). Præcisionen bør ses i relation til størrelsen af den planlagte flytning, da en 2 mm fejlmargen på en 4 mm fremføring af kæben er en relativt større fejlmargen end på en 10 mm fremføring (16). I det viste tilfælde er patientens overkæbe planlagt til en fremføring på 7 mm med 3,5 mm kranial impaktering målt på overkæbens centrale incisiver, mens hagen (inkl. 3 mm hageosteotomi) fremføres med 18 mm målt på pogonion (Fig. 8). Afvigelsen i det viste eksempel er derfor klinisk acceptabel. Ud over underkorrigeringen på 2,5 mm viser slutevaluering to år postoperativt ved blødtvævssammenligning med prædiktionen et mindre recidiv på 2,5 mm (Fig. 9).

Fejlkilder i VSP kan være forbundet med kvaliteten af CBCT-scanningen, billedsegmenteringen, 3d-rekonstruktionen, superponering af intraoral scanning af tænderne på CBCT-scanningen, fremstillingen af de kirurgiske guider samt overførsel af behandlingsplanen til patienten. Brugen af patientspecifikke osteosynteseplader kan øge præcisionen, men har de økonomiske omkostninger som væsentlig ulempe (17). Omkostningerne kan forhåbentlig reduceres i en grad, så man i fremtiden på baggrund af den virtuelle behandlingsplanlægning vil bruge patientspecifikke osteosynteseplader som standard i behandlingen af vækstbetinget kæbeanomali.

Patienten har givet Tandlægebladet tilladelse til at bringe de i artiklen identificerbare fotos af patienten. ▶

ABSTRACT (ENGLISH)

DIGITAL WORKFLOW IN ORTHOGNATHIC SURGICAL TREATMENT PLANNING

Treatment planning of orthognathic surgery has developed from dental plaster models and conventional 2D planning using lateral cephalograms to virtual surgical planning and 3D print of surgical guides and patient-specific plates. Research has shown that virtual surgical planning is favorable based on surgical precision and perioperative efficiency. Nowadays,

virtual surgical planning is therefore the preferred approach for treatment planning of orthognathic surgery. This article describes a step-wise digital workflow for treatment planning of orthognathic surgery except for printing of patient-specific plates. Each step is briefly described and illustrated, using data from a case report. The understanding of the many steps of the virtual planning is crucial for minimizing errors and achieving a predictable and precise surgical result.

LITTERATUR

1. Gunson MJ, Arnett GW. Orthognathic virtual treatment planning for functional esthetic results. *Seminars in Orthodontics* 2019;25:230-47.
2. Antonini F, Borba AM, Pagnoncelli RM et al. Does a learning curve exist for accuracy in three-dimensional planning for maxillary positioning in bimaxillary orthognathic surgery? *Int J Oral Maxillofac Surg* 2020;49:787-93.
3. Elnager MH, Aronovich S, Kusnoto B. Digital workflow for combined orthodontics and orthognathic surgery. *Oral Maxillofacial Surg Clin North Am* 2020;32:1-14.
4. Efanov JI, Roy A-A, Huang KN et al. Virtual surgical planning: The pearls and pitfalls. *Plast Reconstr Surg Glob Open* 2018;6:e1443.
5. Meiyappan N, Tamizharasi S, Senthilkumar KP et al. Natural head position: An overview. *J Pharm Bioallied Sci* 2015;7:424-7.
6. Schwartz K, Holte MB, Ingerslev J. Virtuel planlægning ved ortodontisk kirurgisk behandling af asymmetrier. *Tandlægebladet* 2021;125:xxx-xxx.
7. Devid Zille, Dias L, Avelar R. The evolution of surgical planning in orthognathic surgery. *EC Dental Science* 2018;17:1914-19.
8. Knoops PGM, Papaioannou A, Borghi A et al. A machine learning framework for automated diagnosis and computer-assisted planning in plastic and reconstructive surgery. *Sci Rep* 2019;9:13597.
9. Jeong SH, Yun JP, Yeom, HG et al. Deep learning based discrimination of soft tissue profiles requiring orthognathic surgery by facial photographs. *Sci Rep* 2020;10:16235.
10. Xia J, Sheychenko L, Gateno J et al. Outcome of computer-aided surgical simulation in the treatment of patient with craniomaxillofacial deformities. *J Oral Maxillofac Surg* 2011;69:2014-24.
11. Hsu SS-P, Gateno J, Bell RB et al. Accuracy of a computer-aided surgical simulation protocol for orthognathic surgery: a prospective multicenter study. *J Oral Maxillofac Surg* 2013;71:128-42.
12. Zinser MJ, Sailer HE, Ritter L et al. A paradigm shift in orthognathic surgery? A comparison of navigation, computer-aided designed/computer aided manufactured splints, and "classic" intermaxillary splints to surgical transfer of virtual orthognathic planning. *J Oral Maxillofac Surg* 2013;71:2151.e1-21.
13. Chen Z, Mo S, Fan X et al. A meta-analysis and systematic review comparing the effectiveness of traditional and virtual surgical planning for orthognathic surgery: based on randomized clinical trials. *J Oral Maxillofac Surg* 2021;79:471.e1-471.e19.
14. Lin LO, Kalmar CL, Vu GH et al. Value-based analysis of virtual versus traditional surgical planning for orthognathic surgery. *J Craniofac Surg* 2020;31:1238-42.
15. Alkhayer A, Piffkó J, Lippold C et al. Accuracy of virtual planning in orthognathic surgery: a systematic review. *Head Face Med* 2020;16:34.
16. Tankersley AC, Nimmich MC, Battan A et al. Comparison of the planned versus actual jaw movement using splint-based virtual surgical planning: how close are we at achieving the planned outcomes? *J Oral Maxillofac Surg* 2019;77:1675-80.
17. Hanafy M, Akoush Y, Abou-ElFetouh A et al. Precision of orthognathic digital plan transfer using patient-specific cutting guider and osteosynthesis versus mixed analogue-digitally planned surgery: a randomized controlled clinical trial. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2020;49:62-8.

