

versehene Bissregistrat wird dann während der DVT oder CT vom Patienten getragen. Zusätzlich erfolgt ein Laserscan oder alternativ eine DVT des Ober- und Unterkiefergipsmodelles zusammen mit eben diesem Bissregistrat. Über das Registrat erfolgt daraufhin die Positionierung der virtuellen Gipsmodelle in das virtuelle Gesichtsschädelmodell. Neben DVT und Laserscansystemen können auch optische Systeme zur Digitalisierung von Okklusion und Bissregistraten verwendet werden. Neuere Ansätze basieren auf rechnergestützten semiautomatischen Übereinanderlagerungsprozeduren von virtuellem skelettalem und okklusalem Modell, ohne die Zuhilfenahme von Referenzmarkierungen. Dabei werden Iterative-closest-Point-Algorithmen verwendet, bei denen überlappende Punktwolken aneinander angepasst werden.

### 5.2.3 Umsetzung der virtuellen Planung – Computer-aided Manufacturing

Die Umsetzung der virtuellen Planung erfolgt mittels Schablonen und anderer Operationshilfen, per Computer-aided Manufacturing (CAM).



**Abb. 5.35 Unterkiefermodell.** STL-Modell des Unterkiefers, mit 3-teiligem Fibulatransplantat im Symphysenbereich und Korpusbereich beidseits.

### Übertragungsschablonen, sogenannte Guides

Eine möglichst exakte Übertragung der computerassistierten virtuellen Planung in die reale Operationssituation ist ein essenzieller Schlüssel zum Erfolg. Folgende Hilfsmittel und Verfahren existieren für diesen wichtigen Transfer:

- Stereolithografiemodelle als intraoperative Vorlage
- Cutting Guides (Osteotomieschablonen)
- individualisierte Implantate
- intraoperative Bildgebung
- OP-Navigation

### Stereolithografiemodelle

Stereolithografiemodelle, kurz STL-Modelle, sind CAD/CAM-gefertigte Nachbildungen des Schädels, von Anteilen des Schädels oder Abbildungen von virtuell geplanten Transplantaten (► Abb. 5.35). In der Anfangsphase der computergestützten Chirurgie waren STL-Modelle Hilfsmittel zur 3-dimensionalen Veranschaulichung der vorliegenden knöchernen Verhältnisse und dienten somit der Operationsplanung und dem Vorbiegen von Platten oder Meshes. Aufgrund verbesserter Softwaremöglichkeiten zur virtuellen Planung erfolgen mittlerweile alle relevanten Planungsschritte im virtuellen Umfeld. STL-Modelle werden vorwiegend als Vorlage zum präoperativen manuellen Vorbiegen von Platten sowie zur intraoperativen Plausibilitätskontrolle verwendet. Zudem können sie zur Veranschaulichung für Patienten und zur Aus- und Weiterbildung herangezogen werden. Gängige Materialien für STL-Modelle sind Polyamid und Acryl. Acrylmodelle sind transparent oder können in beliebigen Farben eingefärbt werden, um Strukturen wie Zähne und Nerven besonders hervorzuheben.

## Cutting Guides

Das wesentliche Ziel von Cutting Guides, auch **Osteotomie-Guides** oder **Osteotomieschablonen**, ist es, die exakte Position einer Osteotomielinie in einer definierten reproduzierbaren Lage zu ermöglichen. Solche Guides indizieren nicht nur die Lage von Osteotomielinien auf der Oberfläche des Knochens, sondern sind in der Regel mit geeigneten Führungen wie Schlitzn oder Flanschen versehen, die eine der virtuellen Planung entsprechende Winkelung bzw. Ansträgung der Osteotomieebene vorgeben. Dies ist vergleichbar mit den Schneidefunktionen einer Kapp- und Gehrungssäge. Während eine Schlitzführung eine bessere Führung des Schneideinstruments gewährleistet, ist bei der Zuhilfenahme von Flanschen, d. h. flächenartigen Führungen, eine bessere Übersicht über die Osteotomiestelle gegeben. Außerdem können die Schablonen mit Tiefenstopps sowie abnehmbaren Auslegerarmen für den Schutz von Weichgeweben, Nerven oder Gefäßen ausgestattet werden.

### Praxistipp



Es sollte darauf geachtet werden, dass die Ausgestaltung der Führungen mit dem Sägevorgang, den Eigenschaften der Sägeklängen und Bohrerbits (Länge, Breite, Dicke, Steifigkeit) und der vom Chirurgen genutzten Elektrowerkzeuge (Hub- oder oszillierende Säge, piezoelektrische Säge, Bohrmaschine) im Einklang steht.

Darüber hinaus müssen die Schablonen eine reichliche Wasserkühlung während der Osteotomie ermöglichen. Hierfür hat sich der Einbau von kleinen Öffnungen in den Schablonen zur Wasserspülung bewährt.

Um die Positionierung der Schablonen eindeutig und reproduzierbar zu gewährleisten, ist auf eine ausreichende Kontaktfläche der Schablonen zur knöchernen Unterlage zu achten. Dabei sollten Schablonen so gestaltet sein, dass knöchernen Ränder oder Einkerbungen gefasst werden können, im besten Fall mit kragenartigen Anteilen, die solche Knocheneinkerbungen zu umarmen vermögen. Zudem ist es ratsam, Schablonen in ihrer intendierten Position auf der Knochenoberfläche zu fixieren, was mit Schrauben oder Klemmen realisierbar ist.

Bei den Osteotomie-Guides werden folgende Schablonenarten unterschieden:

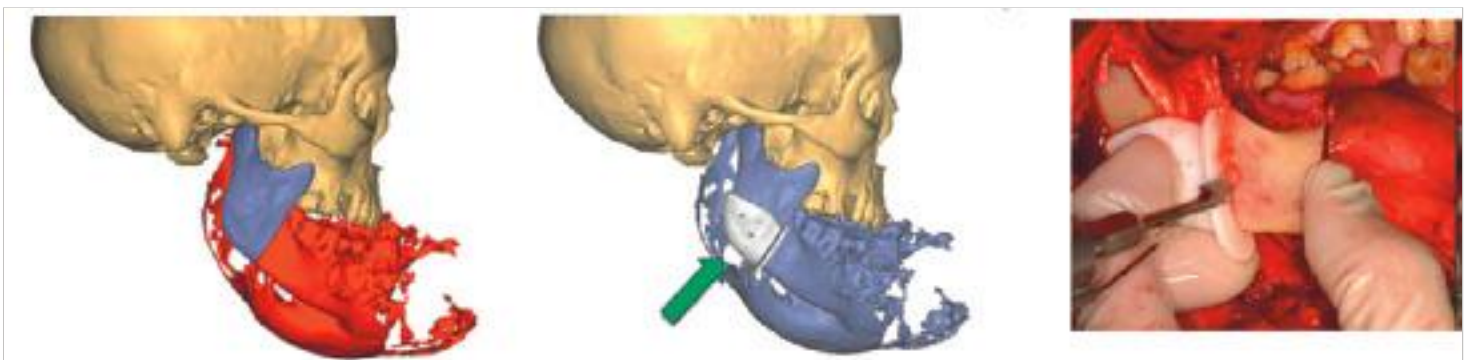
- Schablonen als Resektionshilfe, sogenannte „Resection Guides“,
- Schablonen, die die Entnahme und Segmentierung von Knochentransplantaten unterstützen, sogenannte „Segmentation Guides“,
- Schablonen, die der Verlagerung von Knochensegmenten dienen, sogenannte Positionierungsschablonen.

### Resektionsschablonen, „Resection-Guides“

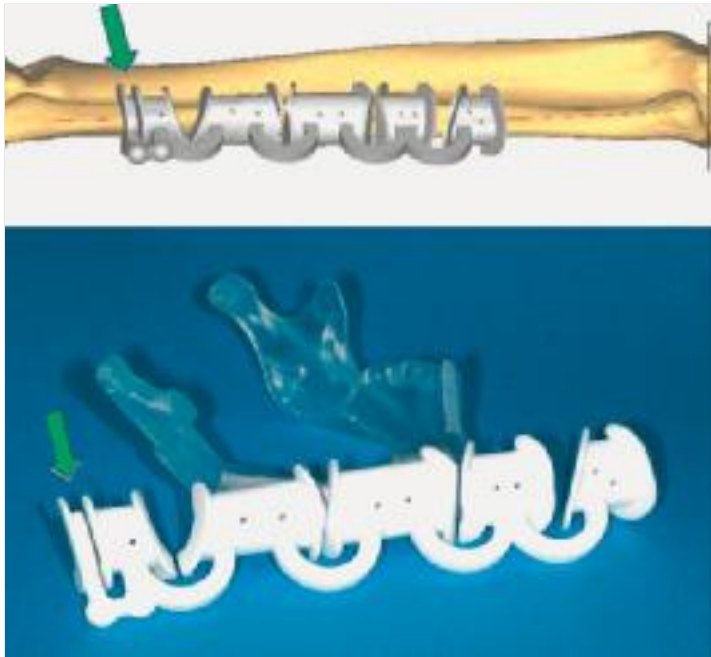
Segmentale oder marginale Resektionen im Unterkieferbereich benötigen mindestens 2 Osteotomielinien, um die Kontinuität des Unterkiefers zu durchtrennen bzw. um eine kastenförmige Resektion durchzuführen. Resektionsschablonen können als isolierte Teilstücke, in einem kontinuierlichen Layout als Einzelstück, das den Resektionsbereich zu einem gewissen Ausmaß umgreift, oder in 2 oder mehreren Komponenten, die mit Verbindungsstegen („connecting bars“), Schwalbenschwanzverbindungen oder abnehmbaren Verbindungen miteinander verbunden sind, konstruiert werden (► Abb. 5.36, ► Abb. 5.38). Die Abtragung hyperostotischer Knochenformationen (z. B. bei fibröser Dysplasie) erfordert eine tangentielle Knochenosteotomie bzw. modellierende Osteotomie über ausgedehnte Bereiche auf einem geplanten Tiefenniveau. Schablonen mit einem schachbrettartigen Muster, die Bohrführungen mit Tiefenstopps an den Ecken aufweisen und über dem verdickten Knochenareal ausgebreitet werden, legen eine zuvor computerassistent definierte und eindeutig übertragbare Ebene fest, in der überschüssiger Knochen kontrolliert abgetragen werden kann [324].

### Schablonen zur Resektion des Unterkiefers

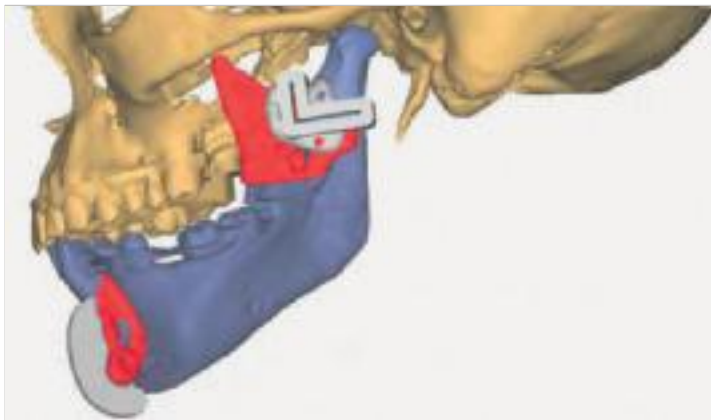
Kontinuitätsresektionen des Unterkiefers werden üblicherweise nach 2 Osteotomien durchgeführt. Schließt die Resektion die Gelenkwalzenregion mit ein, ist folglich nur eine Osteotomielinie notwendig. Ein wesentlicher Aspekt ablativer Prozeduren bei maligner Affektion der Kieferknochen ist, eine ausreichend extendierte Knochenresektion mit adäquatem Sicherheitsabstand zu erreichen. Hierfür sind intraoperative Anpassungen an die ursprüngliche computerassistentierte Planung unersetzlich. Resekti-



**Abb. 5.36 Resektionsschablone.** Patient mit einem sehr ausgedehnten Ameloblastom des Unterkiefers. Geplant ist eine subtotale Unterkieferresektion unter Belassen ausschließlich des Ramus mandibulae rechts. Links: Resektionsbereiche rot dargestellt. Mitte: Resektionsschablone, den den Kieferwinkel rechts umfasst (Pfeil). Rechts: durch eine Schablone geführte Resektion des Unterkiefers mit einer oszillierenden Säge.



**Abb. 5.37 Transplantatentnahmeschablone mit Erweiterungsoption.** Um eine eventuell intraoperativ notwendig werdende Anpassung der Resektionshöhe im Gelenkbereich rechts auf das primär geplante Fibulatransplantat übertragen zu können, wird die Transplantatentnahmeschablone mit einer zusätzlichen Führung (Pfeil) in Form eines Schlitzes versehen. Oben: virtuelle Darstellung der Entnahmeschablone und Fibula. Unten: STL-Modell des Unterkiefers und der Entnahmeschablone mit zusätzlichem Führungsschlitz (Pfeil).



**Abb. 5.38 Virtuelle Operationsplanung.** Virtuelle Operationsplanung zur sekundären Rekonstruktion der Unterkiefers links (Symphyse, Korpus und Ramus mandibulae). Planung von Cutting Guides (weiß dargestellt), die eindeutig definierte Anlagerungsflächen für das geplante mikrovaskuläre Transplantat schaffen sollen. Zu resezierende Bereiche sind rot dargestellt.

onsschablonen, die mehrere nacheinander geschaltete Führungsschlitz aufweisen, können die Modifikationen des Resektionsausmaßes während eines Eingriffs unterstützen. Ein dadurch ermöglichtes schrittweises Vorgehen kann unter Umständen nicht infiltrierten Knochen schonen. Dies ist insbesondere wichtig im zahntragenden Bereich, im Bereich von Muskelansätzen und bei langspannigen subtotalen Unterkieferresektionen, bei denen die zur Verfügungen stehenden Rekonstruktionsoptionen bezüglich der maximal erreichbaren Transplantatlänge an ihre Grenzen stoßen.

Idealerweise sollten im Rahmen computergestützter Verfahren Transplantate zur primären Rekonstruktionen so konstruiert werden, dass sie in allen Dimensionen exakt in den geplanten Defektbereich passen. Ein wie oben beschriebenes schrittweises Vorgehen zur knöchernen Resektion verlangt in diesem Kontext konsekutiv eine Adaptierbarkeit der Länge des ausgewählten Knochentransplantats. Dies kann durch die Integration zusätzlicher Sägefürungen im Bereich der Entnahmeschablonen erreicht werden (► Abb. 5.37). Die Positionen der zusätzlichen Osteotomieführungen der Entnahmeschablone müssen dann den zusätzlichen Führungen im Bereich der Resektionsschablone entsprechen.

Üblicherweise werden Resektionen des Unterkiefers so durchgeführt, dass eine zur Lateralfläche annähernd senkrecht stehende Resektionsfläche resultiert. Unterkieferresektionsschablonen können auch derart gestaltet werden, dass die Osteotomien zur Resektion verlängert werden und damit schräge Resektionsflächen entstehen. Die Angulation der Osteotomien an beiden Resektionsenden kann, statt wie bei konventionellem Vorgehen mit einem Winkel von 90°, auch Winkel von 60°, 45°, 30° oder sogar noch kleinere Winkel mit der Lateralfläche des Unterkiefers einschließen, wobei noch geringere Werte einer sagittalen Spaltung nahekommen [332]. Vorteil solcher schräger Resektionsflächen ist eine vergrößerte Anlagerungsfläche von Transplantat und ortsständigen Kieferstümpfen, was einen Vorteil für die knöcherne Konsolidierung hat. Darüber hinaus kann eine zum Unterrand oder zur Lateralfläche divergierende Angulation der Resektionsflächen die Insertion des Transplantats, im Vergleich zu der Verwendung paralleler Resektionsflächen, vereinfachen. Ebenso können stufenförmige Resektionsgrenzen entworfen werden, um den knöchernen Kontakt zwischen ortsständigem Knochen und Transplantat zu erhöhen [306].

Knochenresektionen des Unterkiefers, bei denen die Unterkieferkontinuität erhalten bleibt, werden als **marginale Resektionen** beschrieben. Diese können weiter unterteilt werden in superiore (okklusale) sowie in inferiore (basale) Kastenresektionen, schräge Resektionen bzw. Spangenresektionen sowie in sagittale Resektionen der inneren oder der äußeren Kortikalis. Die Ausdehnung der marginalen Resektion kann auf den anterioren, anterolateralen oder posterioren Unterkiefer beschränkt sein oder sich von der Symphyse bis zum retromolaren Bereich erstrecken und den Processus coronoideus umfassen.

Während die Indikationen zur Unterkieferteilresektion weiterhin diskutiert werden, sind die biomechanischen Anforderungen an eine ausreichende Stabilität des verbleibenden Unterkiefers für alle Resektionstypen gleich und relativ unstrittig. Hierfür sollte ein in horizontaler und vertikaler Richtung genügend dimensionierter Restknochen verbleiben. Nach einer superioren Kastenresektion sollten etwa 10 mm vertikale Knochenhöhe verbleiben. Da abrupt abgewinkelte Ecken eines Kastendefekts erhöhtem mechanischen Stress ausgesetzt sind und für Frakturen prädisponieren, sollten Kastenresektionen eher kurvenartig oder muldenförmig konfiguriert werden. Die Art der marginalen Resektion sollte, falls onkologisch sinnvoll, den entsprechenden Nervverläufen Rechnung tragen. Nahezu jede Ausgestaltung einer marginalen Resektion ist mittels einer Transferschablone in die Operationssituation übertragbar. Mittels Finite Elemente Analyse (FEA) können im Rahmen einer virtuellen Operationsplanung möglicherweise Aussagen darüber getroffen werden, ob der ver-

bleibende Knochen ausreichende Stabilität aufweist. Steht dies im Zweifel, ist die Applikation einer Protektionsplatte mit konventionellen, vorgeformten („preformed“) oder patientenspezifischen Platten angezeigt. Dies gilt insbesondere dann, wenn eine adjuvante Radiotherapie angeschlossen werden soll.

### Schablonen zur Resektion des Oberkiefers und Mittelgesichts

Während solide knöcherne Strukturen wie Oberkieferalveolarfortsätze, die Pfeiler des Mittelgesichts, die orbitalen Ränder, das Nasenskelett und die Stirnregion prinzipiell en bloc reseziert werden können, erfolgt die Resektion im Bereich der pneumatisierten Räume sowie der Grenzbereiche nach intrakraniell und zur Orbita eher fragmentiert und Schritt für Schritt. Virtueller geplante Resektionen innerhalb der soliden oberen Gesichtsetage können, wie im Unterkieferbereich, durch Schablonen in die Operationssituation übertragen werden. Im Gegensatz dazu bieten sich für Resektionen im Bereich der Sinus Verfahren der intraoperativen Navigation an, bei denen die Position chirurgischer Instrumente auf präoperativ generierten multiplanaren CT-Scans nachverfolgt werden kann. Ein weiterer Aspekt, der die Applikation von Resektionsschablonen im Mittelgesichtsbereich einschränkt, ist die Tatsache, dass knöcherne Wiederherstellungen häufig als sekundäre Rekonstruktion und nach einer adjuvanten Radiotherapie erfolgen. Zudem werden nach der Resektion entstehende Toträume im Sinussystem typischerweise mit Weichgewebekomponenten von Knochentransplantaten aufgefüllt, was derzeit nicht computergestützt geplant werden kann.

### Schablonen zur Transplantatentnahme

Die Anforderungen an knöcherne bzw. kombiniert knöcherneweichgewebige Transplantate richten sich sowohl nach der Größe und der Geometrie des zu rekonstruierenden knöchernen Bereichs als auch nach Art und Umfang der notwendigen Weichgewebendeckung im Gesicht-Hals-Bereich sowie in der Mundhöhle und Nasenhaupthöhle im Sinne eines „inner lining“. Dabei müssen Faktoren wie die Verfügbarkeit im Spendergebiet, die Hebedefektmorbidität, der Gefäßstatus (Gefäßkaliber und -länge) im Transplantatbereich sowie die Praktikabilität der Transplantatentnahme, -konturierung und -insertion berücksichtigt werden.

Gebräuchliche Transplantate zur Wiederherstellung des Ober- und Unterkiefers sind, wie bereits erwähnt, das Fibula-, das Skapula- und das Beckenkammtransplantat. Als Alternativen stehen das mikrovaskulär reanastomosierte Radiusknochen- und knöchern Transplantate vom medialen femoralen Kondylus, den Rippen oder dem Humerusschaft zur Verfügung. Nach der Entnahme werden die knöchernen Anteile der Transplantate mittels öffnender oder schließender Osteotomien („opening“ bzw. „closing osteotomies“) konturiert. Kortikale Osteotomien unter Erhaltung des Periosts eröffnen intersegmentale Lücken, die mit Knochenchips aufgefüllt werden [312].

In den letzten 5 Jahren wurden eine ganze Reihe an Vorschlägen zur Gestaltung von Transplantatentnahmeschablonen vorgestellt. Solche Schablonen können auch, allgemein gehalten, als Cutting Guides oder Osteotomie-Guides bezeichnet oder – genauer bezüglich ihrer Verwendung zur Entnahme und Segmentierung von knöchernen Transplantaten benannt – als Harvesting Guides oder Segmentation Guides bezeichnet werden. Ein Überblick darüber ist den nachfolgenden Textabschnitten zu entnehmen.

#### Merke

Resektions- und Transplantatentnahmeschablonen können so gestaltet und aufeinander abgestimmt werden, dass intraoperative Anpassungen der Resektionsgrenzen und somit auch der Transplantatdimensionen ermöglicht werden.



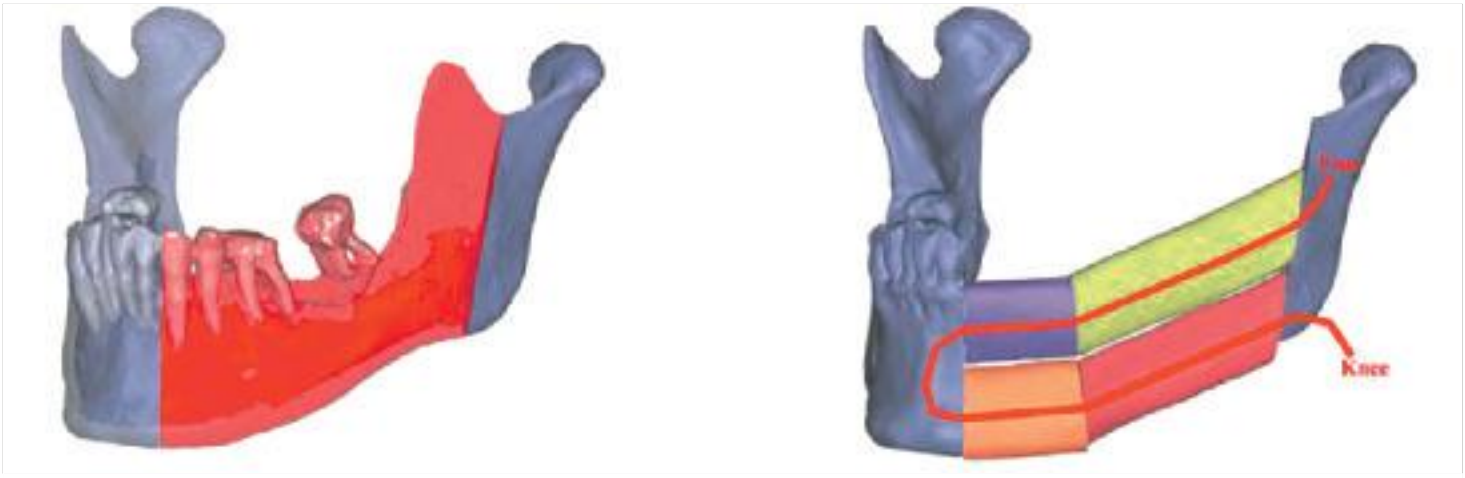
### Schablonen zur Entnahme von Fibulatransplantaten

Mit dem Fibulatransplantat kann ein bis zu 30 cm langes, primär lineares, knöchernes Transplantat gehoben werden. Dieses weist einen tränenförmigen Querschnitt und eine rigide kortikale Umhüllung auf. Unter Erhaltung der periostalen Blutversorgung kann die Fibula in mehrere Segmente osteotomiert werden, was eine Vielzahl an Gestaltungs- bzw. Konturierungsmöglichkeiten erlaubt. Zudem erlauben die knöchernen Verhältnisse an der Fibula die Insertion von dentalen Implantaten zur darauffolgenden funktionellen Rehabilitation. Das Fibulatransplantat kann als kombinierter osteoseptokutaner oder osteomuskulokutaner Lappen entnommen werden, mit einer oder mehreren dünnen Hautinseln sowie, in Abhängigkeit der Perforansgefäße, mit einer Muskelmanschette. Aufgrund dieser Merkmale stellt das Fibulatransplantat in zahlreichen klinischen Situationen eine wertvolle rekonstruktive Option dar und ist eines der beliebtesten und am häufigsten verwendeten mikrovaskulär reanastomosierten knöchernen Transplantate zur Wiederherstellung des Ober- und Unterkiefers. Zudem eignen sich Fibulatransplantate auch zur Rekonstruktion des lateralen Mittelgesichts, der Periorbita und der Stirnregion. Die Fibula bietet die Möglichkeit eines doppelstöckigen Transplantats, bei dem auf das basal liegende Fibulasegment ein weiteres Segment daraufgelegt wird. Dabei entsteht eine sogenannte Double-Barrel-Fibula oder, eigentlich anders beschrieben, ein Over-and-under Barrel-Fibulatransplantat, das das vertikale Knochenangebot vergrößert (► Abb. 5.39).

#### Vorsicht

Bei der Double-Barrel-Fibula-Technik muss darauf geachtet werden, dass ein kleineres, mindestens 2 cm langes Knochensegment zwischen basal und krestal liegenden Segmenten entfernt wird, wodurch ein Umknicken des Gefäßstiels, sogenanntes „kinking“, vermieden werden soll.



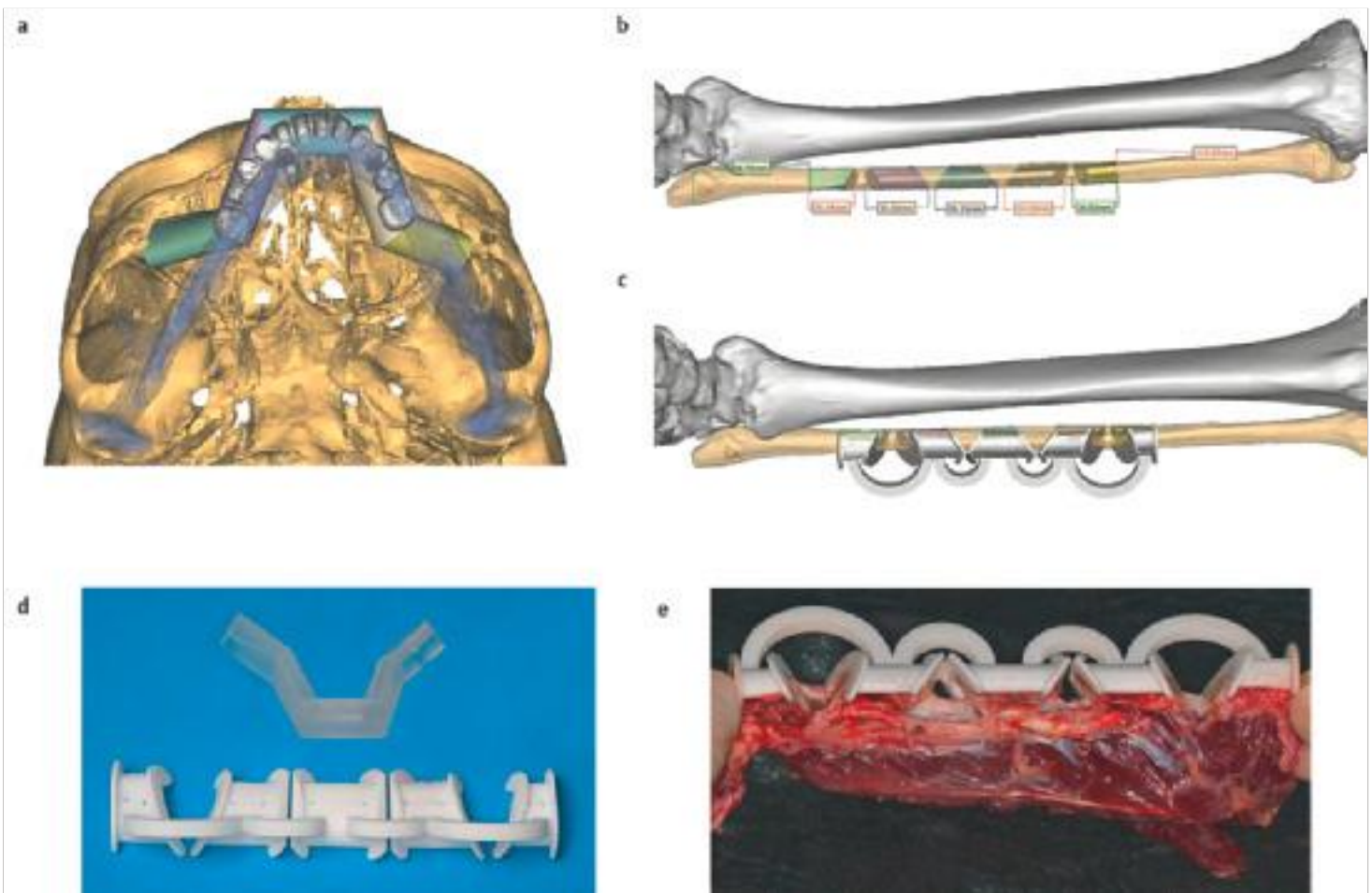


**Abb. 5.39 Double-Barrel-Fibula.** Links: Unterkiefer mit rot dargestelltem Resektionsbereich. Rechts: virtuelle Rekonstruktion mit einer Double-Barrel-Fibula, mit je 2 Segmenten basal und krestal. Die rote Linie verdeutlicht die Orientierung der Fibula, wobei das rote eingefärbte Segment kniewärts liegt und das gelb eingefärbte Segment fußwärts.

Während die basal liegenden Anteile einen wichtigen Teil zu den Konturen des Untergesichts, insbesondere im Kinnbereich, und damit zur Ästhetik beitragen, spielen die krestalen Segmente eine große Rolle als knöcherne Basis für eine implantatgetragene kaufunktionelle Rehabilitation. Um dieser Aufgabenteilung gerecht zu werden, kann ein Double-barrel-Fibulatransplantat so modifiziert werden, dass die basal liegenden Segmente eher vestibular positioniert werden und die krestalen Anteile, im Vergleich dazu, lingualwärts liegen, mit einem gewissen Überhang im Sinne eines Balkons [313]. Sollen die Symphyse umfassende Unterkieferanteile rekonstruiert werden, kann eine basal gelegene U-förmige Neunterkieferspange geplant werden, die einen höheren Radius aufweist als die krestal darauf zu liegen kommende Neospange.

Alles in allem kann mithilfe der Fibula ein Transplantat konfiguriert werden, das im Bereich von Parasymphyse und Korpus in der Double-Barrel-Technik ausgestaltet ist und zudem den Ramus und Kondylenbereich, nach Exartikulation, mit einem „single barrel“ wiederherstellt [347]. Insbesondere für solche komplexeren Rekonstruktionen ist die computergestützte virtuelle Planung mit Herstellung von CAD/CAM-gefertigten OP-Hilfen von großem Wert, da umfangreiche Transplantatkonturierungen mit mehrfacher Segmentierung freihand nur sehr schwierig umsetzbar sind und eher zu Ungenauigkeiten führen. Jede Abweichung von der ursprünglichen Planung setzt sich in den darauffolgenden Schritten fort und kann eine ganze Fehlerkette, mit mangelnder Segmentpositionierung und Inkongruenz von Osteotomieflächen, in Gang setzen.

Osteotomieschablonen zur Entnahme und Segmentierung von Fibulatransplantaten haben seit den Erstbeschreibungen Ende der 2000er-Jahre [321] [326] eine rasche Verbreitung und mannigfaltige Modifikationen erfahren [307] [314] [309] [317] [320] [329] [343] [337]. Dies betrifft insbesondere Rekonstruktionen des Unterkiefers. Mehrere Studien haben durch die Übereinanderlagerung von virtueller Planung und postoperativen CT-Daten gezeigt, dass der Gebrauch von CAD/CAM-gefertigten Schablonen zur Entnahme und Segmentierung von Fibulatransplantaten zu einer hohen Präzision bei der Umsetzung der virtuellen Planung in die OP-Situation führen kann [342] [349]. Deutlich weniger gut in der Literatur vertreten sind Erfahrungen zur Verwendung von Osteotomieschablonen für die Fibula bezüglich Rekonstruktionen des Oberkiefers und des Mittelgesichts [310] [319] [344]. Mit dem Umfang des vertikalen und horizontalen Knochenverlusts nimmt auch der Schwierigkeitsgrad der Wiederherstellung der Oberkieferalveolarfortsätze und der Mittelgesichtspfeiler zu. Bei basalen Defekten müssen die Alveolarfortsätze unilateral, im anterioren Bereich oder bilateral, mithilfe eines u-förmig konturierten Fibulatransplantats bzw. mit Anteilen davon, rekonstruiert werden. Bei einem basalen bilateralen Defekt, der auch die Crista zygomatico-alveolaris miteinschließt, besteht die Möglichkeit der Rekonstruktion durch ein omegaförmig konturiertes Fibulatransplantat (► Abb. 5.40).



**Abb. 5.40** Omegaförmiges Fibulatransplantat. Basaler bilateraler Oberkieferdefekt, der auch die Crista zygomatico-alveolaris miteinschließt, und geplante Rekonstruktion durch ein omegaförmig konturiertes Fibulatransplantat, bestehend aus 5 Segmenten. **a** virtuelle OP-Planung mit omegaförmig konturiertem Fibulatransplantat, bestehend aus 5 Segmenten. **b** virtuelle Unterteilung der Fibula in fünf Segmente. **c** virtuelles Design (CAD) einer Fibulaentnahmeschablone. **d** STL-Modell des geplanten Fibulatransplantats und CAD/CAM-gefertigte Entnahmeschablone. **e** Entnahmeschablone an der Fibula in situ.

Bei komplexen und v.a. vertikal ausgedehnten Defekten mit teilweisem Verlust der Mittelgesichtspfeiler, orbitaler Strukturen, wie z. B. bei der Brown-Klasse III, müssen oronasale und oroantrale Verbindungen verschlossen, die Jochbeinprominenz und die Alveolarkämme für eine spätere implantatgetragene kaufunktionelle Rehabilitation wiederhergestellt werden. Sollen solche Defekte mit Fibulatransplantaten versorgt werden, müssen diese mehrfach segmentiert und teils stark zueinander anguliert werden (► Abb. 5.41).

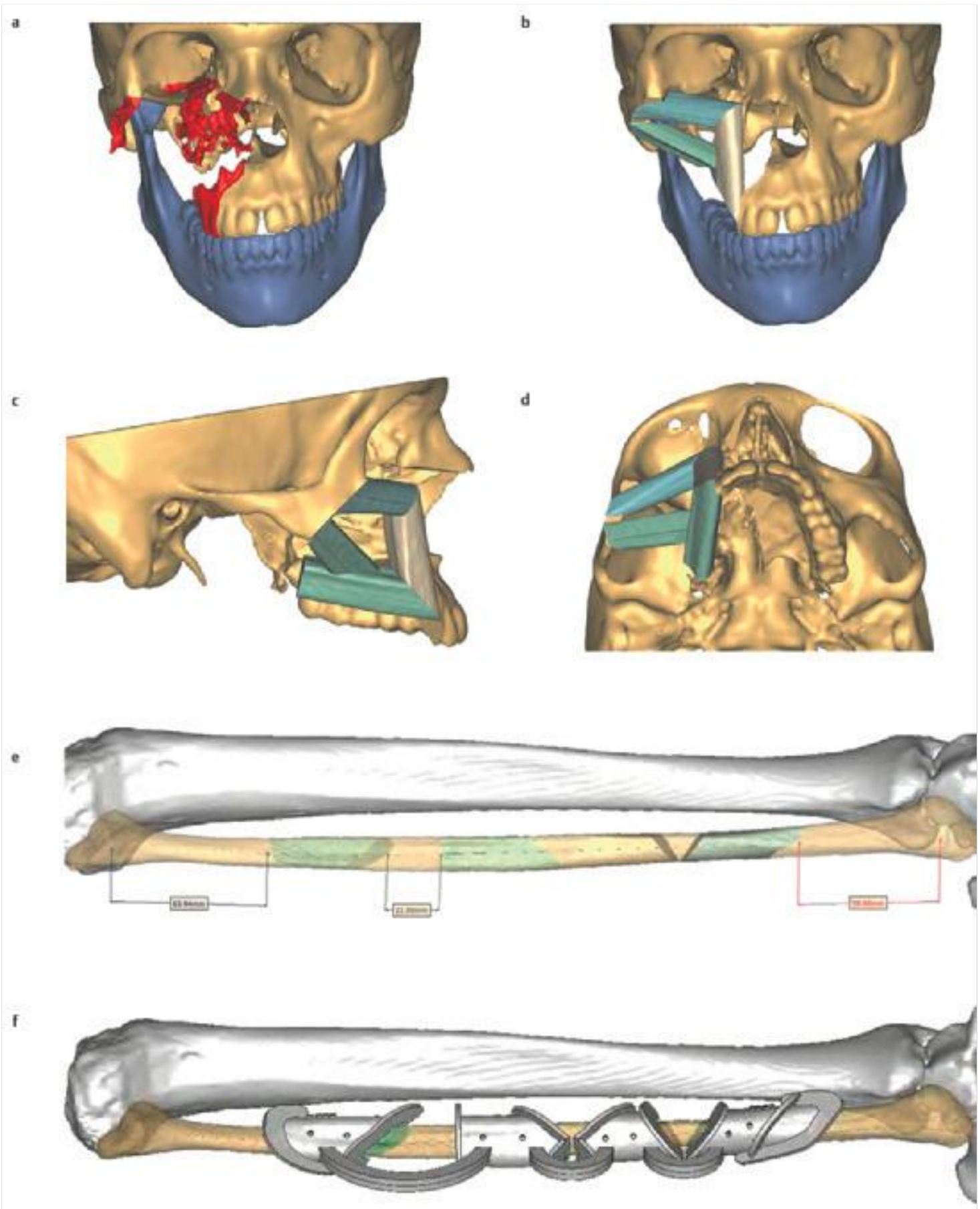
### Praxistipp

Unabhängig davon, wie ein Fibulatransplantat zur Ober- oder Unterkieferrekonstruktion konfiguriert und segmentiert wird, sollten einzelne Segmente nicht kleiner als 1,5 cm lang sein, um ihre Durchblutung nicht zu gefährden.

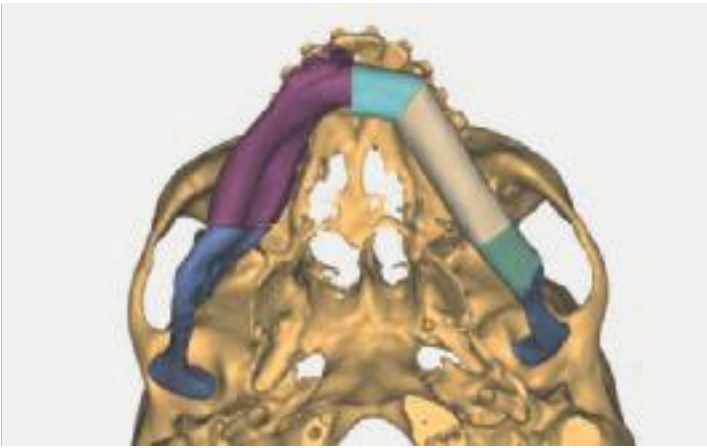
Das Design von Cutting Guides zur Entnahme bzw. Segmentierung von Fibulatransplantaten basiert auf der geeigneten Allokation und Trigonometrie von zu entnehmenden Knochenstücken bei den geplanten Keilosteotomien. Analog zu Biegeprozeduren bei Rekonstruktionsplatten kann die Fibula sowohl „über die Fläche“ („out-of-plane bending“) als auch „über die Kante“ („in-pla-

ne bending“) gebogen werden. Zudem sind Torquebewegungen möglich. Nach Möglichkeit sollte der dünne Rand eines Osteotomiekeils zur Muskelmanschette hin orientiert sein, um periostale Dissektionen möglichst gering zu halten und somit die Blutversorgung möglichst nicht zu kompromittieren. Sollen Fibulasegmente im Sinne eines Double-Barrel-Transplantats aufeinander positioniert werden, müssen Knochenstücke entfernt werden, um genügend Mobilität im Bereich der umgebenden Weichgewebe zu erhalten und ein Umknicken des Gefäßstiels zu vermeiden. Die periostale Integrität sollte dabei erhalten bleiben. Generell müssen eher bei Oberkiefer- und Mittelgesichtsrekonstruktionen Knochenstücke entnommen werden, da hier komplexere Fibulakonturierungen notwendig sind (siehe z. B. ► Abb. 5.41).

Beim konventionellen Vorgehen zur Rekonstruktion der Unterkieferspanne anterolateral beidseits mit einem Fibulatransplantat wird diese meist trapezförmig konturiert. Diese geometrische Vereinfachung zur Wiederherstellung der Unterkieferaußenkontur benötigt weniger einzelne Fibulasegmente und ist freihand praktikabel und zuverlässig durchführbar, resultiert jedoch häufig in einer unnatürlichen, flachen und verbreiterten Kinnform. Aktuelle computergestützte Verfahren vereinfachen die Realisierung einer natürlicheren Nachformung des Unterkiefers, v. a. eine verbesserte Kinnprojektion, durch die Verwendung von 4 oder mehr Fibulasegmenten (► Abb. 5.42).



**Abb. 5.41 Brown-Klasse-III-Defekt.** a Defekt im Bereich der Mittelgesichtspfeiler, des Jochbeins und des Oberkieferalveolarfortsatzes infraorbital rechts (rot dargestellte Bereiche sollen zusätzlich noch reseziert werden). b frontale Ansicht einer geplanten virtuellen Rekonstruktion mit einem 4-Segment-Fibulatransplantat, bei dem die Segmente stark zueinander anguliert wurden. c Ansicht von lateral. d Ansicht von kaudal. e virtuelle Unterteilung der Fibula in 4 Segmente. f virtuelles Design (CAD) der Fibulaentnahmeschablone.



**Abb. 5.42 Wiederherstellung der Kinnprojektion.** Rekonstruktion des Unterkiefers im linken Symphysen-, Korpus- und Ramusbereich mit natürlicher Wiederherstellung der Kinnprojektion durch ein Fibulatransplantat.

### Praxistipp



Bei der Planung von osteoseptomuskulokutanen Fibulatransplantaten ist es essenziell, auf die Lage und die Ausrichtung des Transplantatgefäßstiels und der Empfängergefäße zu achten. Folgende Aspekte sind zu beachten:

- Position der Muskelmanschette (M. flexor hallucis longus and M. tibialis posterior)
- Gefäßversorgung auf der lingualen bzw. palatinalen Seite der Knochensegmente
- Lage der Osteosyntheseplatte auf der anterioren oder lateralen Knochenoberfläche
- Orientierung des posterioren intermuskulären Septums mit den Perforatoren zu den Hautinseln entlang von intraoralen Mukosa- bzw. extraoralen Hautdefekten
- Länge des peronealen Gefäßstiels

### Schablonen zur Entnahme von Beckenkammtransplantaten

Sowohl avaskuläre als auch mikrovaskulär reanastomosierte Transplantate vom Beckenkamm haben seit vielen Jahren eine herausragende Bedeutung in der Wiederherstellung knöcherner Areale des Gesichtsschädels. Die natürliche Geometrie der Crista iliaca kommt der Form einer Hemimandibel nahe, womit sich das mikrovaskulär reanastomosierte Beckenkammtransplantat sehr gut für Unterkieferrekonstruktionen, z. B. im Bereich der Kieferwinkels und des Kinns, eignet, solange eine gewisse Defektlänge entlang der Unterkieferspanne nicht überschritten wird (► Abb. 5.43). Mit einem Beckenkammtransplantat kann etwa maximal eine Hemimandibel ersetzt werden. Aufgrund dessen, dass sich durch das Beckenkammtransplantat auch eine gute vertikale Dimension erreichen lässt und der Beckenkamm eine starke Kortikalis und dichte Spongiosastruktur aufweist, kann eine gute Voraussetzung für die implantatgetragene prothetische Rehabilitation geschaffen werden. Der Beckenkamm eignet sich auch zur Rekonstruktion des Oberkiefers und des Mittelgesichts, insbesondere für die Brown-Klassen II, III und VI.

Mikrovaskulär reanastomosierte Transplantate vom Beckenkamm bestehen entweder aus dem Knochen der Crista iliaca mit anhaftender Muskulatur (muskuloosär) oder aus Knochen, Muskulatur und Hautanteil (osteomuskulokutan). In der Regel werden die A. und V. circumflexa ilium profunda (ACIP bzw. VCIP), englisch „deep ilica circumflex artery (DCIA)“ bzw. „deep ilica circumflex vein (DCIV)“ zur Gefäßversorgung verwendet.

### Schablonen zur Entnahme von Skapulatransplantaten

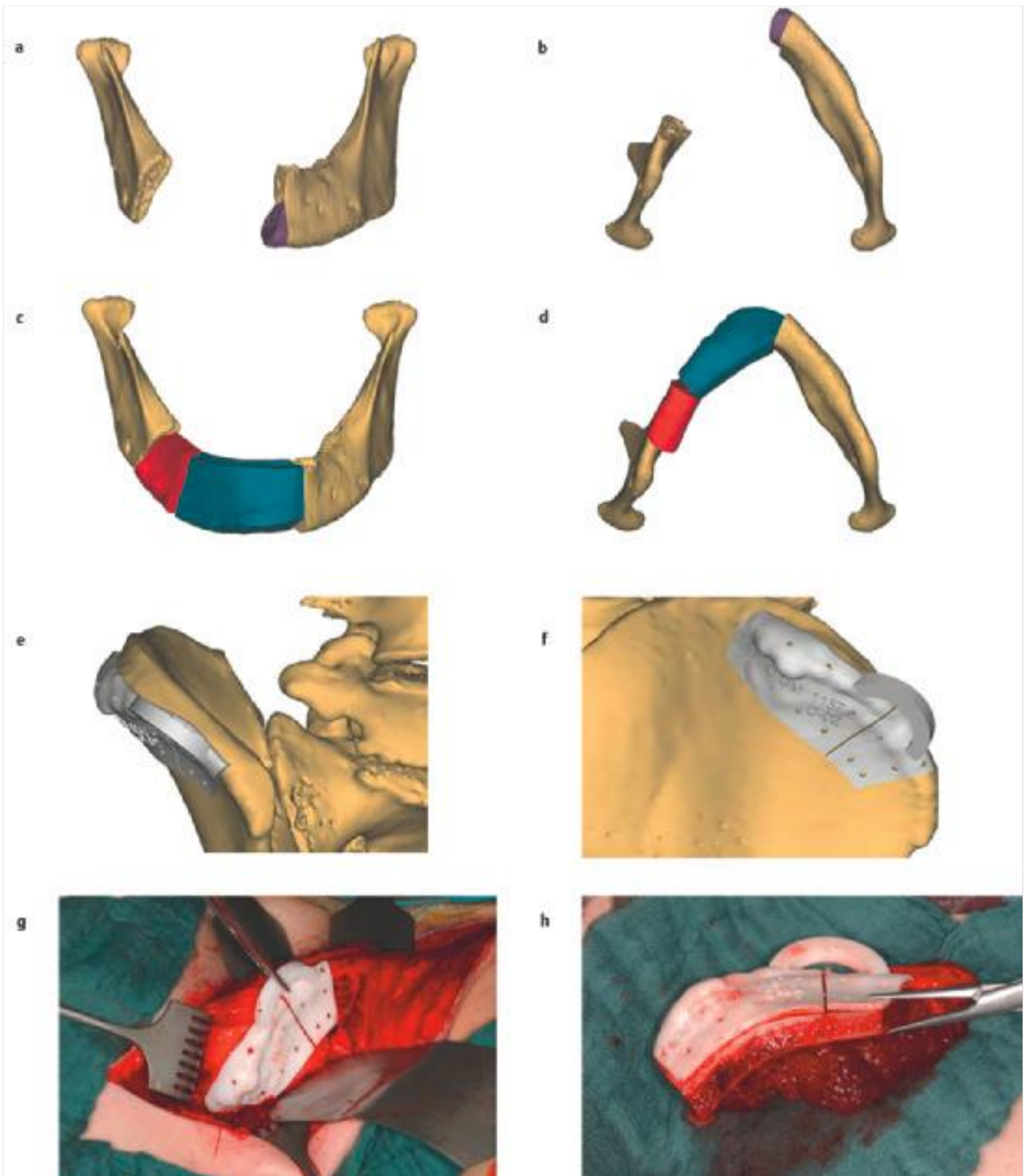
Über die subskapuläre Gefäßachse kann eine ganze Reihe von mikrovaskulären Transplantaten bzw. Transplantatkombinationen mit Anteilen von Knochen, Muskel, Fett und Hautanteilen gehoben werden, die sich für die Rekonstruktion im Gesichtsschädelbereich als nützlich erwiesen haben. Zwar sind das verfügbare Knochenangebot im Bereich des lateralen Skapularands und der Skapulaspitze eher limitiert, zusätzlich zum Knochenanteil können jedoch erhebliche Weichgewebeanteile mit entnommen werden. Erschwerend wirken sich die etwas ungünstige Kontur und die ebenfalls limitierte Knochenhöhe sowie die Notwendigkeit zur intraoperativen Umlagerung aus. Wenngleich ungünstiger als beim Beckenkamm, ist es zumindest möglich, auch in Skapulatransplantate dentale Implantate zur kaufunktionellen Wiederherstellung zu inserieren. Eine separate Gefäßversorgung über die Angulargefäße ermöglicht die zusätzliche Entnahme eines kleineren Knochensegments an der Skapulaspitze ohne Zuhilfenahme einer breiten Muskelmanschette.

Nachdem computerassistierte Verfahren zunächst für Rekonstruktionen mit Fibula- oder Beckenkammtransplantaten beschrieben wurden, liegen erst allmählich auch Erfahrungen für die computergestützte Wiederherstellung mit Skapulatransplantaten vor [315]. Dies ist vorwiegend dem Umstand geschuldet, dass die Muskelmanschette um den lateralen Skapularand, die weitgehend unversehrt bleiben sollte, potenziell mit der Applikation von Cutting Guides interferiert. Cutting Guides können im Fibula- und Beckenbereich vergleichsweise einfach auf der Lateralseite des Os ilium oder auf dem lateralem Rand der Fibula angebracht werden. Ein zu umfängliches Ablösen der Muskelmanschette (M. infraspinatus, Mm. teres minor und major, M. subscapularis) würde die periostale Gefäßversorgung aus der A. circumflexa scapulae von der Knochenoberfläche ablösen und zu einer Devaskularisation des lateralen Skapulaknochens führen.

Die einfachste Möglichkeit, das virtuelle Design von Skapulatransplantaten aus der Computersimulation in die Operation übertragbar zu machen, ist die Verwendung von Stereolithografiemodellen (STL-Modelle) der Neomandibel bzw. Neomaxilla (► Abb. 5.44). Diese STL-Modelle sind sterilisierbar und dienen als intraoperative Referenz, um die Form und Größe des Skapulatransplantats manuell kopieren zu können. STL-Modelle des Schädels mit entsprechender Defektsituation können zusätzlich zur intraoperativen Kontrolle der korrekten Dimension des Transplantats dienen, zudem kann eine Rekonstruktionsplatte präoperativ vorgebogen werden.

Wesentlich genauer kann die virtuelle Planung durch Entnahmeschablonen ausgeführt werden, die als Folgeschritt zu den STL-Modellen, die als einfache Kopiervorlage für eine komplett freihändige Entnahme und Segmentierung dienen, zu verstehen sind. Solche **uniplanaren Cutting Guides** dienen dazu, den Rah-





**Abb. 5.43 Beckenkammtransplantat.** Sekundäre Rekonstruktion der Symphysen- und Korpusregion des Unterkiefers rechts mit einem mikrovaskulär reanastomosierten Beckenkammtransplantat. **a** virtuelles Defektmodell von anterior. **b** virtuelles Defektmodell von kaudal. **c** virtuelle Rekonstruktion mit einem 2-segmentalen Beckenkammtransplantat von anterior. **d** virtuelle Rekonstruktion mit einem 2-segmentalen Beckenkammtransplantat von kaudal. **e** Computer-aided Design (CAD) der Entnahme- und Segmentierungsschablone (Cutting Guide) von anterior. **f** Computer-aided Design (CAD) der Entnahme- und Segmentierungsschablone (Cutting Guide) von lateral-posterior gesehen. Der Cutting Guide weist 2 Anteile auf, die über einen Bügel miteinander verbunden sind. **g** Cutting Guide in situ. **h** entnommenes Beckenkammtransplantat mit Cutting Guide.

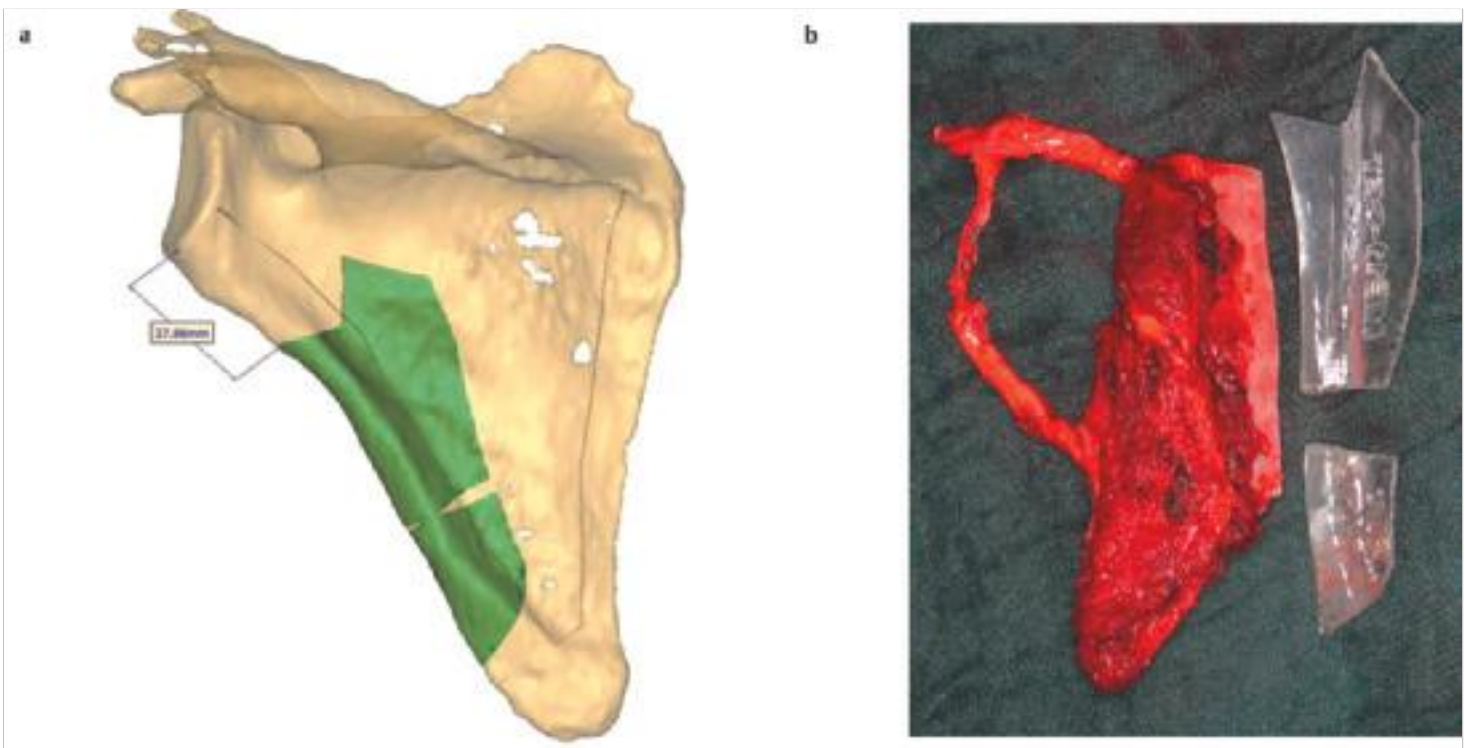


Abb. 5.44 Skapulatransplantat. a Virtuelle Planung eines Skapulatransplantats (grün). b STL-Modelle als Vorlage für die freihändige Transplantatentnahme.

men des Transplantats auszuschneiden, wobei die Segmentierung weiterhin freihändig erfolgt.

Hierfür wird nach Durchtrennung der Insertion des M. teres major und Nachverfolgung des Gefäßstiels in die Axilla der M. infraspinatus ca. 2–3 cm parallel zum lateralen Skapularand eingeschnitten. Der Muskel wird medially abpräpariert und die Knochenoberfläche im Bereich des dünnen Schulterblatts exponiert. Zwei zusätzliche schräge Muskelninzisionen zum darunterliegenden Knochen in Richtung Glenoid und Skapulaspitze öffnen einen 3-eckigen Korridor, in dem der Cutting Guide auf dem lateralen Skapularand platziert werden kann. Der Cutting Guide besteht aus Pfosten, die über eine stangenähnliche Verbindung miteinander verbunden sind, die mit ihrer Innenseite den Rahmen des Transplantats definiert. Die Pfosten sind mit Fußplatten versehen, die auf den Knochen aufgesetzt und über Schrauben fixiert werden können, um eine sichere Verankerung des Cutting Guides zu gewährleisten (► Abb. 5.45).

In einem weiteren Entwicklungsschritt kann mit den Cutting Guides neben der Transplantatentnahme auch die Segmentierung geführt werden (► Abb. 5.46). Soll dabei nicht nur die Skapulaspitze vom lateralen Skapularand mit ihren jeweiligen Versorgungen über die A. circumflexa scapulae bzw. den Ramus angularis separiert werden, sondern auch eine Osteotomie zur Segmentierung im Bereich der zu erhaltenden Muskelmanschette erfolgen, hat sich das Design eines **biplanaren Cutting Guides** bewährt (► Abb. 5.47). Dieser besteht gleichfalls aus einer Basis-komponente, die den Rahmen des Transplantats umschneidet, sowie einer aufsteckbaren Segmentierungshilfe. Die Segmentierungshilfe lässt aber zusätzlich zur Osteotomie und Abtrennung der Skapulaspitze eine Osteotomie von der Medialseite zu, bei der die für die Knochenversorgung wichtige infraglenoidale Muskelmanschette erhalten werden kann.

Nachdem das gesamte Knochensegment in toto mit Weichgewebe, Gefäßversorgung und dem Cutting Guide entnommen wurde, erfolgen die Osteotomien zur Segmentierung des Transplantats. Als Erstes erfolgt die Osteotomie im kritischen Bereich der Muskelmanschette von medial her. Dazu werden zunächst behutsam schmale Streifen der infraglenoidalen Muskelmanschette über der geplanten Osteotomiestelle abpräpariert, worauf die Keilosteotomie innerhalb des entstandenen Muskel-tunnels über die Flächen der Führungshilfe erfolgt. Die Enge innerhalb der Muskelhülle kann dabei die vorgegebene Osteotomie erschweren. Anschließend erfolgt die zweite Osteotomie zur Abtrennung des Skapulaspitzenareals von posterior her, unter Zuhilfenahme einer schlitzförmigen Führungshilfe. Dies gelingt in der Regel einfacher als die erste Osteotomie, da keine Muskelmanschette erhalten werden muss und die Osteotomiestelle nach Abpräparation der posterioren Muskulatur gut überblickbar ist. Abschließend wird die aufsteckbare Komponente des Guides abgenommen, und es erfolgen die abschließenden vertikalen Osteotomien innerhalb der Basiskomponente und die Abnahme derselben.

#### Praxistipp

In der Praxis ist zu beachten, dass die Arbeitslänge der verwendeten Instrumente, seien es oszillierende Sägen oder piezoelektrische Sägen, ausreichend lang dimensioniert sein müssen.



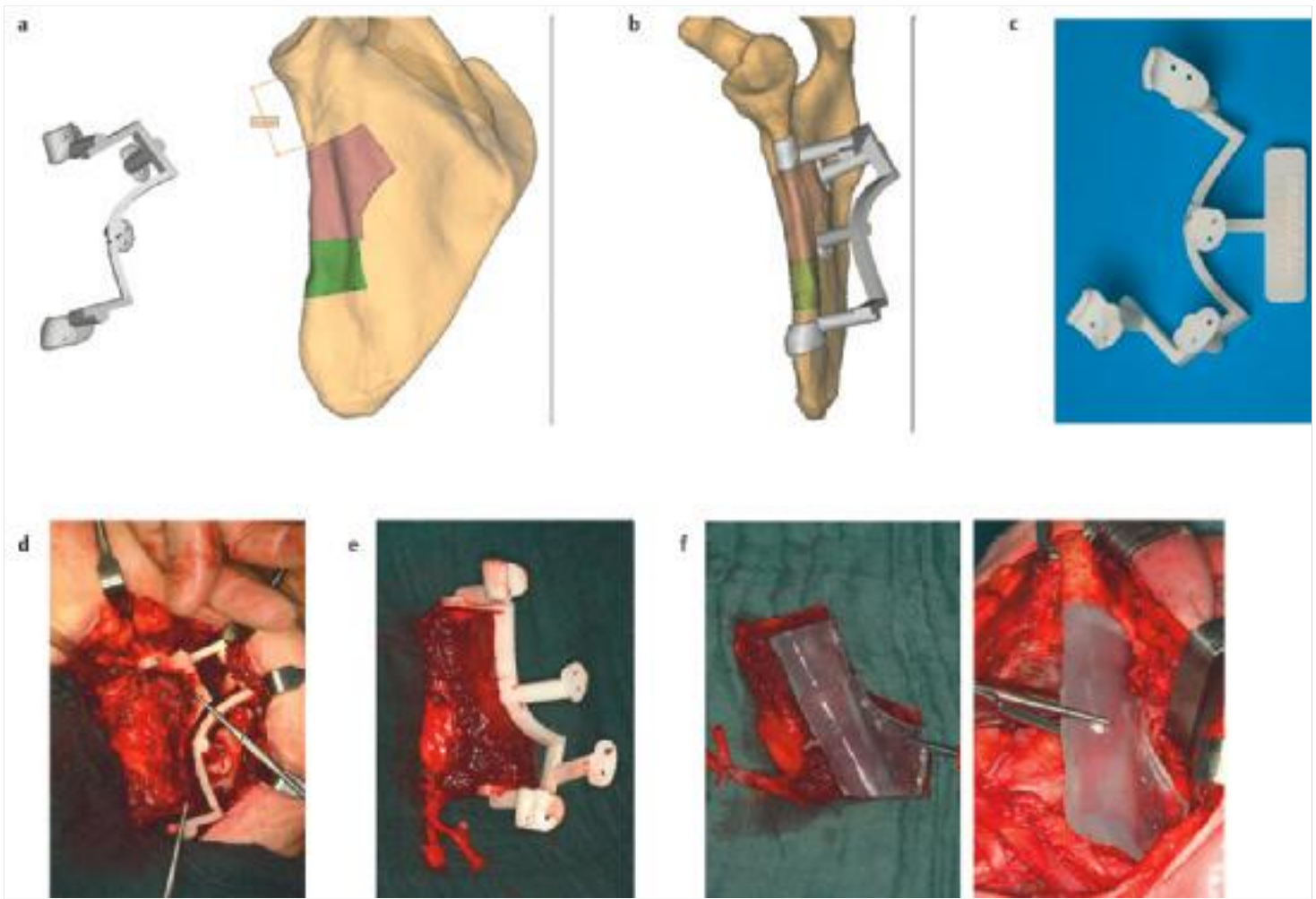


Abb. 5.45 Uniplanarer Cutting Guide zur Entnahme eines Skapulatransplantats. Die Umschneidung des Rahmens erfolgt geführt, die Segmentierung freihändig. a geplantes Transplantat (violett, grün) und entsprechend designer Cutting Guide. b geplantes Transplantat (violett, grün) und der Cutting Guide. c CAD/CAM-gefertigter Cutting Guide. d Cutting Guide in situ. e mit Cutting Guide entnommenes Transplantat. f STL-Modell zur intraoperativen Qualitätskontrolle; rechts: im Bereich des Unterkieferdefekts, links: am entnommenen Skapulatransplantat.

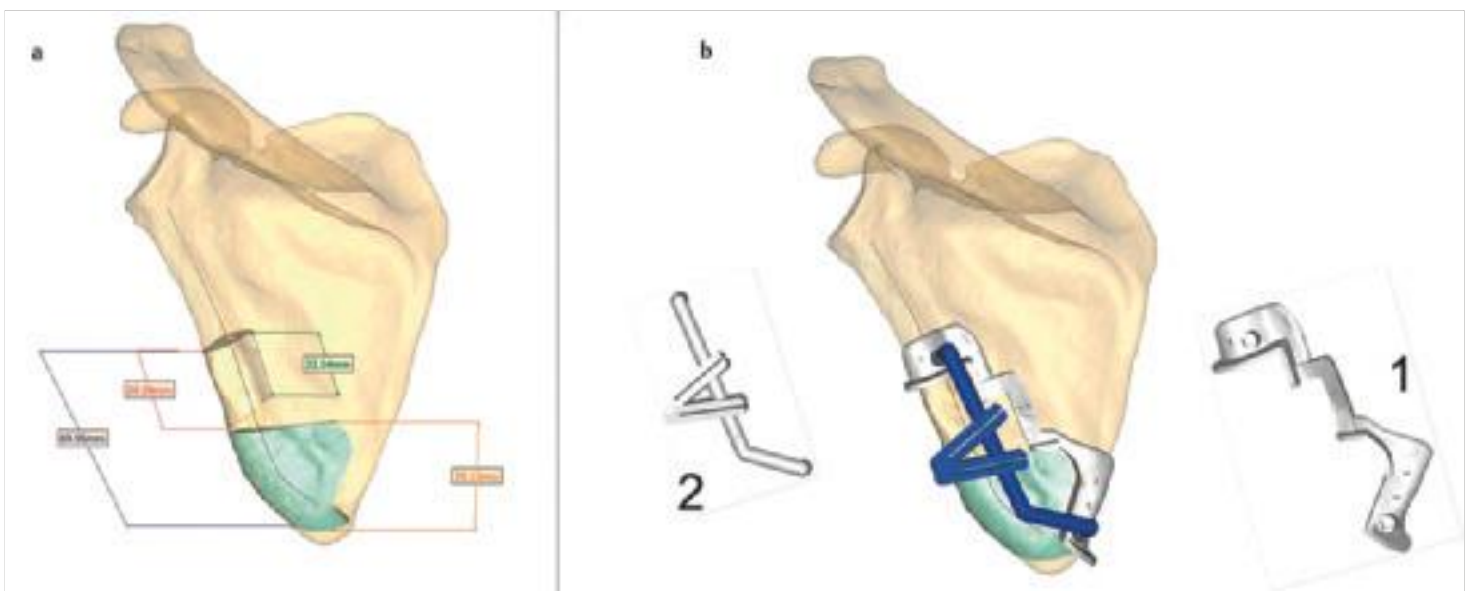
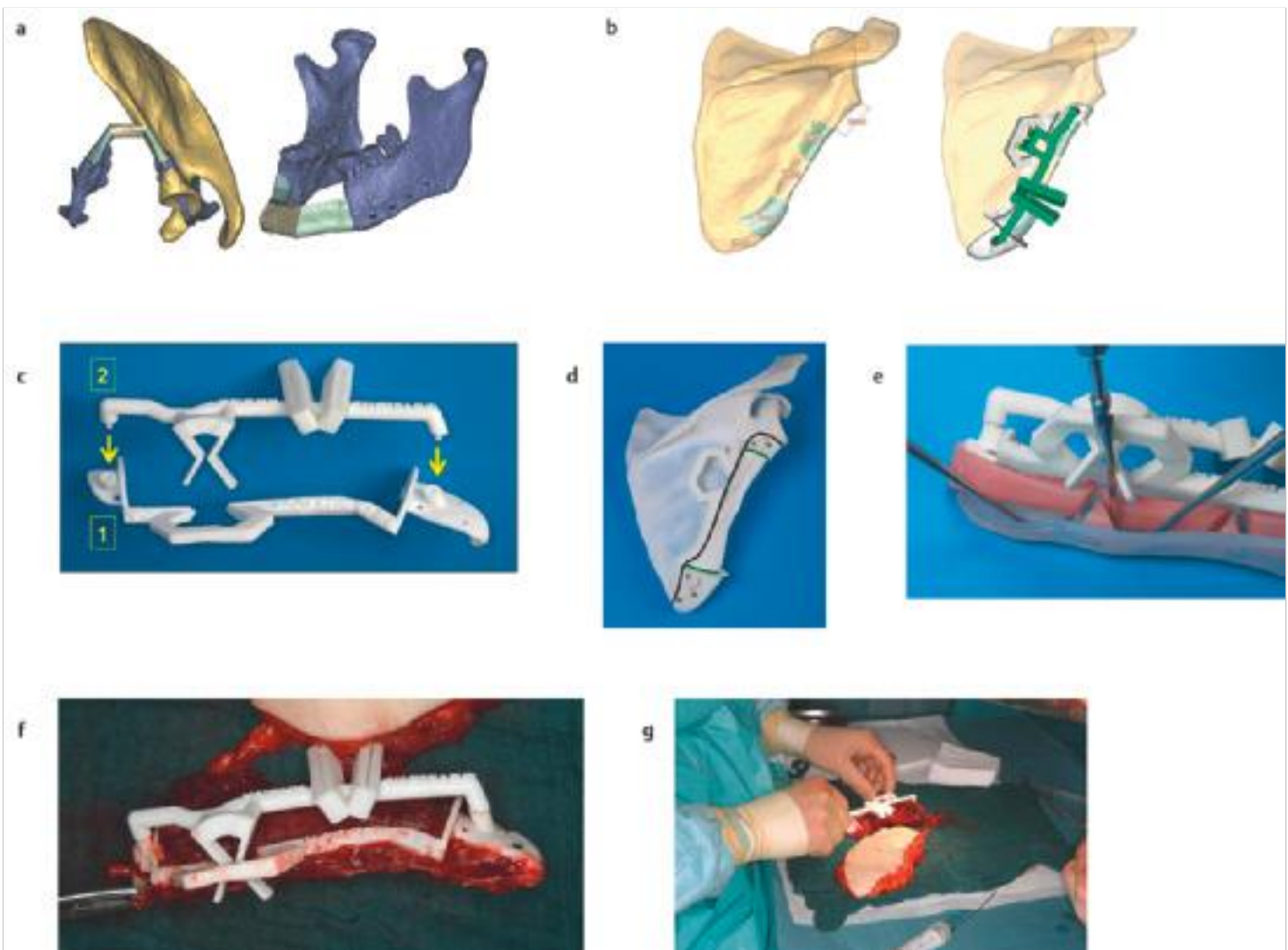


Abb. 5.46 Uniplanarer Cutting Guide zur Entnahme und Segmentierung eines Skapulatransplantats. Der Cutting Guide besteht aus einer Basiskomponente (1) und einer aufsteckbaren Komponente (2), die über schlitzartige Führungshilfen zur Segmentierung mittels schließender Osteotomie („closing osteotomy“) beiträgt. Dabei wird die Skapulaspitze, die separat über den Ramus angularis der A. thoracodorsalis versorgt wird, vom restlichen lateralen Skapularand abgetrennt, ohne die Muskelmanschette zu kompromittieren.



**Abb. 5.47 Biplanarer Cutting Guide zur Entnahme und Segmentierung.** Cutting Guide zur Entnahme und 3-fach-Segmentierung eines Skapulatransplantats zur Rekonstruktion des Unterkiefers bei Defekt von Korpus links, Symphyse und Korpus rechts (B-S-B Defekt nach Urken). **a** virtuelle Planung (Fa. DePuy Synthes ProPlan CMF Software) mit Überlagerung von Skapula und Unterkiefer und CAD eines 3-segmentalen Skapulatransplantats. **b** geplante Skapulasegmente (links) und CAD-Cutting-Guide (rechts), bestehend aus Basiskomponente (weiß) und aufsteckbarer Komponente (grün). **c** Die Segmentierungskomponente des Guides (2) wird auf die Basiskomponente (1) aufgesteckt. **d** Zunächst wird die Basiskomponente des Cutting Guide festgeschraubt und – in situ – der Rahmen im Überschuss umschritten (schwarze Linie). Nach der Segmentierung des Transplantats erfolgt zuletzt das Ausschneiden des definitiven Transplantats nach vertikaler Osteotomie innerhalb des Rahmens (grüne Linien). **e** Am Modell wird verdeutlicht, wie die Osteotomie im kritischen Bereich der Muskelmanschette von medial her erfolgt. **f** Kombination Knochensegment mit Weichgewebe, Gefäßversorgung – ex situ –, mit aufgeschraubtem komplettem Cutting Guide. **g** Die Segmentierungen erfolgen ex situ am Beistelltisch.

### Merke



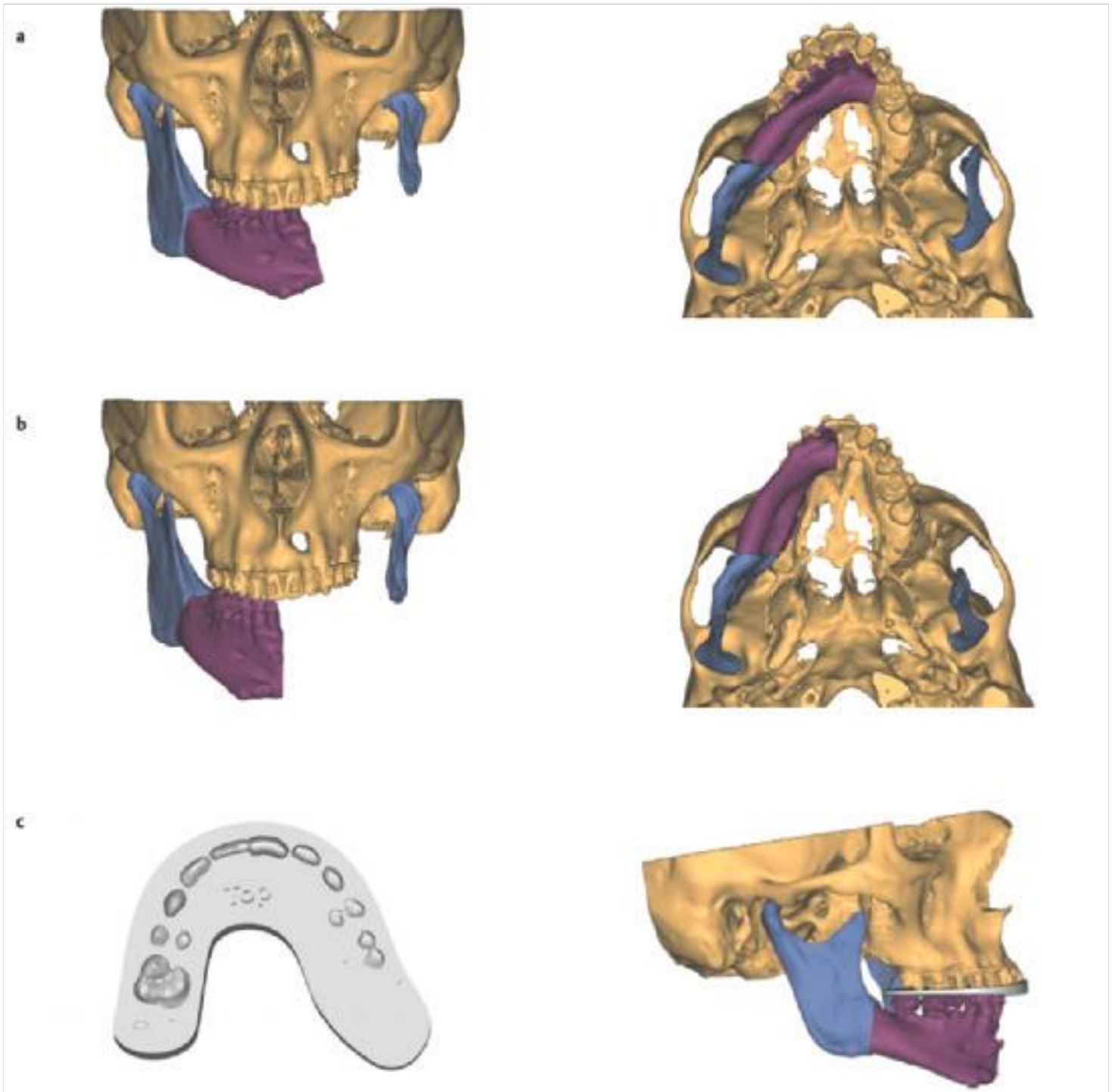
Während Osteotomien, bei denen die Skapulaspitze mit ihrer eigenen Gefäßversorgung über den R. angularis abgetrennt wird, unproblematisch sind, ist bei Osteotomien im Bereich des lateralen Skapularands darauf zu achten, dass die Muskelmanschette erhalten bleibt, um die Perfusion des darunterliegenden Knochens (muskuloperiostale Gefäße aus der A. circumflexa scapulae) nicht zu gefährden. Das Design eines 2-teiligen biplanaren Cutting Guides, das einen weitestgehenden Erhalt der Muskelmanschette erlaubt, trägt diesem Aspekt Rechnung.

### Positionierungsschablonen

Mithilfe von Positionierungsschablonen kann zum einen die virtuell geplante Lage einer Osteotomielinie und entsprechender Osteotomieebenen in den OP-Situs übertragen werden. Im Gegensatz zu Resection Guides und Segmentation Guides ermöglichen Positionierungsschablonen aber auch eine Verlagerung osteotomierter Segmente in Bezug auf ihre Umgebung. Deshalb finden Positionierungsschablonen typischerweise in der orthognathen Chirurgie oder bei Eingriffen zur Korrektur von kongenitalen oder posttraumatischen Fehlbildungen und Fehlstellungen Verwendung. Auch im Rahmen der Wiederherstellung von Ober- und Unterkieferstrukturen können Positionierungsschablonen sinnvoll eingesetzt werden.

Im Unterkieferbereich können Fehlstellungen von knöchernen Segmenten über okklusale Splinte korrigiert werden, wobei der Oberkiefer als Referenz verwendet wird (► Abb. 5.48). Dabei erfolgen in der Planungssoftware zunächst die virtuelle Reposition der Kiefersegmente und nachfolgend das CAD eines entsprechenden okklusalen Splints. Alternativ können, nach virtueller Reposition, Repliken der fehlenden Kieferabschnitte als Positionierungshilfen verwendet werden (► Abb. 5.49). Da es im Ober-

kieferbereich schwierig sein kann, das geplante Transplantat an die richtige Lokalisation zu bringen, können auch hier Positionierungshilfen eine wertvolle Option darstellen. Darüber hinaus kommen individualisierten Implantaten, beispielsweise CAD/CAM-gefertigten Rekonstruktionsplatten, eine wichtige Rolle bei der intraoperativen Umsetzung der Reposition von Kiefersegmenten zu (siehe auch Kap. 5.3).



**Abb. 5.48 Okklusaler Splint.** a Zustand nach Unterkieferteilresektion links bei multizentrischer kongenitaler Myofibromatose und Rekonstruktion mittels freien Beckenkammtransplantats. Aktuell: deformierter Unterkiefer mit deutlicher Okklusionsstörung und Unterkieferdefekt mit Fehlstellung des zahntragenden Anteils rechts und des gelenktragenden Anteils links. b virtuelle Reposition des zahntragenden Anteils rechts und des gelenktragenden Anteils links. c CAD eines okklusalen Splints als intraoperative Übertragungshilfe zur Reposition.