

Moderne Behandlung des Keratokonus

von

Univ.-Doz. Dipl.-Ing.(TU) Dr. med. univ. Albert Daxer (1,2,3)

1. Daxer International Keratoconus Center

3370 Ybbs, Stauwerkstraße 1

4600 Wels, Salzburger Straße 65

2. Universitätsklinik für Augenheilkunde und Optometrie

Medizinische Universität Innsbruck

6020 Innsbruck, Anichstraße 25

3. DIOPTEx Medizinprodukte Forschungs-, Entwicklungs- und Vertriebs GmbH

4020 Linz, Baumbachstraße 6

Zusammenfassung

Es wird ein Fall von beidseitigem Keratokonus nach Corneal Crosslinking bds und ineffektiver Ringsegment-Implantation am linken Auge vorgestellt. Das ineffektive Ringsegment wurde entfernt, um stattdessen mittels CISIS eine Hornhauttasche zu schaffen. In diese wurde ein MyoRing implantiert. Anhand des Fallbeispiels werden die aktuellen Therapiemöglichkeiten einschließlich der Unterschiede zwischen Ringsegmenten und MyoRing ausführlich diskutiert.

Einleitung

Keratokonius ist in Europa und Nordamerika eine seltene Erkrankung, von der nur 1 von 1000 bis 2000 Einwohnern betroffen ist.¹ Es gibt endemische bis epidemische Regionen der Welt, insbesondere den Nahen und Mittleren Osten, wo Keratokonius mit Inzidenzraten bis in den zweistelligen Prozentbereich wesentlich häufiger auftritt.²

Es ist, ausgehend von einem relativ häufig vorkommenden aber exemplarischen Fall, die Aufgabe dieser Arbeit, einen aktuellen Erkenntnisstand über den Keratokonius und die derzeit zur Verfügung stehenden Behandlungsmethoden zu vermitteln.

Fallbericht

Ein 27-jähriger schweizer Patient mit manifestem Keratokonus an beiden Augen kam in die Keratokonussprechstunde meiner Ordination. Er hatte sich an einer Universitätsklinik seines Heimatlandes einem Crosslinking beidseits zum Stopp der Progression der Erkrankung und einer Ringsegment-Implantation (ICRS) in die linke Hornhaut zur visuellen Rehabilitation unterzogen. Er gab an, dass er seit der ICRS-Behandlung schlecht sehe und sich sein Sehvermögen am behandelten Auge im Laufe des ersten postoperativen Jahres noch weiter verschlechtert habe und er mit dem Ergebnis nicht zufrieden sei. Am rechten Auge trägt er eine Kontaktlinse, mit der er gut zurechtkommt. Mit der Kontaktlinse am linken Auge findet er sich nicht zurecht. Daher möchte er, dass dort die Ringsegmente entfernt werden und ein MyoRing (SehRing) implantiert wird.

Der Patient wurde mit folgendem Befund vorstellig:

Rechts 1.0 mit $-5.75s -1.75c \times 170^\circ$ und 0.05 sc

Links 0.3 mit $-12.0s -7.75c \times 170^\circ$ und 0.2 sc

Die Topographie des linken Auges mittels Pantacam (Oculus GmbH, Deutschland) ergab zu diesem Zeitpunkt SIM K1 = 46.9, SIM K2 = 52.2 und die Hornhautdicke an der dünnsten Stelle betrug 447 Mikrometer.

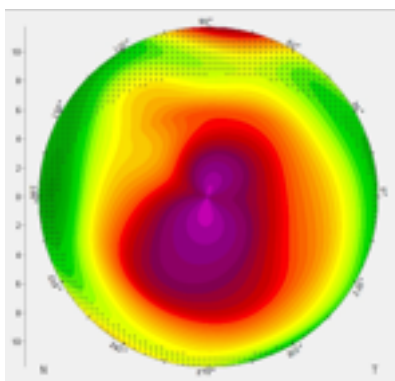


Abbildung 1: Sagittale Hornhaut-Topographie am linken Auge mit Ringsegment und nach Crosslinking.

Nach der vom Patienten zu Recht geäußerten Erkenntnis, dass die durchgeführte ICRS-Therapie ineffektiv sei, wurden die eingesetzten Ringsegmente in meiner Ordination entfernt, indem der Zugang zum zirkulären Tunnel über die bereits vernarbte radiäre Inzision wieder eröffnet wurde und ebendort die Segmente aus dem zirkulären Tunnel herausgezogen wurden. Anschließend wurde die radiäre Inzision bei 12h in der Hornhaut mit 10-0 Nylon vernäht.

Die Nähte wurden nach vier Monaten entfernt.

Nach weiteren zwei Monaten wurde eine CISIS-Operation mit MyoRing-Implantation in Tropfanästhesie durchgeführt. Dabei wurde mit dem PocketMaker Ultrakeratom (DIOPTEX GmbH, Austria) eine lamelläre, praktisch vollständig geschlossene Hornhauttasche von 9 mm Durchmesser in 300 Mikrometer Hornhauttiefe in der Hornhaut derart angelegt, dass über einen temporalen, nur 4 mm schmalen, lamellären Zugang ein MyoRing (DIOPTEX GmbH, Austria) von 6 mm Durchmesser und 300 Mikrometer Stärke in die Hornhauttasche eingesetzt werden konnte. Abschließend wurde der MyoRing innerhalb der Hornhauttasche, gemäß den Schulungsrichtlinien der Herstellerfirma, unter Einbeziehung des Schnittpunktes der optischen Achse mit der Hornhautvorderfläche bei aktiver Fixierung des Auges mit einem geeigneten Operationsmikroskop zentriert.

CISIS mit MyoRing-Implantation zeichnet sich durch ein völlig anderes chirurgisches Vorgehen als bei der Implantation von Ringsegmenten (ICRS) aus.

Der international patentierte MyoRing ist **kein Ringsegment (ICRS)**, sondern ein geschlossenes Vollringimplantat mit zwei sich a priori ausschließenden Eigenschaften: Er ist einerseits sehr steif mit einem hohen effektiven Elastizitätsmodul, um die Hornhautgeometrie verändern zu können, und zugleich flexibel (Formgedächtnis), um trotzdem durch eine kleine lamelläre Öffnung biomechanisch neutral in die Hornhaut implantiert werden zu können.

Wie später noch ausführlich diskutiert wird, benötigt die MyoRing-Implantation – (CISIS) – im Gegensatz zu ICRS – keine Nähte zum Verschluss der Hornhaut, da die Öffnung nicht radiärpotentiell klaffend und hornhautschwächend, sondern lamellär und biomechanisch neutral und daher (ähnlich wie bei *clear corneal incision* bei Kataractoperationen) selbstverschließend ist. Außerdem besteht bei CISIS im Gegensatz zu ICRS kein zirkulärer Tunnel, in den die Implantate eingebracht

werden, sondern eine Hornhauttasche, um das System in einem biomechanischen Gleichgewicht zu halten. Dadurch lassen sich typische ICRS-Komplikationen wie Extrusionen und *corneal melting* vermeiden. Die Hornhauttasche bei CISIS hat keine räumliche Ausdehnung, sondern ist vielmehr ein virtueller, auch biomikroskopisch nicht sichtbarer Spalt, der sich ohne Volumen zwischen vorderer und hinterer Hornhautlamelle befindet.

Dies stimmt mit einem LASIK-flap überein, wo es ebenfalls kein Volumen zwischen vorderer (flap) und hinterer (stromal bed) Hornhautlamelle gibt. Der Unterschied der Hornhauttasche bei CISIS im Vergleich zum LASIK-flap liegt vielmehr darin, dass bei LASIK durch die breitflächige Eröffnung des lamellären Schnittes die Hornhaut geschwächt wird, während die Hornhauttasche bei CISIS praktisch rundherum geschlossen und daher biomechanisch neutral ist.

Drei Monate nach CISIS mit Implantation eines MyoRings hatte der Patient auf dem operierten linken Auge einen unkorrigierten Visus von 0.7 der bis dato, rund zwei Jahre nach dem Eingriff, praktisch unverändert geblieben ist:

Links 0.9 mit +1.0s -1.5c x 175° und 0.7 sc

Weiters ergaben die K-Werte SIM K1 = 41.3 und SIM K2 = 44.7 mit einer Hornhautdicke von 440 Mikrometer.

Die Topographie der bislang letzten Untersuchung am operierten Auge ist in Abbildung 2 dargestellt. Am nicht operierten rechten Auge zeigte sich gegenüber dem Zeitpunkt der Erstkonsultation keine Befundänderung.

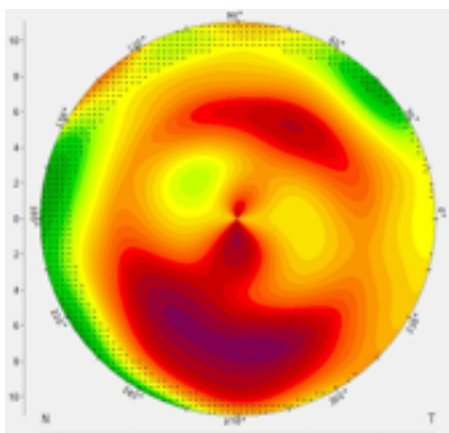


Abbildung 2: Sagitale Hornhauttopographie bei der bislang letzten Untersuchung 2 Jahre nach der MyoRing-Implantation und 2 ½ Jahre nach der Ringsegment-Entfernung.

Diskussion

Keratokonius ist eine Erkrankung der Hornhaut, die im Wesentlichen durch folgende zwei Eigenschaften charakterisiert ist: ³

1. Sehschwäche
2. Progredienz

Die normale Hornhaut besteht aus rund 200 regulär geschichteten Kollagenlamellen. Sie ist entscheidend für die optische Funktion des Auges^{4,5}, welche auf der Transparenz und der optischen Brechkraft (Dioptrien) der Hornhaut basiert. Die Transparenz der Hornhaut ist durch eine spezielle, kurzreichweitige Anordnung der Kollagenfibrillen innerhalb der Kollagenlamellen, ähnlich einem Flüssigkristall, gewährleistet⁶ und hängt mit der Hornhautgeometrie zusammen, wobei sie im Wesentlichen indirekt proportional zum zentralen Hornhautradius ist.⁷ Bei einem normalen Auge liegen über 40 Dioptrien, also rund 2/3 der Gesamtbrechkraft des Auges von über 60 Dioptrien, an der Hornhautoberfläche. Geringe Änderungen der Hornhautgeometrie können daher schon zu erheblichen Beeinträchtigungen der Sehkraft führen.

Solange die Hornhautoberfläche noch einigermaßen regulär gekrümmt ist, kann eine Refraktionsanomalie (Kurzichtigkeit, Weitsichtigkeit) mit einer Brille ausgeglichen werden. Ist aber die Hornhautoberfläche wie beim Keratokonius irregulär gekrümmt, so kann bei zunehmender Irregularität auch mit einer Brille keine ausreichende Sehkraft mehr gewährleistet werden. Die pathologischen Veränderungen der Hornhaut und der Verlust der Sehkraft beim Keratokonius hängen mit dem Verlust der regulären (orthogonalen) Schichtung der Kollagenlamellen im Hornhautstroma zusammen.⁸ Ab einer gewissen Irregularität der Hornhautgeometrie kommen nach klassischer Vorgehensweise, sobald eine Brillenkorrektur nicht mehr möglich ist, harte Kontaktlinsen zum Einsatz. Dabei werden die Irregularitäten der Hornhautoberfläche durch den Tränenfilm unter der Kontaktlinse optisch weitgehend ausgeglichen und die herabgesetzte optische Funktion der Hornhaut wird dann im Wesentlichen durch die optische Qualität der Kontaktlinse bzw. der Kontaktlinsenvorderfläche ersetzt. Da der Keratokonius aber progredient ist und die

Hornhaut immer irregulärer, spitzer und dünner wird, erreicht man oft den Punkt, an dem selbst eine Kontaktlinse auf der Hornhaut nicht mehr stabil bleibt.

Nach klassischer Lesart ist dies der Moment, an dem häufig eine Hornhauttransplantation (Keratoplastik) durchgeführt wird. Allerdings sind die Ergebnisse nach Keratoplastiken hinsichtlich der optischen Funktion in vielen Fällen ebenfalls sehr variabel und nicht zufriedenstellend.^{9,10,11} Außerdem erweisen sich sowohl Kontaktlinsen als auch die Keratoplastik sowie die dadurch verursachten Krankenstände, Arbeitsausfälle und Arbeitsmängel als volkswirtschaftlich sehr teuer.

An diesem Punkt setzen nun spezielle Hornhautimplantate wie Ringsegmente (ICRS) und der MyoRing (CISIS) an. Ziel ist es, durch einen minimal invasiven Eingriff die Phase zwischen Kontaktlinse und Keratoplastik zu überbrücken bzw. eventuell Kontaktlinsen und Keratoplastik durch einen effektiven, sicheren und minimal invasiven Eingriff weitgehend überflüssig zu machen.

Ringsegmente (ICRS) wurden ursprünglich zur Behandlung niedriger Kurzsichtigkeiten bis -4 Dioptrien entwickelt und eingesetzt.^{12,13,14} Aufgrund der vergleichsweise geringen Vorhersagbarkeit der Ergebnisse wurden sie rasch durch Behandlungen mittels Excimer-Laser wie PRK und LASIK, deren Entwicklung ungefähr zur gleichen Zeit stattfand, ersetzt.^{15,16,17} Erst Anfang der 2000er Jahre begann man, ICRS für die Behandlung des Keratokonus einzusetzen.¹⁸

Die grundsätzliche Wirkungsweise der ICRS beruht auf der zentralen Verkürzung der Bogenlänge der Hornhaut durch Addition von Volumen in der Hornhautperipherie (Abbildung 3).



Abbildung 3: Schematische Darstellung der Verkürzung der Bogenlänge bei Einbringen eines peripheren Volumens in die Hornhaut.

Durch die Addition von peripherem Volumen müssen die Kollagenlamellen einen Umweg um das Volumen (Implantat) nehmen. Dieser Umweg fehlt der Bogenlänge der Hornhaut im Zentrum, das dadurch abgeflacht wird und dementsprechend die Brechkraft der Hornhaut verändert.

Im Fall des Keratokonus zeigt sich bei ICRS auch eine gewisse Regularisierung der Hornhaut, die zu einer postoperativen Sehverbesserung führen kann.¹⁸

Einen im Vergleich dazu völlig neuartigen Ansatz bei der Behandlung des Keratokonus stellt die Entwicklung von MyoRing und CISIS dar, die auf einer neuartigen Technologie aus Österreich beruht.¹⁹

Dabei wird, anders als bei ICRS, kein zirkulärer Tunnel mit Zugang über eine radiäre Keratotomie erzeugt, über den die Segmente in den zirkulären Tunnel eingebracht werden. Bei CISIS wird mit dem PocketMaker Ultrakeratom ein praktisch nach außen hin abgeschlossener lamellärer Schnitt im Hornhautinneren (Hornhauttasche) in Form eines virtuellen Spaltes von 9 mm Durchmesser in 300 Mikrometer Tiefe erzeugt. In diese Hornhauttasche wird über einen temporalen, lamellären Zugang von nur 4 mm Breite der MyoRing in die Hornhauttasche implantiert. Hierzu wird der MyoRing vor der Implantation mit einer Spezialpinzette so komprimiert, dass er durch den 4mm breiten Zugang in die Hornhauttasche eingebracht werden kann.

Normalerweise würde ein derart hartes Material, aus dem der MyoRing besteht und das notwendig ist, um eine ausreichende geometrische Anpassung der Hornhaut zu erreichen, bei dieser Kompression brechen. Der MyoRing ist aber technologisch so konzipiert, dass er zwei grundsätzlich gegensätzliche Eigenschaften vereint. Er ist zum einen sehr steif, um die Stabilisierung der Zielhornhautgeometrie zu ermöglichen, und gleichzeitig kompressibel (Formgedächtnis), um durch einen schmalen Zugang implantiert werden zu können. Nach der Implantation nimmt der MyoRing wieder seine ursprüngliche, kreisrunde Form an. Das PocketMaker Ultrakeratom ist extrem präzise und kann eine geeignete Hornhauttasche für die MyoRing-Implantation mit 9 mm Durchmesser in 300 Mikrometer Tiefe selbst bei Hornhäuten mit sehr fortgeschrittenem Keratokonus und stark herabgesetzten Hornhautdicken von nur 350 Mikrometer sicher und präzise schneiden. Bei einer Hornhautdicke unter 350 Mikrometer hilft nur mehr eine Keratoplastik weiter.

Der MyoRing ist ein Vollringimplantat und kann daher logischerweise nicht in einen zirkulären Tunnel wie ICRS, sondern muss in eine Hornhauttasche implantiert werden. CISIS bzw. der MyoRing hat daher gegenüber ICRS hinsichtlich Effektivität und Sicherheit erhebliche klinische und biomechanische Vorteile. Deshalb kommt es relativ häufig vor, dass Ringsegmente wegen Ineffektivität durch einen MyoRing ersetzt werden müssen oder dieser sogar gelegentlich ohne Entnahme des ineffektiven Ringsegmentes zusätzlich implantiert wird.²⁰

Gelegentlich wird als Argument für ICRS und gegen den MyoRing die Tatsache angeführt, dass bei ICRS die Hornhaut nur peripher, entlang der zirkulären Tunnel „bearbeitet“ wird und die zentrale Hornhaut unberührt bleibt, während man bei CISIS und dem MyoRing auch das Zentrum durch die Schaffung einer Hornhauttasche von 9 mm Durchmesser miteinbezieht. Dazu muss man sagen, dass auch bei LASIK ein flap durch das Hornhautzentrum erzeugt wird. Der lamelläre Schnitt durch das Hornhautzentrum an sich, sei es bei LASIK in Form eines flap oder bei CISIS in Form einer geschlossenen Tasche, führt zu keiner optischen Beeinträchtigung oder Behinderung.^{21,22} Der Unterschied der Hornhauttasche bei CISIS zum LASIK-flap ist vielmehr biomechanischer Natur, da bei LASIK durch die breitflächige Eröffnung des lamellären Schnittes die Hornhaut geschwächt wird (flap), während der lamelläre Schnitt bei CISIS praktisch rundherum geschlossen (Tasche) und daher biomechanisch neutral ist.

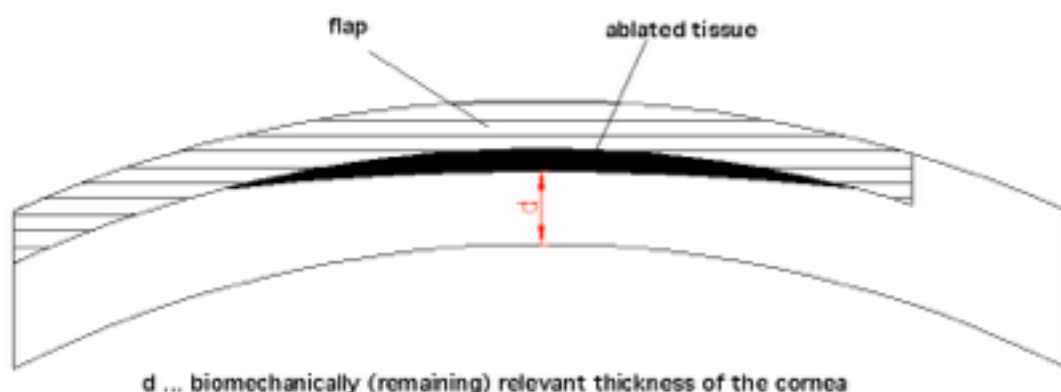


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Hornhautquerschnittes nach LASIK. Der strichlierte Bereich zeigt den Hornhautlappen (flap) der breitflächig eröffnet wurde, (vertikaler Einschnitt von der Hornhautoberfläche). Das durch den Excimer-Laser abgetragene Gewebe (ablated tissue) ist schwarz dargestellt.

Dies erschließt sich aus Abbildung 4. Da der Hornhautlappen (flap), der breitflächig von der Hornhaut abgelöst wurde, nicht mehr anwächst, ist die verbleibende biomechanisch wirksame Hornhautdicke d wesentlich kleiner als die anatomische und die Hornhaut ist bei LASIK genau um die Flapdicke plus abgetragenem Gewebe geschwächt.^{23,24}

Bei CISIS verhält es sich völlig anders. Da der lamelläre Schnitt bei CISIS (Tasche) nicht breitflächig eröffnet ist, bleibt auch die Biomechanik erhalten, und die biomechanisch wirksame Hornhautdicke entspricht, wie Abbildung 5 zeigt, der anatomischen.^{24,25}

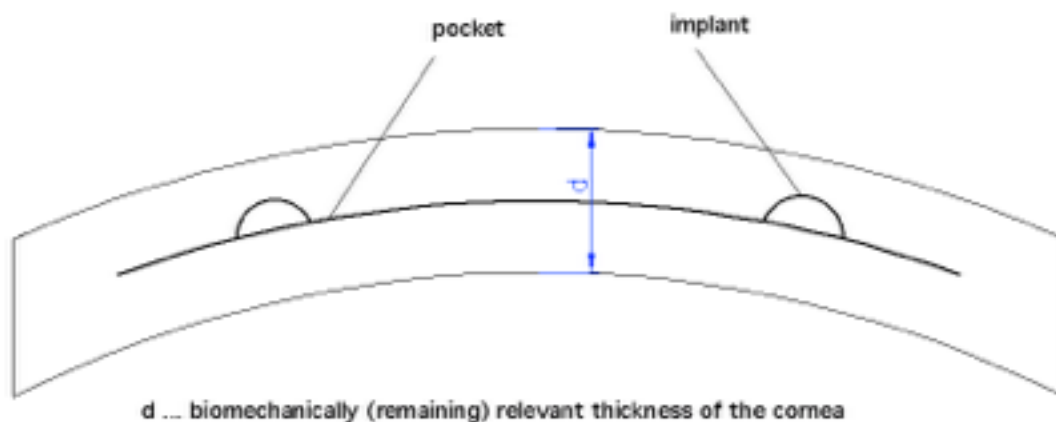


Abbildung 5: Bei CISIS wird eine praktisch geschlossene Hornhauttasche erzeugt.

Eine Hornhauttasche bei CISIS ist daher anatomisch und biomechanisch ein „inverser“ flap, wie Abbildung 6 zeigt. Während bei LASIK die breitflächige Eröffnung des lamellären Schnittes in Form eines flap ist, der nur noch über den schmalen *hinge* mit dem Hornhautgewebe verbunden ist, was keine Kraftübertragung zwischen vorderer Hornhautlamelle und der verbleibenden Hornhaut erlaubt, ist es bei CISIS

lediglich eine schmale Öffnung (*tunnel*), die den Zugang zu dem sonst praktisch über den gesamten Umfang abgeschlossenen lamellären Schnitt (Tasche) ermöglicht. Im Gegensatz zu LASIK ist daher bei CISIS die Kraftübertragung zwischen vorderer Lamelle und der sonstigen Hornhaut ungestört.^{23,24,25}

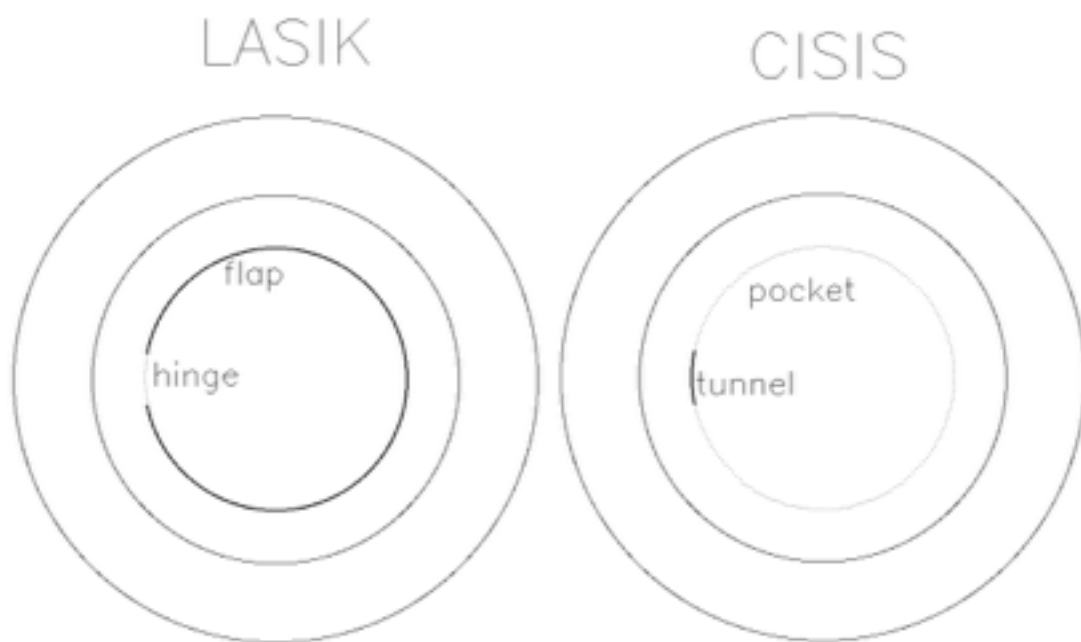


Abbildung 6: Biomechanische Gegenüberstellung von LASIK und CISIS.

Die gelegentlich anzutreffende falsche Annahme von Augenärzten, die davon ausgehen, dass ein flap bei LASIK und eine Hornhauttasche bei CISIS hinsichtlich ihrer biomechanischen Wirkung gleichzusetzen wären, ist daher auf ein gewisses Unwissen hinsichtlich der biomechanischen Gesetzmäßigkeiten und nicht auf eine physikalische oder medizinische Realität zurückzuführen. Es ist daher bei einem lamellären Schnitt in der Hornhaut biomechanisch und klinisch völlig gleich, wie tief dieser ist oder welche Ausdehnung er hat, solange er praktisch um den gesamten Umfang, so wie bei einer Hornhauttasche von der Hornhautoberfläche, abgeschlossen ist.^{23,24,25} Dies ergibt sich auch unmittelbar aus Abbildung 7, denn bei der Hornhaut wird der transkorneale Druck, der sich aus der Differenz zwischen Augeninnendruck und Luftdruck ergibt, in eine parallel zur Hornhaut verlaufende Zugspannung (*tension*) umgewandelt.²⁴ Das ist der tiefere Grund für die besondere

Anordnung der Kollagenfibrillen in der Hornhaut in weitgehend orthogonal geschichteten Lamellen, da auf diese Weise das Gewebe optimal an die Kräfteverteilung angepasst ist.^{8, 24}

Ein zirkulärer Tunnel bei ICRS ist daher weder optisch noch biomechanisch gegenüber einer Hornhauttasche bei CISIS vorteilhaft.

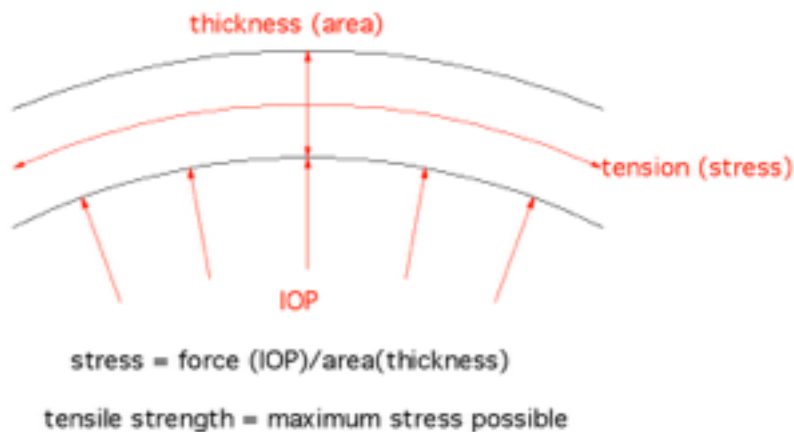


Abbildung 7: Kraftverteilung innerhalb der Hornhaut.

Vielmehr ist es so, dass durch das Einbringen der Ringsegmente in den zirkulären Tunnel ein biomechanischer Ungleichgewichtszustand erzeugt wird, der sowohl für typische ICERS-Komplikationen wie Extrusionen und Hornhauteinschmelzungen verantwortlich ist, als auch die mangelhafte Effektivität der Segmente im Vergleich zum MyoRing erklärt. Abbildung 8 stellt die Problematik dar.

Die Hornhaut verformt sich solange um den MyoRing, bis das System Hornhaut – MyoRing wieder in einem neuen biomechanischen Gleichgewicht ruht. Dazu muß sich die vordere und hintere Lamelle entlang der Schnittfläche der Tasche gegeneinander verschiebend auf das neue biomechanische Gleichgewicht einstellen können.

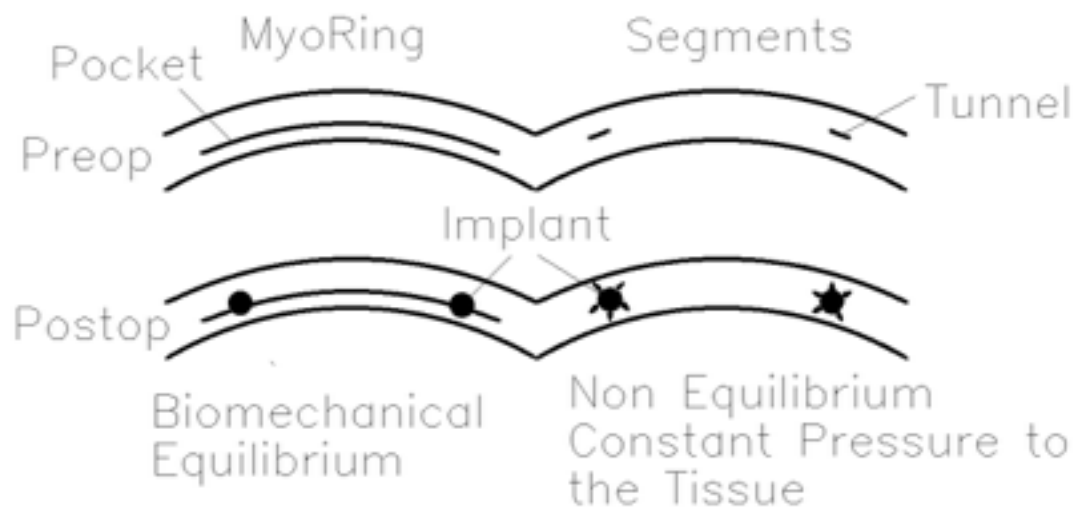


Abbildung 8: Gegenüberstellung der biomechanischen Verhältnisse bei der Behandlung mit MyoRing (CISIS) und Segmenten (ICRS).

Im Gegensatz dazu wird bei der Implantation von Ringsegmenten in einen zirkulären Tunnel lokal ein Gewebsdruck auf das umliegende Gewebe ausgeübt, der zu entsprechenden Druckatrophien führen kann, was sich klinisch in Extrusionen und Hornhauteinschmelzungen über dem Implantat äußert.²⁶ Dies ist beim Keratokonus umso bedeutsamer, da Segmente im Gegensatz zum MyoRing logischerweise über Enden verfügen, auf die durch Drehmomentkräfte infolge der irregulären Hornhautgeometrie zusätzliche Druckkräfte auf die vordere Hornhautlamelle wirken, was die Gefahr der Gewebseinschmelzung durch Druckatrophie noch zusätzlich erhöht. Komplikationen wie Gewebseinschmelzungen und Extrusionen, die für ICRS typisch sind, kommen daher bei MyoRing-Implantationen praktisch nicht vor.^{23,27} CISIS ist deshalb im Vergleich zu ICRS in Bezug auf die Behandlung des Keratokonus nicht nur wesentlich sicherer, sondern auch in allen Stadien der Erkrankung effektiver.^{23,27,28,29,30,31}

Ein weiterer bedeutsamer Grund für die deutlich erhöhte Effektivität von CISIS gegenüber ICRS ist die Tatsache, dass der MyoRing mithilfe der echten postoperativen optischen Achse zentriert werden kann und alle drei möglichen Freiheitsgrade der Optimierung (Implantatdurchmesser, Implantatdicke,

Implantatposition) nutzen kann. Bei ICRS steht dem Chirurgen hingegen nur ein Freiheitsgrad (Implantatdicke) zur Optimierung zur Verfügung.²⁵

Daher ist es bei CISIS immer möglich, das für jeden einzelnen Patienten optimale Ergebnis zu erreichen. Beim Keratokonus kann der Patient die optische Achse bzw. den „Durchblickspunkt“ durch die Hornhaut, also die Fixation, wegen der Irregularität der Hornhaut so festlegen, dass er die für ihn bestmögliche Sehfunktion erreicht. Ändert sich die Hornhautgeometrie, ändern sich auch die optische Achse und der optimale Durchblickspunkt für die Fixation.

Nun wird bei der Implantation von ICRS ihre Position anhand der präoperativen Hornhautgeometrie festgelegt, indem der zirkuläre Tunnel entsprechend der präoperativen Fixation positioniert wird. Die Position der Segmente ist infolgedessen durch die Position des zirkulären Tunnels festgelegt. Durch das Einbringen der Segmente in den zirkulären Tunnel verändern sich aber die Hornhautgeometrie, die Fixation und der optimale Durchblickspunkt auf der Hornhaut. Es gibt jedoch keine theoretische oder praktische Möglichkeit, die postoperative Situation präoperativ zu ermitteln. Die optimale Positionierung der Implantate unter Berücksichtigung der echten postoperativen Verhältnisse ist aber von enormer Bedeutung für das Ergebnis und den erreichbaren Visus. Optimierungen in der Zentrierung von nur 0.5 mm können zum Teil erhebliche Verbesserungen in der Sehfunktion bewirken (Abbildung 9):²⁵

Bei ICRS ist jedoch die postoperative Position der Implantate an die präoperativen Verhältnisse gebunden, was das Erreichen des für den jeweiligen Patienten optimalen Visus ausschließt.

Ganz anders verhält es sich bei der Implantation eines MyoRings. Hier wird der MyoRing mit höchstens 8 mm Durchmesser in eine Hornhauttasche mit 9 mm Durchmesser implantiert und kann dort während der Implantation mit einer geeigneten Pinzette einfach in seiner Position entsprechend der echten postoperativen optischen Achse und Fixation optimiert werden. Dabei fixiert der Patient unter Zuhilfenahme eines geeigneten Operationsmikroskops in geeigneter Weise einen festgelegten Fixationspunkt.

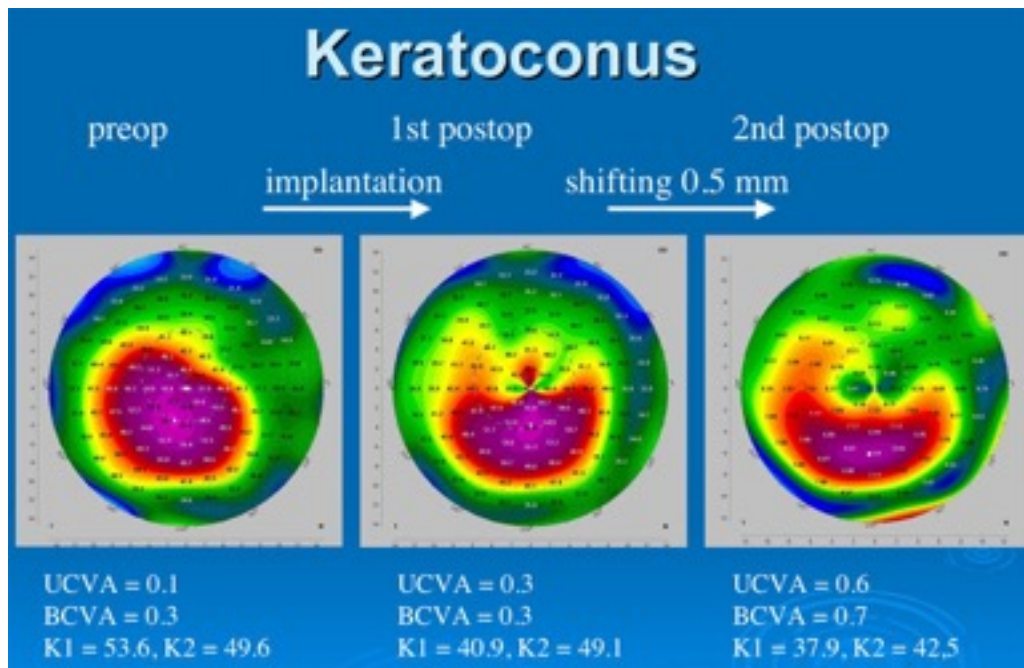


Abbildung 9: Durch eine Optimierung der Position um nur 0.5 mm kann das Ergebnis erheblich verbessert werden.

Der Operateur verschiebt dabei das Implantat so, dass die Position des MyoRings in der Hornhaut auf die nun echte postoperative Fixation des Patienten und den entsprechenden Durchblickspunkt durch die Hornhaut optimiert ist. Diese Optimierung des Ergebnisses kann bei der initialen Behandlung oder zu jedem anderen postoperativen Zeitpunkt erfolgen, da die Hornhauttasche jederzeit einfach eröffnet werden kann und somit das Implantat auch jederzeit einer Optimierung zugänglich ist.²⁵ Dabei ist es gleichgültig, ob es sich um einen zentralen oder dezentralen Keratokonus handelt.³² Dies liegt im Wirkungsmechanismus begründet, der sich in diesem Punkt erheblich von jenem bei ICRS unterscheidet.

CISIS beruht physikalisch auf der mathematischen Disziplin der Topologie, wonach, einfach gesagt, jeder Punkt auf einer „weichen Fläche“, der auf einer geschlossenen starren Struktur aufgespannt ist, durch die Umfangsform der starren Struktur bestimmt ist.^{32,33} Ein Beispiel hierfür ist eine Trommel: Spannt man die weiche Trommelfläche (Trommelhaut) auf das Ende eines rohrförmigen Gebildes erhält man eine Trommel. Jeder Punkt der Trommelfläche ist dabei durch die Geometrie des Rohrendes, auf das die Trommelfläche aufgespannt ist, festgelegt. Ist das Rohrende glatt und in einer Ebene senkrecht zur Rohrachse konfiguriert, erhält man eine optimal plane und regelmäßige Trommelfläche.

Genauso verhält es sich mit der Hornhaut und dem MyoRing. Daher ist ein geschlossener, steifer Ring mit gleichbleibender Stärke (Dicke) entlang seines Umfanges optimal zur Regularisierung der Hornhaut zentral des MyoRings. Wie Abbildung 10 zeigt, braucht man daher bei CISIS nichts über die Art des Keratokonus wissen, da es weitgehend keine Rolle spielt, wie die präoperative „Verformung“ der Hornhaut war, da sie ohnedies dem regelmäßigen Ring aufgezwungen und dadurch entsprechend regularisiert wird.³²

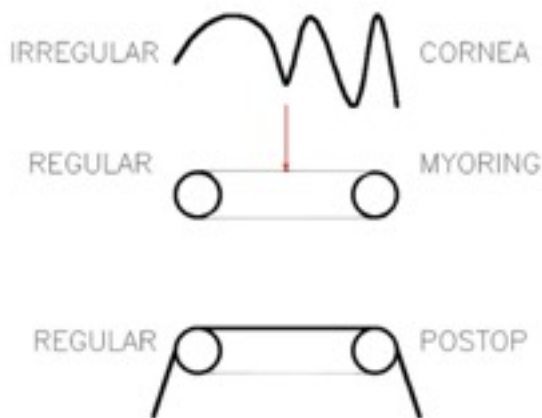


Abbildung 10: Topologischer Wirkungsmechanismus des MyoRings.

Bei Ringsegmenten ist dies nicht der Fall, da diese nicht geschlossen sind und mehr oder weniger in der Hornhaut „schwimmen“. Sie gleichen somit lediglich lokale Inhomogenitäten aus und haben daher komplizierte Nomogramme, um möglichst viele Hornhautgeometrien berücksichtigen zu können.

Das bisher Besprochene erhellt die wesentlichen Aspekte im Hinblick auf die visuelle Rehabilitation beim Keratokonus. Es gibt aber als zweite Charakteristik die progrediente Natur der Erkrankung. Hier wurde in den letzten Jahren durch das Aufkommen des Corneal Crosslinking (CXL) insofern ein Fortschritt erzielt, als es nun möglich ist, beim Keratokonus im Frühstadium die noch gute Sehschärfe weitgehend zu bewahren.^{34,35} Dabei wird normalerweise die Hornhaut deepithelialisiert und auf die so freigelegte Bowmansche Membran wird über eine halbe Stunde Riboflavin aufgetropft und anschließend die riboflavingetränkte Hornhaut mittels UVA-Licht so bestrahlt, dass eine Gesamtdosis von 5.4 J/cm^2 appliziert wird. Durch die Entfernung des Epithels ist die Behandlung bis zu drei Tage

postoperativ z. T. sehr schmerzhaft. Es gibt auch die Möglichkeit, ICRS mit CXL zur Behandlung des Keratokonus zu kombinieren.³⁶

Auch CISIS lässt sich mit CXL kombinieren, wobei durch die dabei notwendige Hornhauttasche, im Gegensatz zur klassischen CXL, das Riboflavin nicht auf die deepithelialisierte Hornhaut getropft werden muss, sondern in die Hornhauttasche eingespült werden kann.^{37, 38} Dadurch kann sowohl die MyoRing-Implantation als auch CXL in einer Sitzung ohne postoperative Schmerzen effektiv behandelt werden. Langzeitbeobachtungen scheinen darauf hinzuweisen, dass es nach einer MyoRing-Implantation auch ohne kombiniertes CXL zu keiner Progression kommt und in vielen Fällen sogar eine postoperative Zunahme der Hornhautdicke zu beobachten ist.

27,39,40

Biomechanische Analysen zeigen, dass dies mit der speziellen Konstruktion des MyoRings als vollständiger geschlossener Ring zusammenhängt.⁴¹ Die Kollagenlamellen in der Hornhaut sind weitgehend orthogonal nach außen zur Hornhautperipherie hin verlaufend angeordnet⁸ und ändern am Limbus ihren Verlauf in zirkuläre Richtung.⁴² Dadurch hat der Limbus ein wesentlich größeres Elastizitätsmodul und eine höhere biomechanische Festigkeit als die zentrale Hornhaut.^{24,43} Ein implantierter MyoRing wirkt daher biomechanisch wie ein zweiter Limbus innerhalb der Hornhaut und ist dadurch in der Lage, die Kräfte, die auf die Hornhaut wirken, auf zwei Flächen aufzuteilen.⁴¹ Dies ähnelt einem Träger, der eine Wohnungsdecke stützt. Auch dieser teilt die Belastung, die auf die Decke wirkt, auf zwei Flächen auf, wodurch sich die Last pro Fläche praktisch halbiert. Ein halber Träger oder ein unvollständiger Träger ist dazu natürlich nicht in der Lage.

Ähnlich ist es bei Segmenten, wo es zu keinem Stopp der Progression kommen kann,^{41,44,45} da die Kraft, die notwendig ist, um die Segmente oder, bei unvollständigen Ringen, die Enden zu separieren, praktisch null ist, während beim MyoRing der hohe Elastizitätsmodul des Materials wegen seiner vollständigen und geschlossenen Konstruktion biomechanisch voll nutzbar ist. Die Implantation eines MyoRings kann daher die Hornhaut, je nach Dimension, um den Faktor 2 bis 3 verstärken, was bedeutet, dass eine Hornhaut mit einer anatomischen Dicke von 400 Mikrometer sich biomechanisch so verhält, als wäre sie 800 bis 1200 Mikrometer dick.^{24, 41} Es ist daher selbst bei suspekten Fällen von Myopie, bei denen keine

Laserbehandlung zur Korrektur der Fehlsichtigkeit erfolgen kann, möglich, die MyoRing-Implantation mit der Laserbehandlung zu kombinieren, um eine möglichst große optische Zone zu erzielen.⁴⁶

Literatur

1. Rabinowitz YS. Keratoconus. *Surv ophthalmol* 1998;42:297-319.
2. Ziaei H et al. Epidemiology of keratoconus in an Iranian population. *Cornea* 2012;31:1044-1047.
3. Krachmer JH, Feder RS and Belin MW. Keratoconus and related noninflammatory corneal thinning disorders. *Surv Ophthalmol* 1984;28:293-322.
4. Komai Y and Ushiki T. The three-dimensional organisation of collagen fibrils in the human cornea and sclera. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 1991;32:2244-2258.
5. Daxer A et al. Collagen fibrils in the human corneal stroma: structure and ageing. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 1998;39:644-647.
6. Fratzl P and Daxer A. Structural transformation of collagen fibrils in the corneal stroma during drying. An x-ray scattering study. *Biophys J* 1993;64:1210-1214.
7. Ronald B. Rabbetts. The eye's optical system. In Bennett&Rabbett's *Clinical Visual Optics*. Butterworth, Heinemann, Elsevier Philadelphia. 4th edition 2007.
8. Daxer A and Fratzl P. Collagen fibril orientation in the human corneal stroma and its implications in keratoconus. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 1997;38:121-129.
9. Kelly TL, Coster DJ and Williams KA. Repeat penetrating corneal transplantation in patients with keratoconus. *Ophthalmology* 2011;118:1538-1542.
10. Rodriguez LA et al. Penetrating keratoplasty versus intrastromal corneal ring segments to correct bilateral corneal ectasia: preliminary study. *J Cataract Refract Surg* 2007;33:488-496.
11. Bahar I et al. Comparison of three different techniques of corneal transplantation for keratoconus. *Am J Ophthalmol* 2008;146:905-912.
12. Blavatskaya ED. Intralamellar homoplasty for the purpose of relaxation of refraction of the eye. *Arch Soc Ophthalmol Optom* 1968;6:311-325 (translated from *Oftalmol Zh* 1966;7:530-537).

13. Nose W, Neves RA, Schanzlin DJ, Belfort R. Intrastromal corneal ring – one year results of first implants in humans: a preliminary non-functional eye study. *Refract Corneal Surg* 1993;9:452-458.
14. Ruckhofer J, Stoiber J, Twa MD, Grabner G. Correction of astigmatism with short arc-length intrastromal corneal ring segments: preliminary results. *Ophthalmology* 2004;110:516-524.
15. Trokel SL, Srinivasan R and Braren B. Excimer Laser Surgery of the cornea. *Am J Ophthalmol* 1983;96:710-715.
16. Seiler T, Berlin MS, Bende T and Trokel S. Excimer laser keratectomy for correction of astigmatism. *Am J Ophthalmol* 1988;105:117-120.
17. Speicher L, Daxer A und Göttinger W. Laserchirurgische Korrektur der Kurzsichtigkeit. Erfahrungen und bisherige Ergebnisse. *Ber. nat.-med. Verein Innsbruck*. 1995;82:335-345.
18. Colin et al. Correcting keratoconus with intracorneal rings. *J Cataract Refract Surg* 2000; 26:1117-1122.
19. www.dioptex.com
20. Behrouz MJ et al. Intacs Followed by MyoRing Implantation in Severe Keratoconus. *J Refract Surg* 2013;29:364-366.
21. Kato N et al. Five-year outcome of LASIK for myopia. *Ophthalmology* 2008;115:839-844.
22. Daxer A, Mahmood H and Venkateswaran RS. Intracorneal continuous ring implantation for keratoconus: one year follow-up. *J Cataract Refract Surg* 2010;36:1296-1302.
23. Reinstein DZ, Archer TJ and Randleman JB. Mathematical model to compare the relative tensile strength of the cornea after PRK, LASIK, and small incision lenticule extraction. *J Refract Surg* 2013;29:454-460.
24. Daxer A. Biomechanics of the cornea. *International Journal of Keratoconus and Ectatic Corneal Diseases* 2014;3:57-62.24.

25. Daxer A. Adjustable Intracorneal Ring in a Corneal Pocket for Keratoconus. *J Refract Surg* 2010;26:217-221.
26. Ferrer C et al. Causes of intrastromal corneal ring segment explantation: clinicopathologic correlation analysis. *J Cataract Refract Surg* 2010;36:970-977.
27. Jabbarvand M, Salamatrad A, Hashemian H, Khodaparast M. Continuous corneal intrastromal ring implantation for treatment in keratoconus in an Iranian population. *Am J Ophthalmol* 2013;155:837-842.
28. Mahmood H, Venkateswaran RS and Daxer A. Implantation of a complete corneal ring in an intrastromal pocket for keratoconus. *J Refract Surg* 2011;27:63-68.
29. Alio JL, Shabayek MH, Artola A. Intracorneal ring segments for keratoconus correction: long-term follow-up. *J Cataract Refract Surg* 2006;32:978-985.
30. Shabayek MH, Alio JL. Intrastromal corneal ring segment implantation by femtosecond laser for keratoconus correction. *Ophthalmology* 2007;114:1643-1652.
31. Shetty R et al. Intacs in advanced keratoconus. *Cornea* 2008;27:1022-1029.
32. Daxer A. MyoRing for central and noncentral keratoconus. *International Journal of Keratoconus and Ectatic Corneal Diseases* 2012;1:117-119.
33. Daxer A. Corneal intrastromal implantation surgery for the treatment of moderate and high myopia. *J Cataract Refract Surg* 2008;34:194-198.
34. Spoerl E, Huhle M, Seiler T. Induction of cross-links in corneal tissue. *Exp Eye Res*. 1998;66:97-103.
35. Vinciguerra P, Albe E, Trazza S, Rosetta P, Vinciguerra R, Seiler T, Epstein D. Refractive, topographic, tomographic, and aberrometric analysis of keratoconic eyes undergoing corneal cross-linking. *Ophthalmology* 2009;116:369-378.
36. Avni-Zauberman N and Rootman DS. Cross-linking and intracorneal ring segments: review of the literature. *Eye Contact Lens* 2014;40:365-370.
37. Daxer A, Mahmood H and Venkateswaran RS. Corneal Crosslinking and Visual Rehabilitation in Keratoconus in One Session without epithelial debridement: New Technique. *Cornea* 2010;29:1176-1179.

38. Studeny P, Krizova D, Stranak Z. Clinical outcomes after Complete Intracorneal Ring Implantation and Corneal Crosslinking in an Intrastromal Pocket in One Session for Keratoconus. *Journal of Ophthalmology* 2014, S1 doi:10.1155/2014/568128.
39. Alio JL, Pinero DP and Daxer A. Clinical outcomes after complete ring implantation in corneal ectasia using the femtosecond laser technology. A pilot study. *Ophthalmology* 2011;118:1282-1290.
40. Daxer A. Corneal thickness after MyoRing implantation for keratoconus. *International Journal of Keratoconus and Ectatic Corneal Diseases* 2014;3:15-19.
41. Daxer A. Corneal Pocket Concept and MyoRing Implantation. Instruction Course IC62 at the Annual Meeting of the European Society of Cataract and Refractive Surgeons (ESCRS) September 14, 2014, London.
42. Aghamohammadzadeh H, Newton RH and Meek KM. X-ray scattering used to map the preferred collagen orientation in the human cornea and limbus. *Structure* 2004;12:249-256.
43. Meek KM. The cornea and sclera. In Fratzl P ed. *Collagen: Structure and Mechanics*. Springer New York, 2010.
44. Alio JL, Vega-Estrada A, Esperanza S, Barraquer RI, Teus MA, Murta J. Intrastromal corneal ring segments: how successful is the surgical treatment of keratoconus? *Middle East Afr J Ophthalmol* 2014;21:3-9.
45. Asbell PA, Uccan ÖÖ. Long-term follow-up of Intacs from a single center. *J Cataract Refract Surg* 2001;27:1456-1468.
46. Daxer A. MyoRing Treatment for Cases of Myopia not eligible for Laser Vision Correction. *International Journal of Keratoconus and Ectatic Corneal Diseases* 2014;3:20-22.