

Therapieversagen nach operativer und konservativer Behandlung von Dens-axis-Frakturen

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin
des Fachbereichs Medizin
der Justus-Liebig-Universität Gießen

vorgelegt von Müller, Tilman

aus Darmstadt

Gießen 2020

Aus der

Klinik für Neurochirurgie

Unter der Leitung von: Prof. Dr. med. Eberhard Uhl

des Fachbereichs Medizin der Justus-Liebig-Universität Gießen

Gutachter: Prof. Dr. med. K. Schöller

Gutachter: Prof. Dr. med. M. Rickert

Tag der Disputation: 14.10.2020

Widmung

*Für Lena, Theodor und Catharina,
die ich über alles liebe und die mich immer unterstützt haben.*

&

*Für meine Eltern, denen ich unendlich dankbar bin und die es mir erst ermöglichten,
diesen so facettenreichen Lebensweg einzuschlagen.*

Inhalt

1	Einleitung.....	1
1.1	Anatomische Grundlagen.....	2
1.1.1	Wirbelsäule.....	2
1.1.2	Atlantookzipitalgelenk.....	4
1.1.3	Atlantoaxialgelenk.....	4
1.1.4	Dens axis.....	6
1.2	Bewegungsmechanik der Halswirbelsäule.....	7
1.3	Epidemiologie der Wirbelsäulenfrakturen.....	10
1.4	Klassifikationen der Frakturen des Axis.....	11
1.4.1	AO-Klassifikation: Einteilung nach dem AOSpine Upper Cervical Classification System.....	12
1.4.2	Frakturen des Dens – Einteilung nach Anderson und D’Alonzo.....	14
1.4.3	Frakturen des Dens – Einteilung nach Eysel und Roosen.....	15
1.5	Diagnostik.....	16
1.5.1	Symptome einer Densfraktur.....	16
1.5.2	Klinisch-neurologische Untersuchung.....	17
1.5.3	Bildgebung.....	18
1.6	Therapie einer Fraktur des Dens axis.....	21
1.6.1	Konservative Behandlungsoptionen.....	21
1.6.2	Chirurgische Behandlungsoptionen.....	27
1.7	Komplikationen und Behandlungsfolgen.....	34
1.7.1	Komplikationen einer konservativen Therapie.....	34
1.7.2	Komplikationen einer operativen Therapie.....	35
1.7.3	Pseudarthrose.....	35
1.8	Beurteilung des Behandlungsziels.....	38
1.9	Fragestellung.....	39
2	Methoden.....	41

2.1	Votum der Ethikkommission	41
2.2	Patientenkollektiv.....	41
2.2.1	Einschlusskriterien	42
2.2.2	Ausschlusskriterien	42
2.2.3	Ausgangsparameter	44
2.2.4	Dichotomisierung der Patienten nach dem CACI-Score	46
2.3	Therapieoptionen.....	47
2.4	Parameter während des Klinikaufenthalts	47
2.5	Parameter bei den Nachuntersuchungen.....	48
2.6	Ergebnisparameter	48
2.7	Statistische Auswertung	49
3	Ergebnisse.....	50
3.1	Charakterisierung der Patientenkohorte.....	50
3.1.1	Altersstruktur	50
3.1.2	Klassifizierung der Densfrakturen	50
3.1.3	Begleitverletzungen und Vorerkrankungen	51
3.1.4	Charlson Comorbidity Index und alterskorrigierter Charlson Comorbidity Index	52
3.1.5	ASIA-Status.....	53
3.2	Therapie	53
3.2.1	Zeitraum zwischen Unfall und Therapiebeginn	53
3.2.2	Therapieentscheidung.....	54
3.2.3	Komplikationen.....	56
3.2.4	Reoperationen innerhalb eines Monats	57
3.3	Zustand der Patienten bei der Entlassung	57
3.3.1	Verweildauer im Krankenhaus	57
3.3.2	ASIA-Score und Nackenschmerzen.....	58
3.3.3	Smiley-Webster-Score	59
3.4	(Re-) Operationen mehr als 30 Tage nach Therapiebeginn.....	60

3.5	Zustand der Patienten bei der Kontrolluntersuchung	60
3.5.1	Mobilität, Nackenschmerzen und Einnahme von Analgetika	61
3.5.2	Radiologische Untersuchung	61
3.5.3	Smiley-Webster-Score	62
3.6	Therapieversagen.....	63
3.6.1	Abhängigkeit vom Alter der Patienten	64
3.6.2	Abhängigkeit vom Geschlecht der Patienten	65
3.6.3	Abhängigkeit vom Typ der Densfraktur	65
3.6.4	Abhängigkeit von der Behandlung	65
3.6.5	Abhängigkeit von der Zugehörigkeit zur Risikogruppe.....	66
3.6.6	Abhängigkeit des Therapieversagens von Alter, CCI und Therapieentscheidung	69
4	Diskussion	70
4.1	Patientenkohorte	71
4.2	Bewertung der Interventionen	72
4.3	Zustand der Patienten bei der Kontrolluntersuchung im Vergleich zur Entlassung	74
4.3.1	Smiley-Webster-Score	74
4.3.2	Knöcherne Konsolidierung des Frakturspalts.....	75
4.4	Prädiktive Faktoren des Therapieversagens	77
4.4.1	Geschlecht und Klasse der Densfraktur haben keinen direkten Einfluss auf das Therapieversagen	77
4.4.2	Der Einfluss der Therapieentscheidung auf das Therapieversagen ist umstritten.....	78
4.4.3	Die Kombination von Alter und Vorerkrankungen hat einen prädiktiven Ausagewert.....	80
4.5	Limitationen der Studie.....	83
4.6	Schlussfolgerung	84
4.7	Ausblick	86
5	Zusammenfassung	87

6	Summary	88
7	Abkürzungsverzeichnis	89
8	Abbildungsverzeichnis	90
9	Tabellenverzeichnis	92
10	Literaturverzeichnis	94
11	Publikationsverzeichnis	107
	Eigenständigkeitserklärung	108
	Danksagung	109
	Lebenslauf	110

1 Einleitung

Bei einem Viertel der Frakturen der Halswirbelsäule ist der zweite Halswirbel (HWK2) involviert (Ersmark und Löwenhielm, 1988). Meist ist die Ursache ein Sturz, dessen Folgen isolierte Axisfrakturen, atlantoaxiale Dislokationen oder eine Spondylolisthesis sein können. In der geriatrischen Population kommt es dabei vor allem zu einer Fraktur des Dens axis (Harrop et al., 2010; Henaux et al., 2012; Hsu und Anderson, 2010; Koech et al., 2008; Osti et al., 2011; Tashjian et al., 2006). Allerdings kommt diese nicht nur in der geriatrischen Population vor. In 9-16 % aller Frakturen der Halswirbelsäule über alle Altersschichten hinweg ist der Dens axis betroffen (Böhler, 1965; Clark und White, 1985; Kortmann et al., 2000; Laurer et al., 2010; Subach et al., 1999).

Die optimale Behandlung einer Fraktur des Dens axis ist umstritten (Maiman und Larson, 1982; Aebi et al. 1989; Roth und Wörsdörfer, 1998; Blauth et al., 1999; Subach et al., 1999; Gedeit, 2001; Shears und Armitstead, 2008; Longo et al., 2010; Huybregts et al., 2013; Molinari et al., 2013; Sime et al., 2014; Bisson et al., 2015). Grundsätzlich kann hier zwischen einer operativen Versorgung mit einer Fixierung des Dens axis und/oder des Atlantoaxialgelenkes und einer konservativen Versorgung unterschieden werden, die eine Ruhigstellung durch eine externe Apparatur gewährleistet.

In der Literatur sind teilweise hohe Raten von Morbidität sowie Mortalität nach operativer Versorgung zu finden, insbesondere bei geriatrischen Patienten. Die operativen Behandlungsverfahren führen jedoch nachgewiesenermaßen zu einer besseren knöchernen Konsolidierung der Fraktur, verglichen mit den konservativen Verfahren (Huybregts et al., 2013).

Nach externer Ruhigstellung mit einer Zervikalorthese finden sich widersprüchliche Ergebnisse mit hohen Raten an ausbleibender knöcherner Konsolidierung der Fraktur. Häufig bildet sich hier jedoch eine stabile Pseudarthrose aus, die dem Patienten keine oder kaum Beschwerden bereitet. Zudem werden Orthesen und Halo-Fixateure gerade von älteren Patienten schlecht toleriert und neben Druckulcera sind Infektionen der Halo-Pins nicht selten (Molinari et al., 2012).

Ob die Komplikationsrate der operativen Verfahren (White et al., 2010) allerdings den Vorteil der besseren Knochenheilung langfristig aufwiegt und somit ein aggressiver Therapieansatz zu einem besseren Ergebnis führt, oder ob sogar eine stabile Pseudarthrose des Dens axis ein akzeptables Behandlungsergebnis darstellt, ist noch ungeklärt. Während radiologisch nach wie vor die knöcherne Konsolidierung des Frakturspaltes als

einzigster valider Therapieerfolg angesehen wird (Gembruch et al., 2019), häufen sich Berichte, nach denen trotz ausbleibender knöcherner Durchbauung des Frakturspaltes ein für den Patienten zufriedenstellendes klinisches Ergebnis erzielt werden kann (Fam et al., 2017).

Weiterhin ist immer noch unklar, welche Faktoren sowohl bei der operativen als auch bei der konservativen Therapie zu einem Therapieversagen bei der Behandlung der Densfraktur führen (van de Kelft, 2019). Um für jeden Patienten die adäquate Behandlungsstrategie zu wählen ist es daher entscheidend, die Ursachen für ein Therapieversagen und dessen Häufigkeiten zu kennen. Es ist daher plausibel, dass nach unterschiedlichen Behandlungsformen von Frakturen des Dens axis prädiktive Faktoren identifiziert werden müssen, um eine optimale und individuelle Behandlung gewährleisten zu können. Zudem fehlen vor allem Langzeitstudien (Donnally et al., 2019), die zeigen, ob die Pseudarthrose auch mehrere Jahre nach dem Ereignis stabil bleibt und es nicht zu einer weiteren Dislokation des Densfragments kommt, was neurologische Ausfälle verursachen könnte (Müller et al., 1998), oder ob das Densfragment früher oder später doch operativ fixiert werden muss.

1.1 Anatomische Grundlagen

1.1.1 Wirbelsäule

Die Wirbelsäule setzt sich aus insgesamt sieben Hals-, zwölf Brust-, fünf Lendenwirbeln, sowie dem Kreuz- und Steißbein zusammen (Schiebler und Korf, 2007; Netter, 2011; Lippert, 2006; Trepel, 2003). Der Physiologie entsprechend nimmt die Größe der Wirbelkörper, analog zur auf der Wirbelsäule an sich lastenden Masse, von oben nach unten zu (Schiebler und Korf, 2007; Netter, 2011; Gertz und Liebman, 2003; Lippert, 2006; Hansen et al., 2006). Alle Wirbel besitzen einen ähnlichen Aufbau aus Wirbelkörper und -bogen, Dorn- und Querfortsätzen. Ausnahmen stellen der erste und zweite Wirbelkörper Atlas und Axis dar (Gertz und Liebman, 2003; Trepel, 2003; Lippert, 2006; Sitzer und Steinmetz, 2011; Masuhr et al., 2013; Mattle und Mumenthaler, 2013).

Die an den Wirbelbögen befindlichen Wirbelgelenke sowie die Bandscheiben, die eine Stoßdämpferfunktion besitzen, und zahlreiche Bänder dienen der Verbindung der Wirbelkörper untereinander (Sitzer und Steinmetz, 2011; Abbildung 1). Zu diesen Bändern gehören das vordere Längsband (Ligamentum longitudinale anterius) an der Vorderseite aller Wirbelkörper, das hintere Längsband (Ligamentum longitudinale posterius) an der Rückseite der Wirbelkörper, die Zwischendornfortsatzbänder (Ligamenta interspinalia)

sowie das Dornspitzenband (Ligamentum supraspinale), welches über sämtlichen Dornfortsätzen zu finden ist. Im Halsbereich wird dieses Band deutlich flächiger und derber in seiner Konsistenz und als Nackenband (Ligamentum nuchae) bezeichnet (Gertz und Liebman, 2003; Trepel, 2003; Lippert, 2006; Sitzer und Steinmetz, 2011; Masuhr et al., 2013; Mattle und Mumenthaler, 2013). Zusätzlich existieren Zwischenbogenbänder (Ligamenta interarcuata), die aufgrund ihrer gelblichen Farbe als Ligamenta flava bezeichnet werden (White und Panjabi, 1978; Martin et al., 2010).

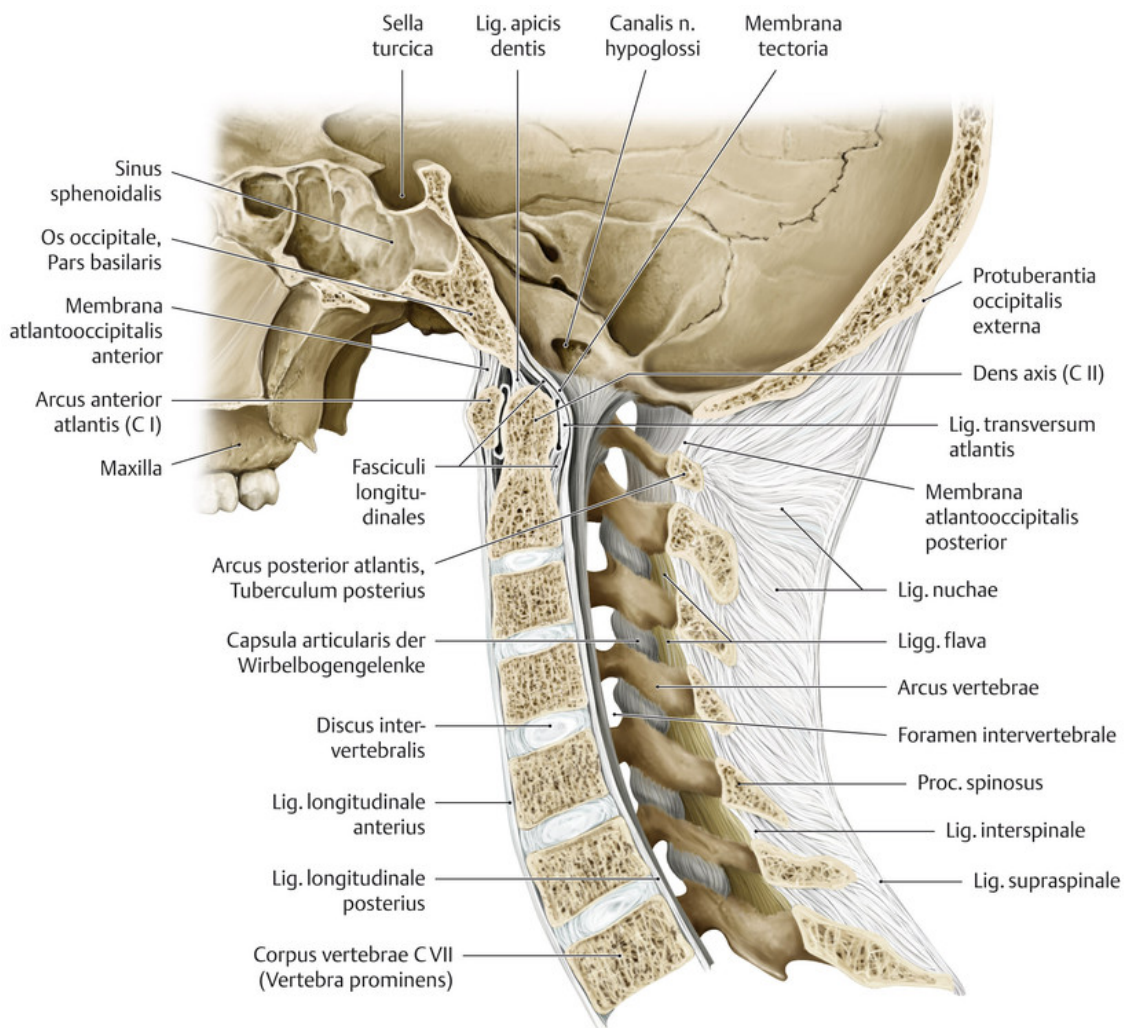


Abbildung 1: Anatomie der Halswirbelsäule und ihrer Begleitstrukturen.

(Schünke et al., 2014)

Der Spinal- oder Wirbelkanal entsteht durch die Aneinanderreihung der Wirbelkörper mit ihren Wirbellöchern. In diesem Raum liegen das Rückenmark und seine umgebenden Häute bis zur Höhe der beiden oberen Lendenwirbelkörper (Schirmer, 2005). Die harte Rückenmarkshaut (Pachymeninx spinalis) mit der Dura mater spinalis und die weiche

Rückenmarkshaut (Leptomeninges spinalis), die aus der Spinnwebhaut (Arachnoidea mater spinalis) und der Pia mater spinalis besteht, schließen das Rückenmark ein.

Klinisch relevant sind die dadurch definierten Räume. So befindet sich zwischen der Knochenhaut (Periost) und der Dura mater spinalis der Peri- bzw. Epiduralraum. In diesem mit Fettgewebe ausgefüllten Raum verlaufen die Spinalnerven zu den entsprechenden Zwischenwirbellöchern. Zusätzlich existiert dort ein ausgeprägter Venenplexus. Der Spalraum zwischen Dura mater spinalis und Arachnoidea mater spinalis wird als Subduralraum bezeichnet. Unter der Arachnoidea mater spinalis liegt der Subarachnoidalraum (Cavitas subarachnoidalis) der Pia mater spinalis auf. Dieser Raum ist mit Liquor cerebrospinalis gefüllt, stellt den äußeren Liquorraum da und reicht bis zum zweiten Sakralwirbel.

Fünf der sieben Halswirbel (HWK3 bis HWK7) entsprechen im Bau der klassischen Wirbelanatomie. Der Hauptunterschied zu den Wirbeln der Brustwirbelsäule liegt in den Processus uncinati. Dabei handelt es sich um knöcherne Vorsprünge an der kranialen Seite des Wirbelkörpers. Die beiden kranialen Wirbel HWK1 und HWK2 weichen im Aufbau deutlich davon ab. Der Atlas bildet zusammen mit dem Os occipitale das obere Kopfgelenk (Atlantookzipitalgelenk) und zusammen mit HWK2 das untere Kopfgelenk (Atlantoaxialgelenk).

1.1.2 Atlantookzipitalgelenk

Das Atlantookzipitalgelenk (oberes Kopfgelenk, *Articulatio atlantooccipitalis*) wird vom Hinterhauptsbein (*Os occipitale*) und dem Atlas gebildet. Es besteht aus zwei spiegelgleichen Teilgelenken und ist hauptsächlich an der Extension und Flexion der Halswirbelsäule beteiligt. Die Teilgelenke werden von den Okzipitalkondylen gebildet, die über die oberen Atlasgelenkflächen gleiten. Zur Stabilisierung dienen das Ligamentum atlantooccipitalis anterius und Lig. a. posterius.

1.1.3 Atlantoaxialgelenk

Das Atlantoaxialgelenk (unteres Kopfgelenk, *Articulatio atlantoaxialis*) unterteilt sich in drei Abschnitte. Das mittlere Gelenk (*Articulatio atlantoaxialis mediana*) setzt sich zusammen aus der *Facies articularis anterior* des Dens axis und der *Fovea dentis* des Atlas bzw. der *Facies articularis posterior* und dem Ligamentum transversum. Die beiden seitlichen Gelenke, die *Articulationes atlantoaxiales laterales* werden von den *Processus articulati* von Atlas und Axis gebildet. Die Besonderheit an diesem Radgelenk ist der Dens axis, ein langer Knochenfortsatz, der maßgeblich die Drehbewegungen in der

Halswirbelsäule ermöglicht, indem der Ring aus Fovea dentis und Ligamentum transversum horizontal um den Dens gleitet (Menezes and Traynelis, 2008).

Das Atlantoaxialgelenk wird durch mehrere Ligamente stabilisiert (Abbildung 2). Die Stabilisierung erfolgt durch das Ligamentum cruciforme atlantis, das aus dem Ligamentum transversum atlantis und den Fasciculi longitudinales besteht, sowie den Ligamenta alaria, dem Ligamentum apicis dentis und der Membrana tectoria (Abbildung 1, Seite 3). Weiterhin gehören das anteriore und das posteriore atlantoaxiale Ligament als Anteile des vorderen und hinteren Längsbandes zum Halteapparat (Ligamentum longitudinale anterius und posterius, Abbildung 1, Seite 3).

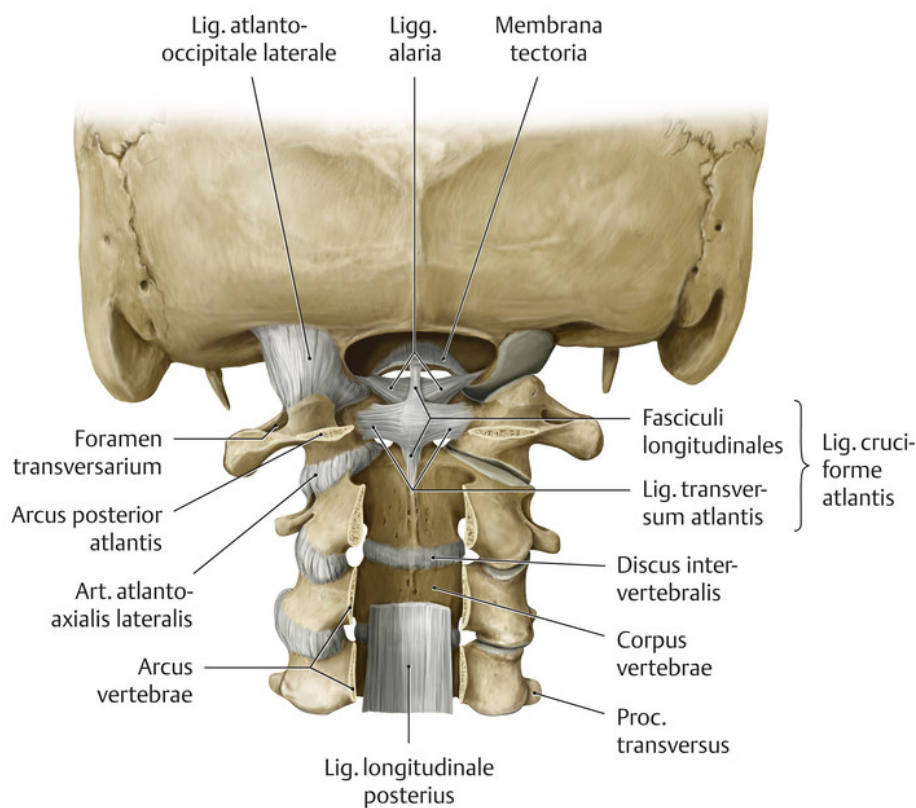


Abbildung 2: Ligamente an den Kopf Gelenken, Ansicht von posterior.

(Schünke et al., 2014)

Die Halswirbelsäule und der Kopf werden von einer Vielzahl von Muskeln bewegt, die in mehrere Gruppen eingeteilt werden. Zur Feinabstimmung der Kopfbewegung sind vor

allein die Muskeln verantwortlich, die direkt an HWK1 und HWK2 inserieren (Abbildung 3) und als kurze Nackenmuskulatur bezeichnet werden. Der Musculus rectus capitis posterior major reicht vom Processus spinosus des Axis zur Linea nuchalis inferior des Os occipitale, der M. rectus capitis posterior minor vom Tuberculum posterius atlantis zur Linea nuchalis inferior, der M. obliquus capitis inferior vom Dornfortsatz des Axis zum Querfortsatz des Atlas und der M. obliquus capitis superior vom Querfortsatz des Atlas zur Linea nuchalis inferior.

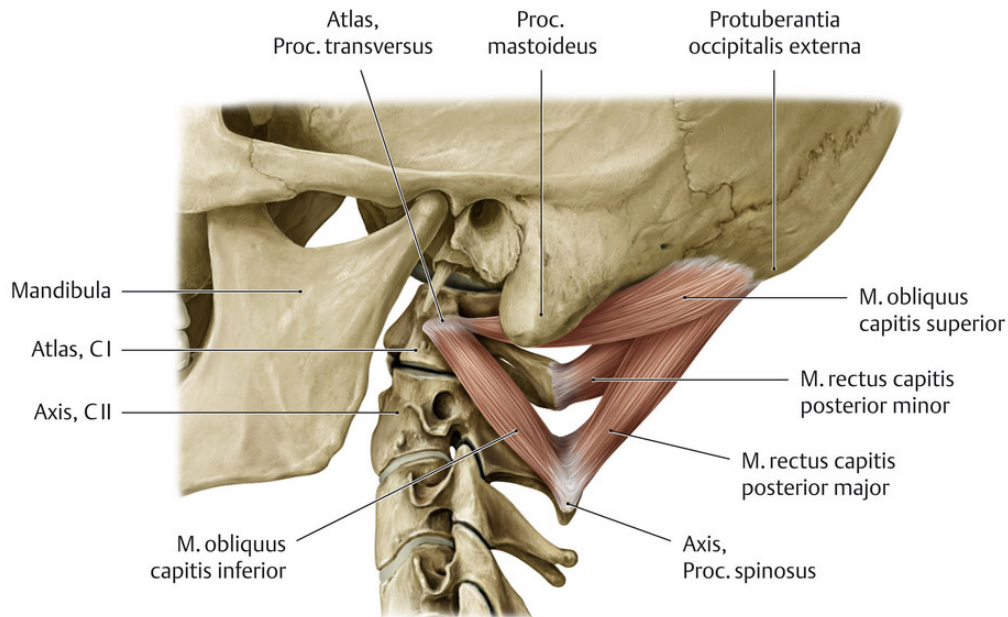


Abbildung 3: Kurze Nackenmuskulatur.

(Schünke et al., 2014)

1.1.4 Dens axis

Der Dens axis weist eine ausgeprägte Heterogenität in seinem Aufbau und seiner Struktur auf. Dies ist auch unter anderem durch histomorphologische Untersuchungen bestätigt worden (Amling et al., 1994). Er wird zu den kurzen Knochen gezählt, da er hauptsächlich aus Substantia spongiosa besteht und nur von einer dünnen Schicht der Substantia corticalis überzogen ist (Trepel, 2003; Schiebler und Korf, 2007; O'Brien et al., 2015; Castellana und Kósa, 1999).

Vor allem in der Basis des Dens kommen häufig frei endende Trabekel, Mikrokallusformationen sowie eine wesentlich dünnere Kortikalis vor, im Vergleich zu den anderen Segmenten des Dens (Abbildung 4). Aus diesem Grund ist dieser Bereich der Densbasis

auch eine Prädilektionsstelle für Frakturen wie der Typ-II-Fraktur nach Anderson und D'Alonzo (Anderson und D'Alonzo, 1974). Weiterhin prädestiniert vor allem der hohe Anteil der Substantia spongiosa für einen osteoporotischen Knochenabbau, der damit einen Risikofaktor für Densbrüche darstellt (Kaesmacher et al., 2017).

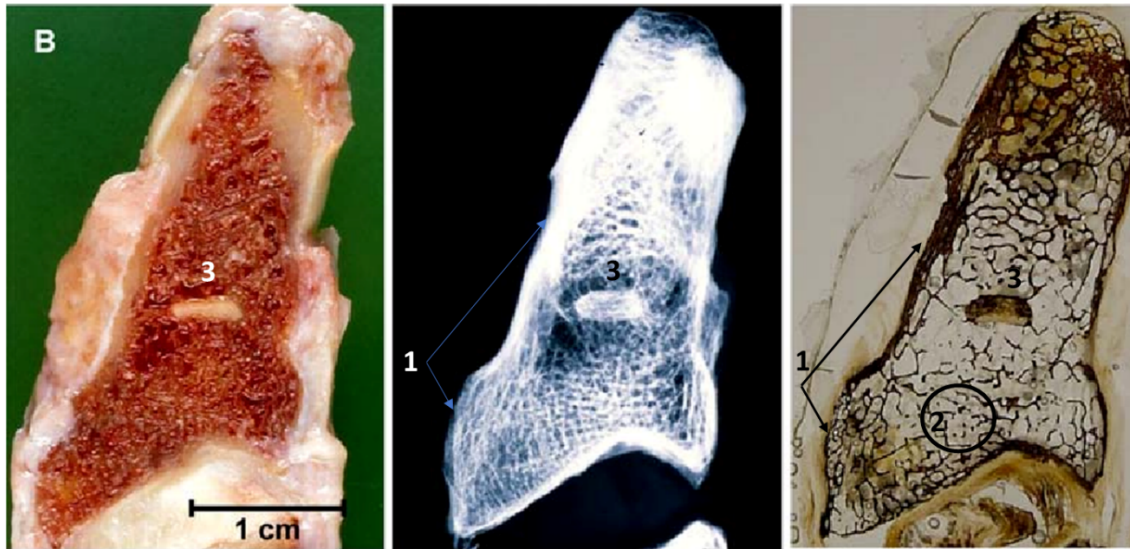


Abbildung 4: Trabekelstruktur des Dens axis.

Medianschnitt des Dens axis eines 52jährigen Mannes. Links: Makroskopisches Erscheinungsbild, Mitte: Kontaktradiogramm, Rechts: Silberfärbung; 1: Kortikalis; 2: frei endende Trabekel; 3: subdentale Synchondrose (nach Gebauer et al., 2005 verändert)

Der Dens axis entwickelt sich aus vier Knochenkernen, wobei die beiden kaudalen den späteren Wirbelkörper und die beiden kranialen den Dens bilden. Zwischen den beiden Bereichen liegt zunächst die subdentale Synchondrose, die bis zum 7. Lebensjahr verknöchert (Connolly et al. 1995). Dennoch häufen sich Berichte, nach denen die Synchondrose auch im Erwachsenenalter noch vorhanden ist; die Inzidenz wird auf bis zu 25 % geschätzt (Jenkins et al., 2019; Nalla et al., 2018; Abbildung 4).

1.2 Bewegungsmechanik der Halswirbelsäule

Hauptaufgabe der Halswirbelsäule ist das Halten des Schädels und seine Bewegung. Das normale Bewegungsausmaß der zervikalen Wirbelsäule liegt bei einer Extension beziehungsweise Flexion von jeweils circa 40°, einer Lateralflexion von jeweils 45° und einer axialen Rotationsfähigkeit von je 75-80° (Dvořák und Grob, 1999). Es gibt unterschiedliche Bewegungsmöglichkeiten in den jeweiligen entsprechenden Halswirbelsäulenabschnitten, die gesondert betrachtet werden können.

Bogduk und Mercer teilen die Halswirbelsäule in unterschiedliche Bereiche ein, die alle eine eigene Bewegungskomponente zur Gesamtbeweglichkeit der Halswirbelsäule beitragen (Bogduk und Mercer, 2000). Das atlantookzipitale Gelenk erlaubt lediglich eine Extension und Flexion, die auf der Basis von Messungen an Leichenmaterial mit jeweils 14–15° angegeben werden kann (Bogduk und Mercer, 2000). Diese Bewegung beruht auf den konvexen Kondylen des Okziput, die in den konkaven Gelenkflächen des Atlas gleiten können (Abbildung 5), dabei wird von einem Eigelenk gesprochen. In allen anderen Bewegungsebenen verhält sich das atlantookzipitale Gelenk als eine mehr oder weniger starre Einheit.

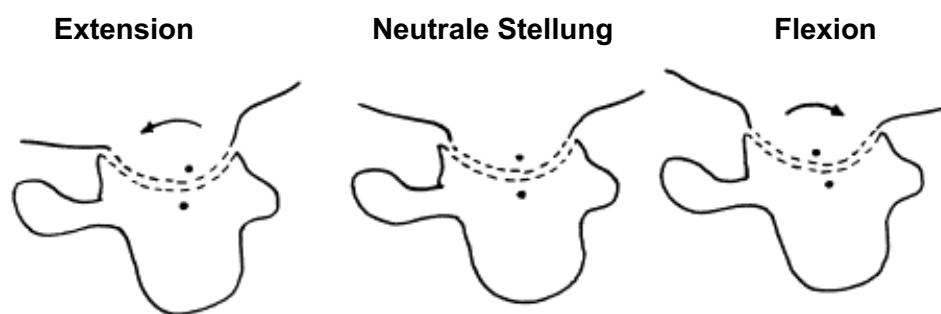


Abbildung 5: Flexion und Extension des atlantookzipitalen Gelenks, Ansicht lateral von rechts.

Links: Extension, Mitte: neutrale Stellung; rechts: Flexion; gestrichelt: Artikulationsflächen, Punkte: Referenzpunkte. (Bogduk und Mercer, 2000)

Die Hauptfunktion der Atlantoaxialgelenke liegt in der axialen Rotation. Dazu muss der anteriore Bogen des Atlas um den Dens des Axis gleiten (Abbildung 6). Diese Bewegung wird durch die Articulationes atlantoaxiales laterales unterstützt. Der Musculus longus colli an der ventralen Seite des Halses zwischen Atlas und dem dritten Brustwirbel ist der einzige Muskel, der unter anderem an den Tuberkeln für das transversale Ligament der Processus transversi des Atlas inseriert und diesen bewegt, der Muskel hat aber selbst keinen Antagonisten. Die Bewegung des Atlantoaxialgelenkes erfolgt so meist indirekt über die Bewegung des Kopfes (Bogduk und Mercer, 2000).

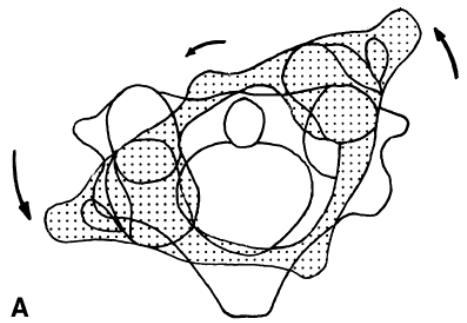


Abbildung 6: Atlantoaxiale Rotation; Aufsicht.

Gepunktet: Atlas gleitet um den Dens des Axis (weiß) (Bogduk und Mercer, 2000).

Mit einem Ausmaß von circa 40–47° zu beiden Seite macht dies wiederum in etwa 50 % des insgesamt möglichen Bewegungsumfanges der Rotation der Halswirbelsäule aus (Lippert, 2006). Zusätzlich sind die Atlantoaxialgelenke ebenfalls zu einer Flexion sowie Extension im Stande. Dies wird dadurch ermöglicht, dass der vordere Atlasbogen bei der Extension bis zur Spitze des Dens axis hoch gleitet (Tscherne und Blauth, 2006). Eine isolierte Bewegung der beiden Kopfgelenke wird jedoch in der Regel nicht durchgeführt, vielmehr handelt es sich um ein Zusammenspiel der gesamten Halswirbelsäule.

So wird die Flexion-Extension vor allem durch das erste Kopfgelenk und die Wirbelgelenke zwischen HWK4 und HWK6 ermöglicht, die axiale Rotation durch das Atlantoaxialgelenk und die Wirbelgelenke zwischen HWK3 und HWK6 und eine laterale Flexion durch alle Wirbelgelenke, wobei das Atlantookzipitalgelenk mit 3,9° und das Atlantoaxialgelenk mit 1,5° beteiligt sind (Bogduk und Mercer, 2000).

Um während einer Untersuchung den Umfang der Rotation im Atlantoaxialgelenk zu beurteilen, wird am Patienten eine Rotationsbewegung aus maximaler Flexion heraus passiv durchgeführt. Der Normwert hierfür liegt bei etwa 40–47°. Um die Gesamtrotation in den Abschnitten des dritten bis siebten Halswirbelkörpers zu beurteilen, muss mit dem Patienten eine passive Drehung aus maximaler Extension heraus durchgeführt werden. Der Normwert hierfür liegt dann bei circa 30–40° (Dvořák und Grob, 1999).

Die unversehrte Wirbelsäule ist ein sehr stabiles Gerüst. Daher entstehen Wirbelsäulenverletzungen in der Regel erst unter einer größeren Gewalteinwirkung auf den Organismus. Begleiterkrankungen wie die Osteoporose sind allerdings prädisponierende Faktoren, die dazu beitragen können, dass eine Fraktur der Wirbelsäule auch bei weniger großen Gewalteinwirkung eintreten kann. Während bei jungen Patienten meist ein

Verkehrsunfall, ein Sturz aus großer Höhe oder ein Kopfsprung ins flache Wasser für eine Fraktur der Wirbelsäule verantwortlich ist (Ivancic, 2014), reicht bei älteren Patienten mit prädisponierenden Faktoren ein Bagatelltrauma wie ein Sturz aus dem Rollstuhl oder ein Sturz in der Wohnung mit anschließendem Aufschlagen des Kopfes aus (Hsu und Anderson, 2010; Maak und Grauer, 2006; Özkan et al., 2015; Rizivi et al. 2012; Pal et al., 2011).

Der maßgebliche Pathomechanismus der Wirbelsäulenfrakturen ist hierbei eine axiale Kompression sowie extreme Flexion, Extension und/oder Rotation oder auch eine Kombination dieser Bewegungen (Pepin et al., 1985; Baron et al., 2011; Cho und Sung, 2012; France et al., 2012; Singh et al., 2012). Entsprechend werden die subaxialen Wirbelsäulenverletzungen nach der AO-Klassifikation in drei morphologische Typen unterscheiden: Kompressionsverletzungen (Typ A, 5 Subtypen), Versagen des hinteren oder vorderen Zuggurtungsmechanismus durch Läsion eines oder mehrerer der beteiligten Bänder (Typ B, 3 Subtypen), Translationsverletzungen (Typ C) und Verletzungen an den Facettengelenken (Typ F, 4 Subtypen) (Schnake et al. 2017).

Eine Verletzung wird primär als stabil bezeichnet, wenn es zu keiner weiteren Veränderung in der Stellung der Wirbelsäule weder in Ruhe noch bei Belastung kommt. Die klinische Instabilität wird als Funktionsverlust definiert, der dazu führt, dass die Wirbelsäule unter einer eigentlich physiologischen Belastung nicht die adäquate Stützfunktion leisten kann (White und Panjabi, 1978; Brand und Hollister, 1999). Dies führt in der Folge zu Schmerzen, Deformitäten oder neurologischen Ausfällen (Grob et al., 1994; Arand und Kinzl, 1999).

1.3 Epidemiologie der Wirbelsäulenfrakturen

Es wird davon ausgegangen, dass bei jedem sechsten Unfallpatienten die Wirbelsäule in Mitleidenschaft gezogen wird (Oliver et al., 2012). In Deutschland gibt es etwa 10.000 Wirbelsäulenverletzungen jährlich (Bühren, 2003). Aufgrund der biomechanischen Eigenschaften der Wirbelsäule, die in ihrer physiologischen Krümmung mit Brustkyphose und Lendenlordose liegt, treten die meisten Verletzungen in diesem Bereich auf. Mehr als 50 % der Wirbelfrakturen betreffen den 12. Brustwirbel und den 1. Lendenwirbel (Bühren, 2003).

Im Schnitt sind 7 % bis 20 % aller Halswirbelsäulen- sowie 1 % bis 2 % aller Wirbelsäulenverletzungen Frakturen des 2. Halswirbels, hauptsächlich Frakturen des Dens axis (Konieczny et al. 2012, Robinson et al. 2014; Bronson und Protopsaltis, 2019). Im

Rahmen des demografischen Wandels ist auch in Deutschland mit einem Anstieg dieser Verletzung zu rechnen. Pearson und seine Mitarbeiter untersuchten Fallzahlen aus der Gruppe der „Medicare“ Patienten in den USA. Dabei handelt es sich um ältere (über 65 Jahre) oder behinderte Personen. Die Arbeitsgruppe zeigte, dass die Inzidenz zwischen den Jahren 2000 und 2011 um 135 % zugenommen hat (Pearson et al. 2016). Dies zeigt sich auch an den Zahlen für die Inzidenz einer Densfraktur in Schweden, die von der Arbeitsgruppe um Robinson mit 0,5-1,0 je 100 000 Personen unter 70 Jahren angegeben wird im Vergleich zu einer Inzidenz von 16/100.000 bei Personen, die 70 Jahre und älter sind (Robinson et al. 2017).

Da bei den Studien zur Therapie der Densfraktur in der Regel bereits das Alter der Patienten als Ein- oder Ausschlusskriterium definiert wird, gibt es meist nur die Angabe des Durchschnittsalters der Patienten in den Veröffentlichungen, aber keine Altersverteilung. Die Arbeitsgruppe um Tadros untersuchte die Frakturen des HWK2 und ermittelte unter anderem die Verteilung der Inzidenz in den Altersgruppen (Tadros et al., 2019). In ihrer Patientenkohorte waren 79 % der Patienten mindestens 60 Jahre alt und 84 % aller HWK2-Frakturen waren Frakturen des Dens.

Ist die obere HWS nach einem Unfalltrauma verletzt, so ist in 30 % der Fälle der Atlas und in 70 % der Fälle der Axis betroffen, die Schädelbasis ist nur in etwa 3 % der Fälle involviert (Goldberg et al., 2001). Begleitverletzungen eines HWS-Traumas sind weitere Verletzungen der Wirbelsäule, in 22 % der Fälle ein Schädel-Hirn-Trauma, in 20 % der Fälle thorakale Verletzungen und in 26 % der Fälle Verletzungen der Extremitäten. Verletzungen des Rückenmarks werden bei den Patienten mit Densfrakturen nur selten beobachtet, da bei deren Auftreten eine hohe Mortalität besteht (Hasler et al., 2012).

1.4 Klassifikationen der Frakturen des Axis

Liegt eine Fraktur des Axis vor, kann sich diese auf den Wirbelkörper bzw. den Dens beschränken oder ein komplexes Frakturmuster aufweisen. Die Frakturen des Wirbels werden in nach dem „AOSpine Upper Cervical Classification System“ eingeteilt. Sie gehören zur Gruppe III der Frakturen am Axis und am Atlantoaxialgelenk. Gruppe I kategorisiert die Okzipitalkondylen und den kraniozervikalen Übergang, Gruppe II den Atlas und Instabilitäten am Atlantoaxialgelenk, die aber nicht auf Frakturen des Axis zurückzuführen sind.

Die Frakturen des Dens können mit Hilfe mehrerer gängiger Klassifikationssysteme eingeteilt werden, die sich nach der Beteiligung der Bandstrukturen (AOSpine Upper

Cervical Classification System), nach der Lage des Frakturspaltes (Anderson und D'Alonzo) bzw. nach dem Verlauf des Frakturspaltes in Hinblick auf eine mögliche Dislokation (Eysel und Roosen) eingeteilt.

1.4.1 AO-Klassifikation: Einteilung nach dem AOSpine Upper Cervical Classification System

In die AO-Klassifikation fließen drei unterschiedliche Parameter ein, die die Schwere der Verletzung der oberen Halswirbelsäule charakterisieren und die einen Einfluss auf die Prognose haben: Die Morphologie der Verletzung, der neurologische Status und klinische Modifikatoren (Divi et al. 2019). Die Morphologie der Verletzung wird anhand einer Röntgenuntersuchung festgestellt und in die Typen A: Isolierte Verletzung des Knochens, B: Verletzung der Ligamente ohne Dislokation und C: Translation der beteiligten Wirbel (Divi et al., 2019). Der neurologische Status wird mit N0 (keine Auffälligkeiten) bis N4 (Querschnittssymptomatik) beschrieben.

Die klinischen Modifikatoren einer Wirbelsäulenverletzung im kraniozervikalen Bereich werden mit M1 (Potential für Instabilität), M2 (hohes Risiko einer ausbleibenden knöchernen Konsolidierung), M3 (Hochrisikopatient aufgrund des Alters, Komorbiditäten, Knochenerkrankungen usw.) und M4 (vaskuläre Verletzungen) beschrieben (Divi et al., 2019).

Alle Frakturen des Axis fallen unter Klasse III Typ A, wenn nur der Knochen betroffen ist (Abbildung 7), Typ B, wenn nur die Ligamente betroffen sind oder Knochen und Ligamente beeinträchtigt sind (Abbildung 8) und Typ C, wenn eine Dislokation stattfand (Abbildung 9). Liegt ein Abriss des Lig. transversum atlantis vor, erfolgt die Einteilung in die Klasse II Typ B oder C, je nach Dislokation (Divi et al. 2019).

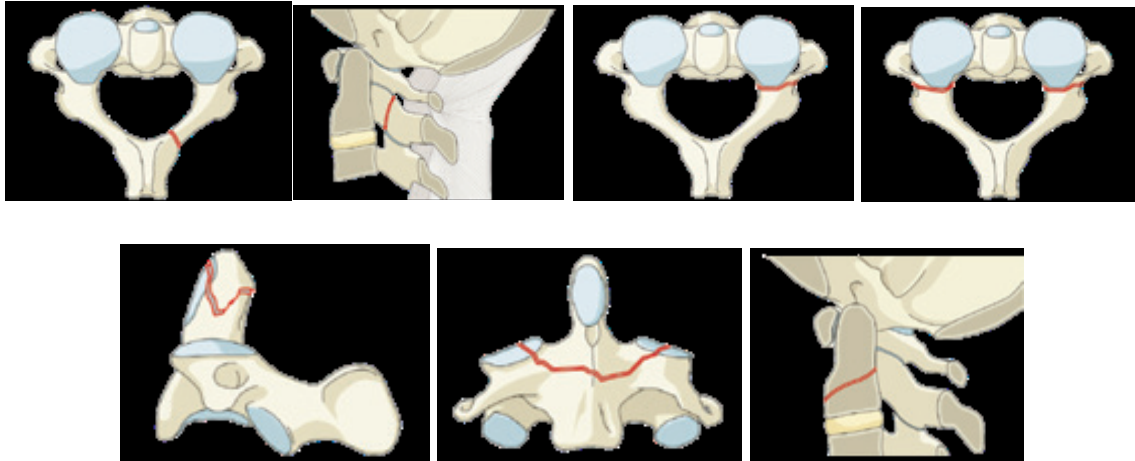


Abbildung 7: Verletzungen des Axis Klasse III Typ A nach der AO-Klassifikation.

Nur Frakturen des Knochens ohne Beteiligung des Bandapparates oder der Bandscheiben. Rot: Frakturlinie (Copyright AOSpine International, Schweiz, 2018)

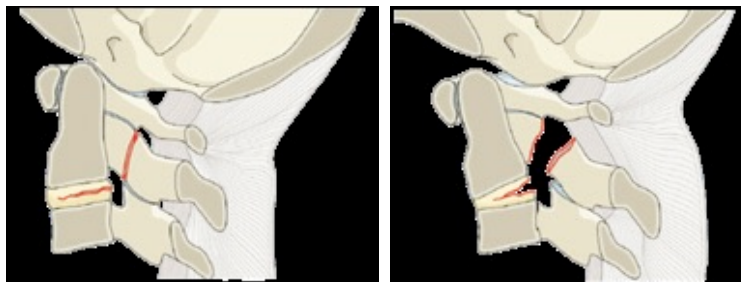


Abbildung 8: Verletzungen des Axis Klasse III Typ B nach der AO-Klassifikation.

Verletzungen der Bandscheiben und /oder der Ligamente mit und ohne Knochenbeteiligung. Rot: Frakturlinie (Copyright AOSpine International, Schweiz, 2018)

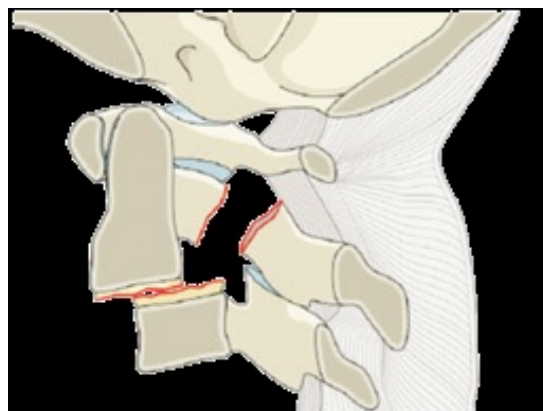


Abbildung 9: Verletzung des Axis Klasse III Typ C nach der AO-Klassifikation.

Jede Verletzung, die zu einer Dislokation führt (Copyright AOSpine International, Schweiz, 2018)

1.4.2 Frakturen des Dens – Einteilung nach Anderson und D'Alonzo

Die Densfrakturen werden meist anhand einer Klassifikation aus dem Jahre 1974 nach Anderson und D'Alonzo in drei verschiedene Typen eingeteilt (Anderson und D'Alonzo, 1974; Abbildung 10). Eine Typ I Fraktur ist eine Fraktur durch die Densspitze, die auch als Distorsionsfraktur bezeichnet wird. In der Literatur finden sich verschiedene Angaben bezüglich der Häufigkeit, allerdings handelt es sich bei der Typ I Fraktur mit einer Auftretenshäufigkeit von etwa 1–4 %, um eine eher seltenere Fraktur (Pepin et al., 1985; Scott et al., 1990; Greene et al., 1997). Als Typ-II-Fraktur werden all jene klassifiziert, bei denen der Frakturspalt durch die Basis des Dens verläuft. Typ II ist mit 37–59 % die häufigste Form, zusätzlich wird diese Variante auch rein formal als instabil gewertet (Anderson und D'Alonzo, 1974; Hadley et al., 1985; Greene et al., 1997; Goldberg et al., 2001). Als Typ III sind all diejenigen Densfrakturen klassifiziert, bei denen die Bruchlinie unterhalb der Densbasis durch den Wirbelkörper des HWK 2 verläuft (Anderson und D'Alonzo, 1974; Greenberg, 2010; Baaj et al., 2012). Diese Frakturen kommen in einem Verhältnis von 1:5 im Vergleich zu den Typ II Frakturen vor (Radovanovic et al., 2017). Greene und seine Mitarbeiter geben dagegen an, dass die Typ III Frakturen 39 % aller Densfrakturen ausmachen (Greene et al., 1997).

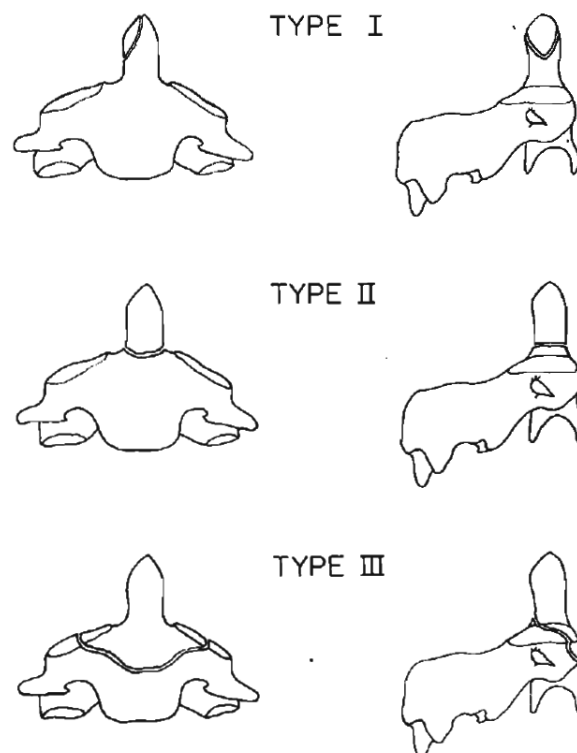


Abbildung 10: Einteilung der Densfrakturen nach Anderson und D'Alonzo.

(Anderson und D'Alonzo, 1974)

Im Jahre 2005 wurde diese Einteilung modifiziert. Es erfolgte eine Subklassifizierung der Typ-II-Fraktur anhand der Dislokation in die Grade A, B und C. Das Ziel lag hierbei in einer Anpassung der Therapie an eine mögliche Dislokation des Knochenfragments (Grauer et al., 2005). Sofern die Densspitze nicht verschoben ist, liegt eine Typ II-A-Fraktur vor, bei einer Dislokation nach ventral spricht man von Typ II-B, bei einer Dislokation nach dorsal von einer Typ II-C-Fraktur (Grauer et al., 2005).

Die Varianten der Densfraktur kommen in unterschiedlichen Häufigkeiten vor und haben auch ein unterschiedliches Genesungspotential. Typ I Frakturen sind selten und werden durch den Ausriss der Densspitze durch die Ligg. alaria verursacht. Sie haben ein gutes Genesungspotential (Anderson und D'Alonzo, 1974; Scott et al., 1990). Die Frakturen vom Typ III haben vor allem deshalb gute Heilungschancen, da die Frakturlinie durch die Spongiosa des Wirbelkörpers führt und hier eine Primärheilung über die gesamte Frakturfläche erreicht wird (Hadley et al. 1985; Govender et al., 2000; Hsu und Anderson, 2010).

Im Gegensatz zu den Densfrakturen vom Typ I und III sind die Typ-II-Frakturen problematisch. Hier besteht die Gefahr einer Pseudarthrose. Die Frakturen sind instabil und die ossäre Fusion liegt nach konservativer Behandlung zwischen 8,5 und 97 % (Clark und White, 1985; Greene et al. 1997; Hsu und Anderson, 2010), nach operativer Versorgung zwischen 73 und 93 % (Apfelbaum et al., 2000; Fountas et al., 2005; Cho und Sung 2012; Börm et al., 2003; Chiba et al., 1993). Gründe für eine schlechte Prognose liegen vor allem im Alter der Patienten (>45 Jahre), einer Dislokation der Fragmente von mehr als 4 mm und in einem verspäteten Therapiebeginn (>2 Monate; Wang et al., 2018).

1.4.3 Frakturen des Dens – Einteilung nach Eysel und Roosen

Die Klassifikation nach Eysel und Roosen beschäftigt sich ausschließlich mit den Möglichkeiten der anterioren Kompressionsschraubenosteosynthese eines frakturierten Dens axis (Eysel und Roosen, 1993; Abbildung 11). Die Einteilung erfolgt nach der Frakturlinie – beim Typ A verläuft diese horizontal. Beim Typ B verläuft die Fraktur von kranioventral nach dorsokaudal. Typ C ist gekennzeichnet durch einen Frakturverlauf von dorsokranial nach ventrokaudal. Bei Typ A und B empfehlen Eysel und Roosen eine anteriore Fixierung mit einer Schraube, bei Typ C empfehlen die Autoren dagegen eine dorsale Fusion von HWK1 und HWK2, da durch die anteriore Fixierung der Dens entlang der Frakturlinie verschoben werden kann.

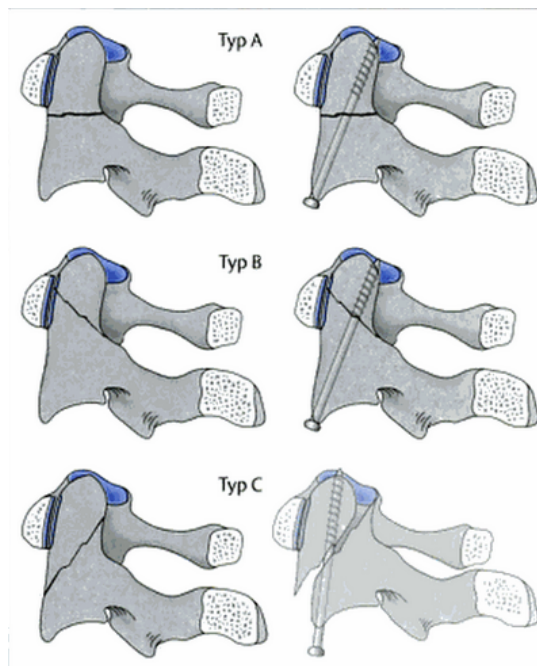


Abbildung 11: Einteilung der Densfrakturen nach Eysel und Roosen (1993).
(Wirth et al. 2004)

1.5 Diagnostik

1.5.1 Symptome einer Densfraktur

Patienten, die mit einer Fraktur des Dens axis in das Krankenhaus eingewiesen werden, können ein sehr breit gefächertes Spektrum an Symptomen vorweisen. Dies reicht von unspezifischen Symptomen wie Nackenschmerzen über eine eingeschränkte Bewegungsfähigkeit der oberen Halswirbelsäule bis hin zu schweren neurologischen Ausfällen. All diese Symptome können in ihrer Ausprägung stark variieren, einzeln oder in Kombination auftreten und in Ausnahmefällen auch gänzlich fehlen, was die rechtzeitige Diagnose einer Fraktur des Dens axis erschweren kann.

Die beschriebenen Symptome können auch bei Patienten bestehen, die sich nicht mehr adäquat äußern können. Gerade Patienten mit einem Polytrauma oder einer Intoxikation, Bewusstlosigkeit oder einem Schädel-Hirn-Trauma können Symptome, die auf eine Densfraktur hinweisen, nicht kommunizieren. Dies stellt einen großen Risikofaktor dar, da in solchen Situationen eine Densfraktur leicht übersehen werden kann (Clark und White, 1985). Bei einer instabilen Fraktur, einer ausbleibenden Reposition beziehungsweise einer inadäquaten Fixierung kann es unter Umständen zum Auftreten von neurologischen Ausfällen kommen (Fairholm et al., 1996). Daher wurden Leitlinien erarbeitet,

welche das Verfahren mit bewusstlosen Patienten vorgeben, um eine (weitere) Schädigung zu verhindern. So empfiehlt die derzeit aktuelle Leitlinie Polytrauma und Schwerverletztenbehandlung: „Bei bewusstlosen Patienten soll bis zum Beweis des Gegenteils von dem Vorliegen einer Wirbelsäulenverletzung ausgegangen werden.“ (Deutsche Gesellschaft für Unfallchirurgie, 2016)

Eine große Gefahr nach traumatischen Verletzungen des Rückenmarks ist der spinale Schock. Es tritt ein nicht immer reversibles Querschnittssyndrom auf. Bei neurologischen Ausfällen kann es sich sowohl um komplette oder inkomplette Querschnitte wie z. B. dem Brown-Séquard-Syndrom handeln. Weiterhin besteht die Gefahr einer Atemlähmung und vegetativer Symptome. Vor allem bei einer Verletzung des Rückenmarks oberhalb des 4. HWK kann es zu einer Zwerchfellparese und somit einer lebensbedrohlichen Situation kommen.

Weitere Symptome können eine Muskelschwäche sowie überschießende Reflexe, ein positiver Babinski-Reflex als Korrelat der Pyramidenbahnschädigung, sowie Hyperästhesien und Hypästhesien in der Regio occipitalis sein (Amyes und Anderson, 1956). Außerdem wurden Beeinträchtigungen der Nozizeption, der Thermozeption, Parästhesien, Dys- sowie Hypästhesien, vorzugsweise in den Händen und Fingern der Patienten dokumentiert (Schnorpfeil und Reuter, 2010). Weiterhin ist eine Okzipitalneuralgie als Folge einer Densfraktur aufgetreten, die jedoch nicht durch einen traumatischen Sturz, sondern durch Osteoporose bedingte Frakturen in der HWS entstand. Eine schnelle Flexion und Extension der Halswirbelsäule löste daraufhin die Symptomatik aus (Ea et al., 2004). Darüber hinaus kann durch die Verlagerung des Densfragments auch noch Tage nach dem eigentlichen Trauma eine Dysphagie ausgelöst werden (Nemeth et al., 2017), teilweise auch mit einer Dysarthrie vergesellschaftet (Wronka et al., 2011).

Sofern der Patient Auskunft erteilen kann, sollte man nach Schmerzen oder Bewegungseinschränkungen im Kopf- und Nackenbereich erfragen. Ist dies nicht möglich, so kann eventuell an der paravertebralen Muskulatur ein richtungsweisender Hartspann der Muskulatur bei der Palpation ertastet werden. Anschließend ist im Verlauf der Diagnosestellung die Anfertigung von Röntgenaufnahmen und / oder computertomographischen Aufnahmen obligat.

1.5.2 Klinisch-neurologische Untersuchung

Entscheidend für den Erfolg einer Therapie ist eine korrekt ausgeführte klinische und neurologische Untersuchung des Patienten, inklusive Überprüfung von Motorik, Muskeleigenreflexen, Sensibilität und Vegetativum. Dazu gehört sowohl die Überprüfung der

oberen als auch unteren Extremität.-Mit der American Spinal Injury Association Classification (ASIA-Status) wird mit einer strukturierten neurologischen Untersuchung das Maß einer Rückenmarksverletzung bestimmt (Tabelle 1; El Masry et al. 1996). Diese gehört zum Standard der Wirbelsäulendiagnostik.

Tabelle 1: Klinische Ausprägungsgrade bei Verletzungen des Rückenmarks anhand der ASIA-Score Klassifizierung.

Ausprägungsgrad	Beschreibung
A	Komplett: Eine motorische oder sensorische Funktion ist in dem Segment nicht mehr erhalten
B	Inkomplett: Allein die sensorische Funktion ist ab dem entsprechenden Segment bis in die Höhe des Sakralmarkes erhalten (S4-S5)
C	Inkomplett: die motorische Funktion ist ab dem entsprechenden Segment erhalten, die Mehrheit der Kennmuskeln unterhalb des Segmentes haben einen Kraftgrad <3
D	Inkomplett: Die motorische Funktion ist ab dem entsprechenden Segment erhalten, die Mehrheit der Kennmuskeln unterhalb des Segmentes haben einen Kraftgrad ≥3
E	Normal: Kein Verlust von motorischen oder sensorischen Funktionen

1.5.3 Bildgebung

Wie bei allen anderen Frakturen auch ist es bei Verdacht auf eine Densfraktur nötig, die Diagnose mit bildgebenden Verfahren zu erhärten und genauer zu charakterisieren. Erste Aufschlüsse geben die klassischen Röntgenaufnahmen der Halswirbelsäule (Abbildung 12, links), die in der Frontalebene und der Sagittalebene durchgeführt werden müssen, um eine mögliche Dislokation des Dens (Abbildung 12, rechts) erkennen zu können. Als dritte Aufnahme erfolgt eine Aufnahme bei geöffnetem Mund (Abbildung 12). Allerdings weisen die Röntgenaufnahmen eine geringe Sensitivität von 31,6 %, jedoch eine hohe Spezifität von 99,2 % für das Erkennen einer Verletzung der oberen Halswirbelsäule auf (Gale et al., 2005). Während die Aufnahme durch den offenen Mund noch übersichtlich und aufschlussreich sein kann, ist in einer lateralen Aufnahme die Densfraktur schwerer zu lokalisieren.

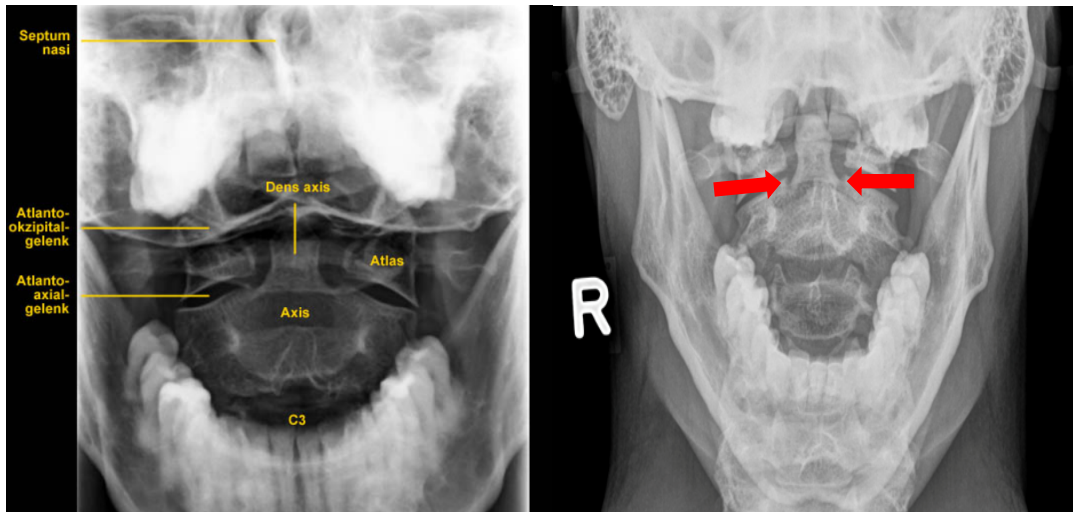


Abbildung 12: Röntgenaufnahmen der Halswirbelsäule von frontal durch den geöffneten Mund.

Links: Normalbefund, [http://e-learning.studmed.unibe.ch/radiosurf/htmls/ref.html?radiosurf\[radskelton\]3123](http://e-learning.studmed.unibe.ch/radiosurf/htmls/ref.html?radiosurf[radskelton]3123) [Stand 24.04.2020]; rechts: Densfraktur mit Frakturlinie zwischen den Pfeilspitzen.

Bei neurologisch unauffälligen, wachen, orientierten und nicht schmerzverspannten Patienten mit Verdacht auf eine instabile akute Densfraktur vom Typ Anderson II oder III oder eine instabilen subakuten oder chronischen Densfraktur ist eine dynamische Röntgenuntersuchung angebracht (Deutsche Gesellschaft für Unfallchirurgie, 2018). Diese wird während der Flexions-/Extensionsbewegung erstellt. Mit dieser Untersuchung kann überprüft werden, ob es sich tatsächlich um eine instabile Fraktur handelt. Allerdings ist der optimale Zeitpunkt der Durchführung der dynamischen Röntgenaufnahme und deren Aussagekraft nicht unumstritten.

Daher hat sich die Computertomographie (CT) als das am besten geeignete bildgebende Verfahren bei Verdacht auf eine Densfraktur durchgesetzt (Abbildung 13). Anhand der CT-Aufnahmen kann auch ein möglicherweise notwendiger operativer Eingriff geplant werden. In der CT-Befundung stützt man sich auf axiale Dünnschichtaufnahmen (MS-CT 1 mm) und rekonstruiert im hochauflösenden Knochenfenster sowohl in koronarer (Abbildung 13) wie auch sagittaler Schichtführung das Zielgebiet (Abbildung 14). Somit wird eine Einschätzung der Frakturlinie und des Grades der Dislokation möglich. (Morgenstern et al., 2016; Emohare et al., 2015). Ebenfalls spezifisch aber wenig sensitiv ist eine prävertebrale Weichteilschwellung, die oft der einzige Hinweis auf eine Fraktur des Dens axis ist (Pinter et al., 2016; Tomaszewski und Wiktor, 2015; Miller et al., 2015; Tetreault et al., 2013; Hülsmeier et al., 2015).

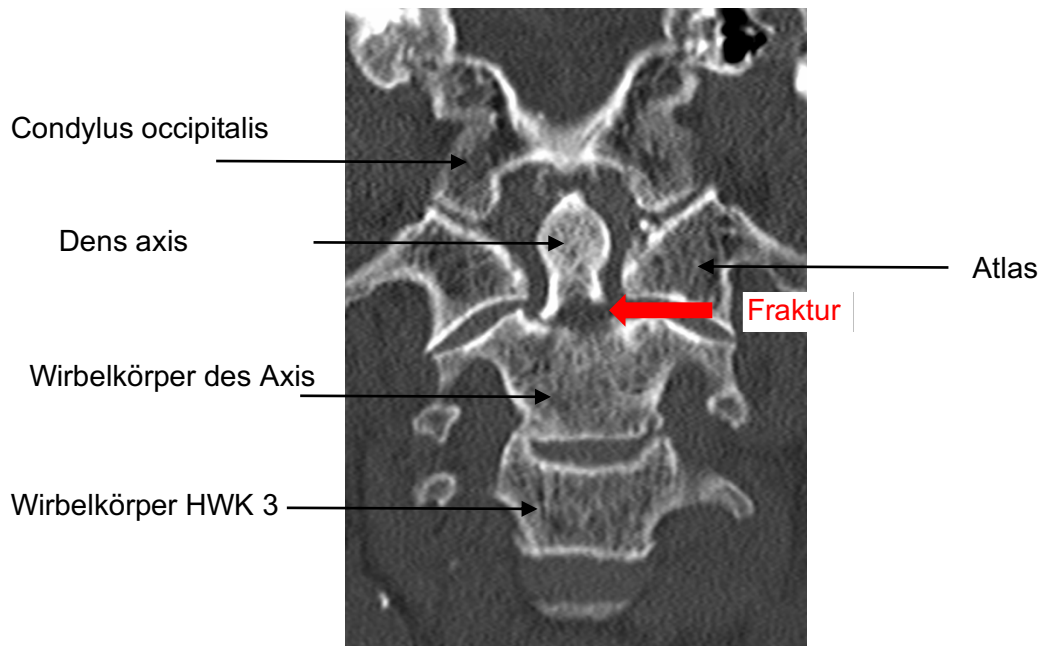


Abbildung 13: Computertomographie der Halswirbelsäule in koronarer Rekonstruktion mit einer Densfraktur Typ II nach Anderson und D'Alonzo.

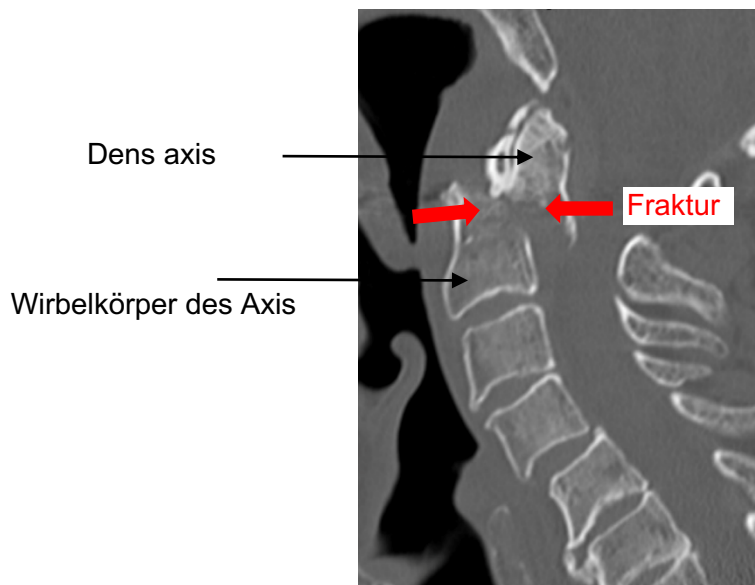


Abbildung 14: Computertomographie der Halswirbelsäule in sagittaler Rekonstruktion mit stark dorsal dislozierter Densfraktur Typ II nach Anderson und D'Alonzo.

Nach einem Trauma, vor allem nach Verkehrsunfällen, erstrecken sich die Verletzungen auf viele Strukturen des Halses, auch auf die Blutgefäße. Dabei kann es zur Dissektion der Arteria vertebralis und auch der Arteria carotis interna kommen (Ariyada et al., 2019).

In deren Folge tritt Blut in tiefere Wandschichten und es droht die Ausbildung eines Aneurysmas und ein ischämischer Schlaganfall (Oh et al., 2015). Daher sollte bei Patienten mit einem Verdacht auf die Verletzung der HWS auch eine CT-Angiographie erstellt werden (Burke und Harris, 1989; Silberstein et al., 1992; Imhof, 2006). Unter der Gabe eines iodhaltigen Kontrastmittels können so die Blutgefäße mit einem Mehrschicht-CT dargestellt werden.

Wenn eine disko-ligamentäre Verletzung nicht ausgeschlossen werden kann, sollte zusätzlich die Magnetresonanztomographie (MRT) zur Befundung herangezogen werden. Diese sollte in axialer, sagittaler und koronarer Schichtung, mit Fettunterdrückung durchgeführt werden, um die Signale des Knochenmarks abzuschwächen. Hierbei ist eine Darstellung der Fraktur und einer möglichen Dislokation und deren Ausmaß möglich (Pinter et al., 2016; Tomaszewski und Wiktor, 2015; Miller et al., 2015; Tetreault et al., 2013; Hülsmeier et al., 2015). Soll eine mögliche Rückenmarksbeteiligung abgeklärt werden, so ist ebenfalls eine sagittale, axiale und koronare Aufnahme in T2 Sequenz nötig. Nur so ist eine Darstellung des Rückenmarks- beziehungsweise Weichteilödems möglich, genauso wie mögliche Verletzungen von umgebenden Weichteilen, Durchtrennungen und Nekrosen. Damit kann auch zwischen einem akuten Geschehen und einem chronischen nicht-fusionierendem Prozess unterschieden werden.

Schlussendlich lässt sich mittels MRT-Untersuchung auch dem Verdacht auf Dissektion oder einem möglichen (Begleit-)Abriss einer oder beider Arteria/e vertebralis(es) nachgehen, ergänzend wären allerdings anschließend weitere Untersuchungen, beispielsweise mittels spezieller kernspintomographischer Sequenzen (TOF-Sequenz) bzw. eine CT-Angiographie (siehe oben) nötig.

1.6 Therapie einer Fraktur des Dens axis

1.6.1 Konservative Behandlungsoptionen

Die konservativen Behandlungsmethoden sind in der Regel eine externe Ruhigstellung der Halswirbelsäule und der Kopfgelenke. Dazu können weiche Krawatten verwendet werden, wie der Schranz-Kragen (Abbildung 15) aber auch rigidere Zervikalorthesen, die zusätzlich auch das Atlantoaxialgelenk entlasten, indem das Gewicht des Kopfes direkt auf die Schultern abgeleitet wird. Die rigideste Form dieser Behandlungsformen ist der Halo-Fixateur, bei dem der Schädel über Pins an einem Gestell fixiert ist (Abbildung 19).

1.6.1.1 Schanz-Kragen

Der Schanz-Kragen wird auch als Schanz'sche Krawatte oder weiche Zervikalstütze bezeichnet (Abbildung 15). Diese Behandlungsmethode gewährleistet nur eine geringe Immobilisation. Die Zervikalstütze ist für den Patienten angenehm zu tragen und führt in der Regel zu keinen weiteren Beeinträchtigungen oder Druckulcera.

Die Indikationen für einen Schanz-Kragen sind zum einen eine Weichteilverletzung, beispielsweise im Rahmen einer Distorsion der Halswirbelsäule, oder die Ausbehandlungsphase, die sich dem Tragen einer rigideren Orthese, wie beispielsweise dem Halo-Fixateur (Kapitel 1.6.1.5), anschließt. Allerdings spricht auch nichts dagegen, den Schanz-Kragen bei einer stabilen Fraktur der Halswirbelsäule einzusetzen. Eine eventuelle Instabilität muss allerdings im Vorfeld bereits bildgebend ausgeschlossen worden sein (Tscherne und Blauth, 2006; Greenberg, 2010; Baaj et al., 2012).



Abbildung 15: Schanz-Kragen.

1.6.1.2 Philadelphia-Kragen

Der Philadelphia-Kragen wird auch als feste Zervikalstütze bezeichnet (Abbildung 16). Diese Orthese sitzt dem Oberkörper auf und schließt mit dem Kinn ab. Es wird hierbei der komplette Hals gestützt, was den Bewegungsumfang der Halswirbelsäule stark einschränkt. Damit wird eine stärkere Immobilisation als mit einem Schanz-Kragen erreicht. Aufgrund der Form und dem Material können sich während einer längeren Behandlung Hautulcerationen am Kinn entwickeln.

Die Indikationen für einen Philadelphia-Kragen sind unter anderem die benötigte Ruhigstellung für eine anstehende weiterführende Diagnostik, beispielsweise nach einer

gravierenden Distorsion der Halswirbelsäule. Präoperativ kann der Kragen auch bei instabilen Frakturen eingesetzt werden. Aber auch postoperativ kommt diese Form der Fixierung zum Einsatz. Zusätzlich kann der Philadelphia-Kragen natürlich auch bei stabilen Frakturen der Halswirbelsäule verwendet werden. (Tscherne und Blauth, 2006; Greenberg, 2010; Baaj et al., 2012).



Abbildung 16: Philadelphia-Kragen.

1.6.1.3 Miami-J Zervikalorthese

Bei der Miami-J Zervikalorthese handelt es sich, ebenso wie bei der Philadelphia-Orthese, um eine feste Zervikalstütze, die aber zusätzlich zum Kinn auch den Hinterkopf stabilisiert (Abbildung 17). Die Orthese wurde entwickelt, um die Druckverteilung an Kinn, Hinterhaupt, Trapezius und Clavicula zu minimieren. Die Indikationen sind identisch mit denen des Philadelphia-Kragens.

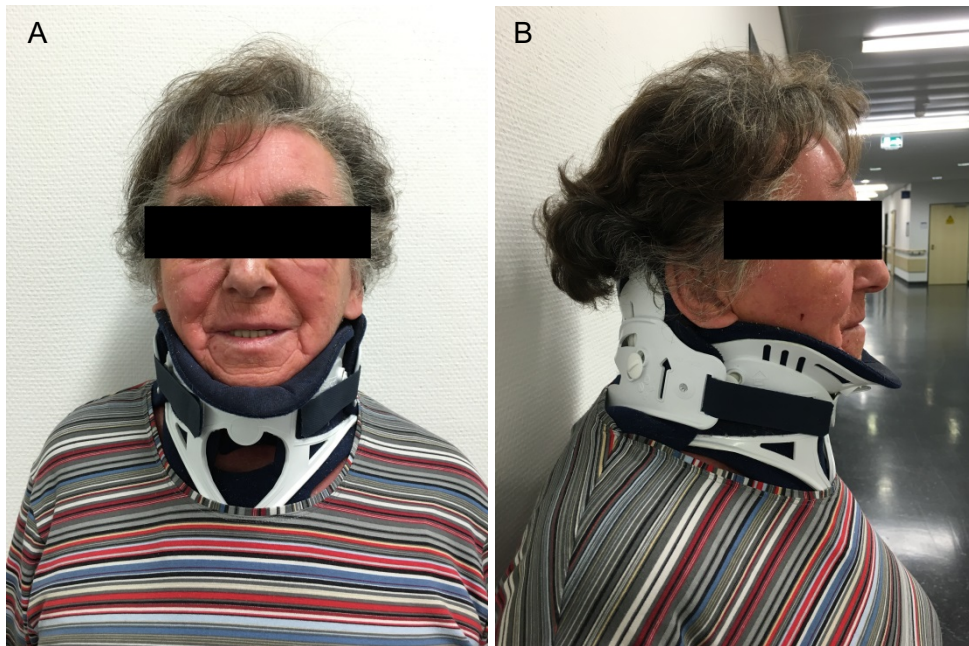


Abbildung 17: Miami-J Zervikalorthese.

A: Ansicht von vorne; B: Seitenansicht.

1.6.1.4 Stiff-Neck

Der Stiff-Neck zählt ebenfalls zu den festen Zervikalstützen (Abbildung 18). Aufgrund der verwendeten Materialien ist dieser Kragen wesentlich rigider als der Philadelphia-Kragen oder die Miami-J-Orthese. Deswegen sollte ein Stiff-Neck keine dauerhafte Therapieoption darstellen. Die Orthese sitzt dem Oberkörper auf und schließt mit dem Kinn ab. Auch hiermit können sich Druckulcera, vorzugsweise des Kinnes bilden. Während bei allen anderen Orthesen lediglich eine Standardhalslänge angenommen wird, kann beim Stiff-Neck die Orthese der individuellen Halslänge angepasst werden. Indikation ist die präklinische Ruhigstellung einer noch nicht im Ausmaß zu beurteilenden Halswirbelsäulenverletzung oder der Verdacht auf eine solche (Tscherne und Blauth, 2006; Greenberg, 2010; Baaj et al., 2012).

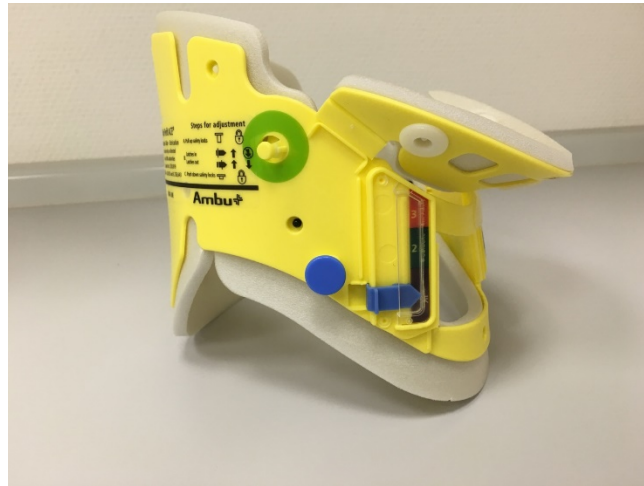


Abbildung 18: Stiff-Neck®

1.6.1.5 Halo-Fixateur

Der Halo-Fixateur (Abbildung 19) gehört ebenfalls zu den externen Apparaturen (von Griechisch ἅλωϋς hálōs, Hof um Sonne oder Mond). Bei diesem komplexen Haltesystem ist das Ziel, Kopf und Wirbelsäule in einer anatomisch optimalen Stellung zu fixieren, bis es zu einer Ausheilung der Fraktur gekommen ist (Tscherne und Blauth, 2006; Greenberg, 2010).

Er besteht aus einem Ring aus Metall, Carbon oder Kunststoff, der den Kopf umgibt. Vier Metallstifte werden zur Stabilisierung durch die Kopfhaut in die Tabula externa des Schädelsknochens eingeschraubt. Der Ring ist über Stangen mit einem Kunststoffkorsett verbunden, um die Halswirbelsäule zu fixieren und so die Heilung der Densfraktur zu unterstützen. Das Anlegen erfolgt unter Lokalanästhesie oder Vollnarkose. Der Sitz muss in regelmäßigen Abständen überprüft werden, um eine optimale Heilung zu gewährleisten. Bei Bedarf können die Schrauben am Fixateur nachjustiert werden. Je nach Heilungsverlauf verbleibt der Fixateur ca. 12 Wochen. Gerade bei instabilen Frakturen des kraniozervikalen Überganges oder der oberen Halswirbelsäule stellt der Halo-Fixateur eine Option dar, wenn eine zeitlich begrenzte Ruhigstellung einer Verletzung erforderlich ist (Ewerbeck et al., 2014).

Der Fixateur ist auch ein probates Therapiemittel für eine stabile Densfraktur mit einer zufriedenstellenden Repositions- und Retentionsmöglichkeit. Er kann auch bei Kontraindikationen für eine operative Versorgung eingesetzt werden (Dunn und Seljeskog, 1986; Hanssen und Cabanela, 1987; Hadley et al., 1989; Polin et al., 1996; Greene et al., 1997; Lennarson et al., 2000; Schirmer, 2005; Tscherne und Blauth, 2006; Platzer et

al., 2007b; Koech et al., 2008; Greenberg, 2010; Sitzer und Steinmetz, 2011; Baaj et al., 2012; Masuhr et al., 2013; Mattle und Mumenthaler, 2013; Ewerbeck et al., 2014).

Der Vorteil des Halo-Fixateurs bei der Behandlung einer Densfraktur ist, dass selbst instabile Frakturen oder Verletzungen der Bandstrukturen, die eine Instabilität zur Folge haben, therapiert werden können. Sollte es postoperativ beispielsweise zu einer Lockerung kommen, so ist es möglich den Halo-Fixateur durch ein individuelles Nachziehen der Schrauben anzupassen (Schirmer, 2005; Greenberg, 2010; Baaj et al., 2012).



Abbildung 19: Patienten mit Halo-Fixateuren nach der Mobilisation.

(Ewerbeck et al., 2014)

Kontraindikationen sind eine Adipositas, Bettlägerigkeit, Frakturen im Schulterbereich oder ein Thoraxtrauma (Schirmer, 2005; Tscherne und Blauth, 2006; Greenberg, 2010; Baaj et al., 2012). Aufgrund der einzubringenden Pins stellt eine vorbestehende Weichteilinfektion im Bereich des Kopfes ebenfalls eine Kontraindikation dar. Weiterhin spricht eine Frakturdislokation von mehr als 4 mm oder eine segmentale Angulation von 10° ebenfalls gegen die Verwendung eines Halo-Fixateurs, da hier aufgrund des ausbleibenden Kontakts der Frakturoberflächen und der dadurch ausbleibenden Heilung die Gefahr der Pseudarthrose erhöht ist. Die Komplikationsrate kann bis zu 36 %, die Pseudarthroserate bis zu 35 % betragen (Julien et al., 2000).

Die Anwendung eines Halo-Fixateurs ist bei einer verspäteten Diagnosestellung, im Allgemeinen in der Literatur angegeben mit etwa 3 Wochen, genauso wie bei älteren Patienten kritisch zu beurteilen (Polin et al., 1996; Seybold und Bayley, 1998). Im Zuge der besseren technischen Möglichkeiten der operativen Versorgung hat der Halo-Fixateur allerdings an Bedeutung verloren (Chapman et al., 2013; Steinberg und Doblhammer-

Reiter, 2010; Schmidt et al., 2013; Triggs et al., 1989) und seine Verwendung nimmt ab (DePasse et al., 2017).

Die Therapiedauer bei Versorgung mit einem Halo-Fixateur beträgt im Schnitt etwa 12 Wochen. Das zusätzliche Gewicht für den Patienten beträgt etwa 3 kg. Der größte Unterschied zwischen verschiedenen Halo-Fixateur-Modellen besteht in der Verwendung von offenen beziehungsweise geschlossenem Ringsystemen. Die Heilungschancen sind hierbei vergleichbar (Wetzel et al. 1995).

1.6.2 Chirurgische Behandlungsoptionen

Bei den chirurgischen Behandlungsmöglichkeiten wird im Wesentlichen die ventrale Densosteosynthese, die den Vorteil des segmentalen Bewegungserhalts bietet, von den dorsalen Spondylodesetechniken unterschieden, die zu einer Versteifung eines oder mehrerer Segmente führen. Additiv zur operativen Fixierung ist ggf. eine offene oder geschlossene Reposition der Fraktur nötig.

1.6.2.1 Ventrale Densosteosynthese nach Böhler

Ist bei einem Patienten eine frische Densfraktur des Typs II diagnostiziert worden, liegt ggf. eine Indikation für eine ventrale Osteosynthese nach Böhler vor (Abbildung 20). Eine relative Indikation besteht weiterhin bei Typ-III-Frakturen, z.B. im Falle von Kontraindikationen gegen eine externe Ruhigstellung sowie bei fehlendem Nachweis einer Dislokation bzw. nach erfolgter Reposition (Anderson und D'Alonzo, 1974; Böhler et al., 1981; Grob und Magerl, 1987). Allerdings eignet sich diese Methode nur bei geraden und abfallenden Frakturspalten nach Eysel und Roosen (Typ A oder B). Eine weitere Kontraindikation ist ein Ausriss des Ligamentum transversum. Bei Patienten mit Osteoporose ist die Gefahr des Schraubenausbruchs erhöht. Der Vorteil dieser Methode ist eine vergleichsweise kurze Operationsdauer und der Erhalt der Beweglichkeit des atlantoaxialen Gelenks.

Zunächst erfolgt die Repositionierung des Dens unter Röntgenkontrolle. Nach der Öffnung des Operationsfeldes und Präparation bis zum HWK2 wird dieser mit einem Kirschner-Draht vorgebohrt, so dass die Schraubeneintrittsstelle im Wirbelkörper an der vorderen unteren Kante liegt, um ein Ausbrechen der Schraube zu verhindern. Im nächsten Schritt werden kanülierte Kortikaliszugschrauben oder Spongiosazugschrauben (bei geringer Knochenqualität) über den Kirschner-Draht eingeschraubt. Ist die Größe des Dens axis ausreichend, so sollten zwei Schrauben verwendet werden, um auch Rotationsstabilität zu erreichen (Abbildung 20 A). Es ist auch die Verschraubung mit nur einer

Schraube möglich, sofern genügend Stabilität erreicht wird (Abbildung 20 B). Zusätzlich kann zur Stabilisierung des Frakturspaltes die Densbasis zementiert werden.

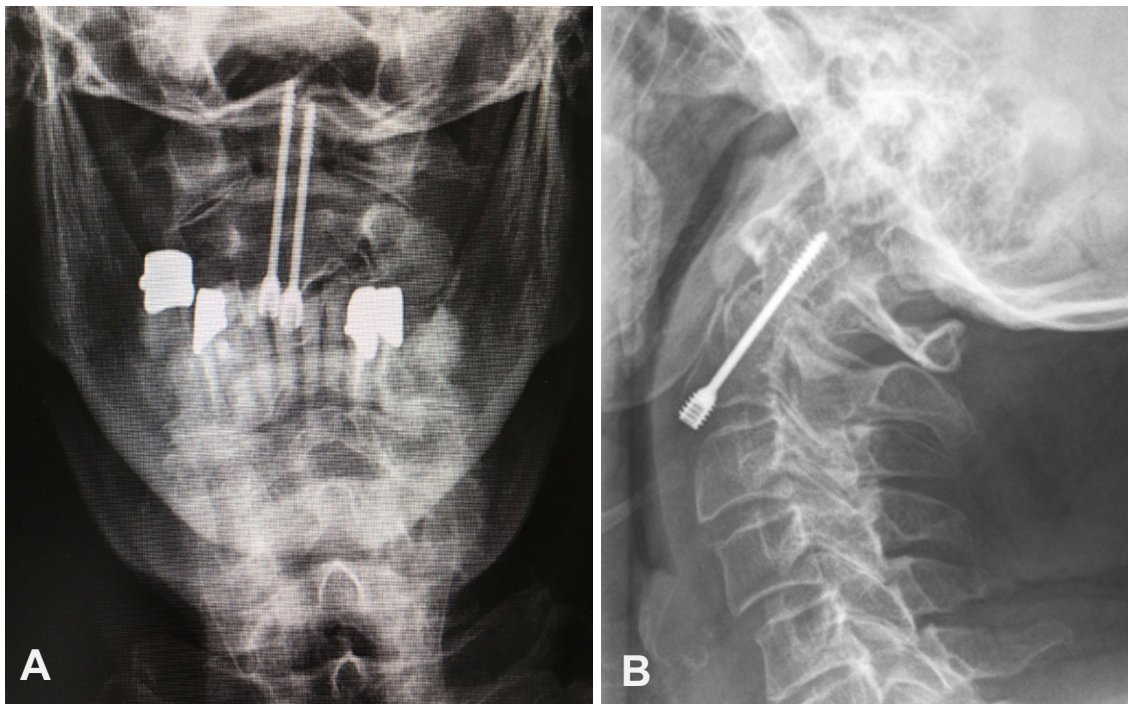


Abbildung 20: Röntgenbilder von Densosteosynthesen nach Böhler.

A: Es wurden 2 Zugschrauben zur Fixierung des Densfragments verwendet. B: Verwendung von nur einer Zugschraube zur Fixierung des Densfragments.

Nach erfolgreicher Operation sollten die Patienten für weitere sechs Wochen die Halswirbelsäule schonen und ruhigstellen. Im Normalfall ist hierfür eine Orthese ausreichend. Nur in Ausnahmefällen ist die Ruhigstellung mithilfe eines Halo-Fixateurs indiziert. Gründe hierfür können neben Kombinationsfrakturen auch eine bekannte und therapie-relevante Osteoporose oder eine rheumatoide Arthritis sein, da diese Begleiterkrankungen prädisponierende Faktoren für die Ausbildung einer Pseudarthrose darstellen (Ag-rillo et al., 2008; Ben Aïcha et al., 2009).

1.6.2.2 Okzipito-zervikale Spondylodese

Die okzipito-zervikale Spondylodese (üblicherweise Okziput bis HWK 3 oder 4) ist bei kraniozervikaler oder atlantoaxialer Instabilität indiziert. Bei Densfrakturen wird sie nur noch im Ausnahmefall, z.B. bei Kombinationsfrakturen oder Kontraindikationen gegen eine HWK 1/2 Spondylodese verwendet (Abbildung 21). Die Fixierung ist mit Haken, Klemmen oder Zerklagen möglich, heutzutage wird der kraniozervikale Übergang meist mittels Schrauben-Stabsystem versteift. Zur Spondylodese wird üblicherweise

autogenes kortikospongiöses Knochenmaterial oder Knochenersatzmaterial verwendet. Bereits bei der Lagerung des Patienten muss auf eine optimale Reposition der Fraktur sowie die Stellung des Kopfes in neutraler Position zum Körper geachtet werden, da es postoperativ zu einer erheblichen Bewegungseinschränkung kommt. Aufgrund der rigiden Fixierung muss der Patient anschließend keine weitere Form der Fixierung tragen (Zervikalorthese, Halo-Fixateur).

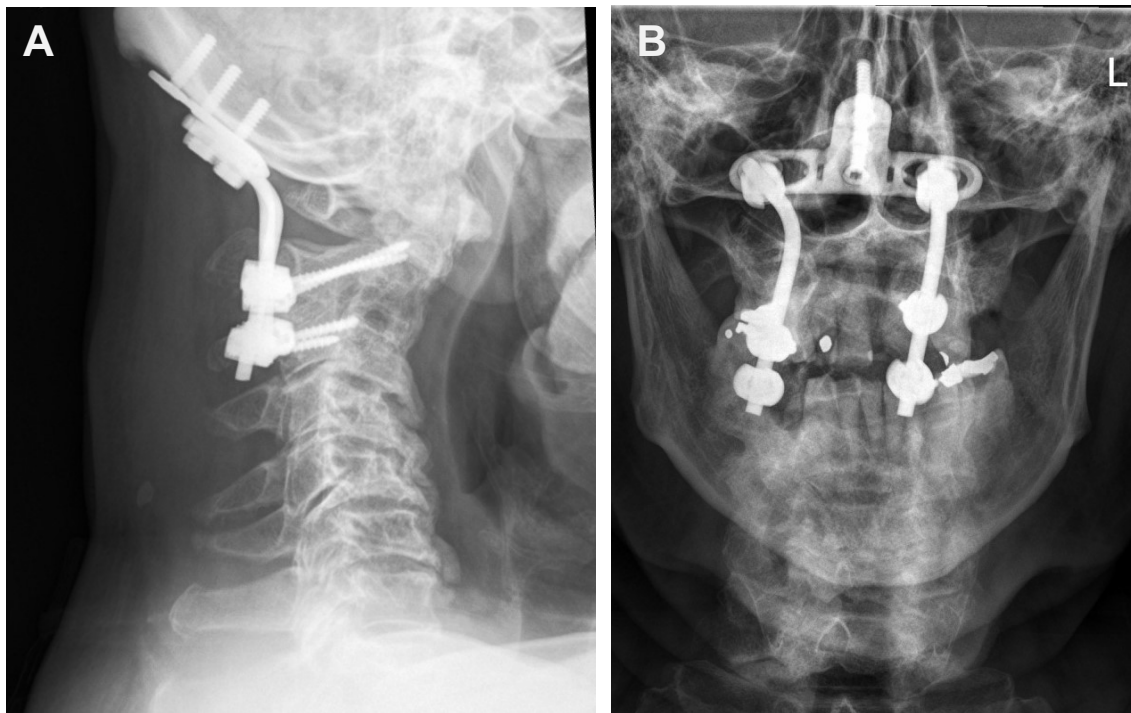


Abbildung 21: Okzipito-zervikale Spondylodese.

Native Röntgenbilder: A: Ansicht von lateral, B: Ansicht von frontal.

1.6.2.3 Dorsale transartikuläre HWK 1/2 Spondylodese-Techniken

Die dorsale transartikuläre Verschraubung von HWK1 und HWK2 wurde 1987 von Magerl entwickelt (Grob und Magerl, 1987). Magerl selbst verwendete dafür eine Inzision vom Okziput bis zum 7. Halswirbelkörper. Inzwischen hat sich die minimalinvasive Variante nach McGuire und Harkey (1995) durchgesetzt - hier erfolgt die Inzision über den dorsalen Anteilen des 1. und 2. HWK, sowie auf Höhe der Brustwirbelkörper 1 und 2, ca. 1 cm lateral der Dornfortsätze und eine perkutane Vorgehensweise.

Sobald das Operationsgebiet präpariert wurde erfolgt das Einbringen eines K-Drahtes. Die Lage wird anschließend mittels Bildgebung überprüft. Nach korrekter Positionierung wird beispielsweise eine kanülierte Schraube über den K-Draht durch den Wirbelkörper des Axis, durch das C1/C2 Gelenk bis in den anterioren Bogen des Atlas eingebracht.

Um zusätzlich die Bewegung des Atlantoaxialgelenkes zu verhindern und die transartikuläre Verschraubung zu entlasten, wird eine dorsale Zerklage oder Atlasbogenklammer eingesetzt und die dorsalen Fortsätze von Atlas und Axis mit Hilfe von Beckenkamm-spongiosa stabilisiert.

Der Vorteil dieses kleineren operativen Zugangsweges stellt eine geringeres Infektions- sowie Blutverlustrisiko dar. Zudem soll durch das geringere Muskeltrauma das Auftreten von postoperativen Schmerzen reduziert werden. Dies kann mitunter maßgeblich für das Gelingen der Operation sein. Die Indikationen für die transartikulären Verschraubungstechniken sind instabile oder Kombinationsfrakturen, die sowohl den 1. als auch 2. Halswirbelkörper betreffen (Magerl, 1986; McGuire und Harkey, 1995; Tscherne und Blauth, 2006; Ewerbeck et al., 2014).

Eine Weiterentwicklung der Methode ist das Wirbelsäulensystem neon3™ (Ulrich Medical). Dabei handelt es sich um ein System für die minimalinvasive Versorgung, die alle benötigten Komponenten (Schrauben usw.) enthält. Hier wird die transartikuläre atlanto-axiale Verschraubung zusätzlich mit einer Atlasklammer stabilisiert (Abbildung 22).

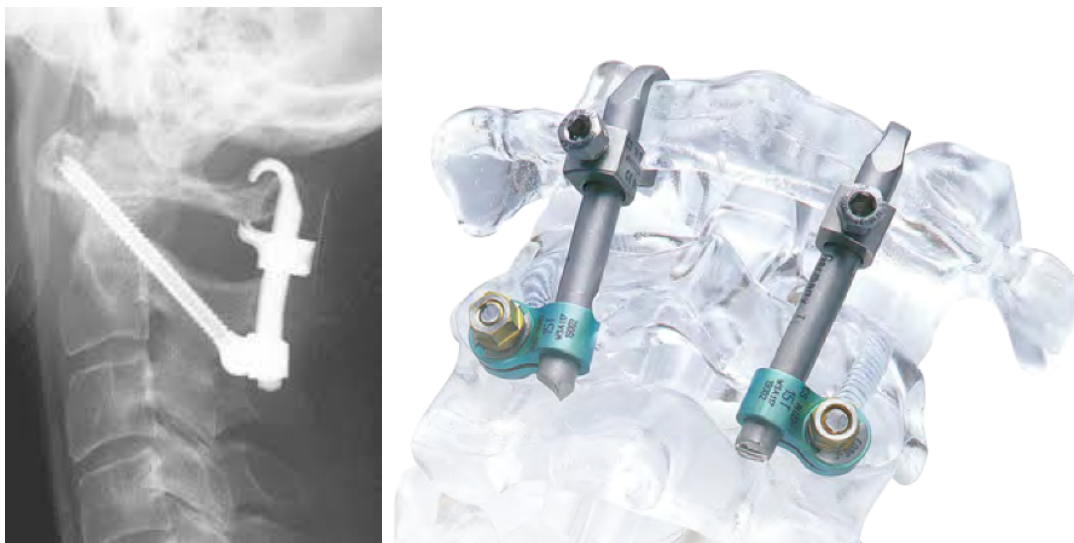


Abbildung 22: Verschraubung mit Atlasklammer.

Links: Röntgenaufnahme, rechts: schematisch; (https://www.ulrichmedical.de/wp-content/uploads/2017/05/neon_Folder_dt_engl_R3_2016-07_web.pdf)

Als Kontraindikationen für die dorsale transartikuläre Verschraubung gelten eine starke thorakale Kyphose oder eine Vertebralisanomalie, wie eine „high riding vertebral artery“. Weiterhin ist das Vorliegen einer zusätzlichen Atlasbogenfraktur kontraindikativ, da in diesem Fall keine Zerklage oder Klammer angelegt werden kann.

1.6.2.4 Dorsale HWK1/2 Spondylodese nach Goel/Harms

Die Indikation für eine dorsale instrumentierte Spondylodese nach Goel und Harms stellen eine instabile Fraktur C1/C2 oder Pseudarthrose sowie nichttraumatische Frakturen dar (Wick et al., 1998; Robson, 2011). Weiterhin kann bei dieser Methode das Risiko der Verletzung der A. vertebralis reduziert werden.

Zuerst erfolgt bei der dorsalen Spondylodese nach Goel/Harms die Lagerung des Patienten in Bauchlage (Abbildung 24) und die dorsale Inzision vom Okziput bis einschließlich der Höhe HWK 3 (Abbildung 23). In der klassischen Technik werden dann Schaftschrauben (z.B. 3,5x28-30 mm) nach dem Kaudalisieren des C2-Nervs und der Koagulation/Tamponade des Venenplexus bikortikal in die Massa lateralis des HWK 1 eingebracht. Alternativ können auch Vollgewindeschrauben über den dorsalen Wirbelbogen des HWK 1 in die Massa lateralis eingebracht werden (sogenannte transpedikuläre Instrumentation). Bei dieser Technik empfiehlt sich aufgrund der limitierten anatomischen Landmarken die Navigationstechnik (Abbildung 25).

In einem zweiten Schritt werden dann Pedikel- oder Isthmusschrauben (Vollgewinde, Kaliber z.B. 3,5 mm) in den HWK 2 eingebracht (Abbildung 26), die endgültige Fixierung erfolgt mittels Stabsystem (Abbildung 27). Eine Spondylodese wird über das Anfrischen der dorsalen knöchernen Strukturen und dem Aufbringen von Beckenkammpongiosa oder Knochenersatzmaterial sowie alternativ der Befestigung eines Beckenkammspans erreicht. Alternativ lässt sich bei ausgewählten Patienten auch eine temporäre Instrumentation mit Metallentfernung nach dem Ausheilen der Fraktur anlegen.

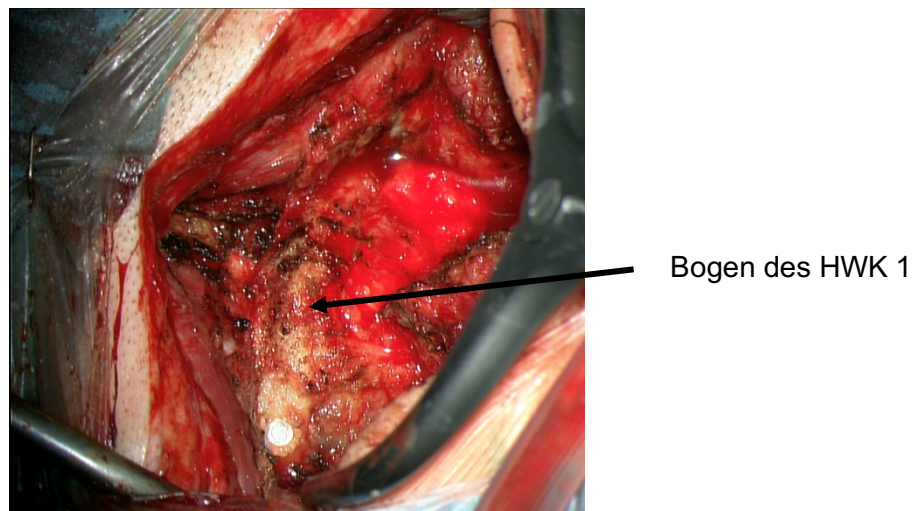


Abbildung 23: Operativer Zugangsweg von dorsal.

Operativer Zugangsweg mit Spreizer zur Sicherstellung einer guten Sicht auf das Operationsgebiet von dorsal. Der Bogen von HWK 1 ist zu erkennen.

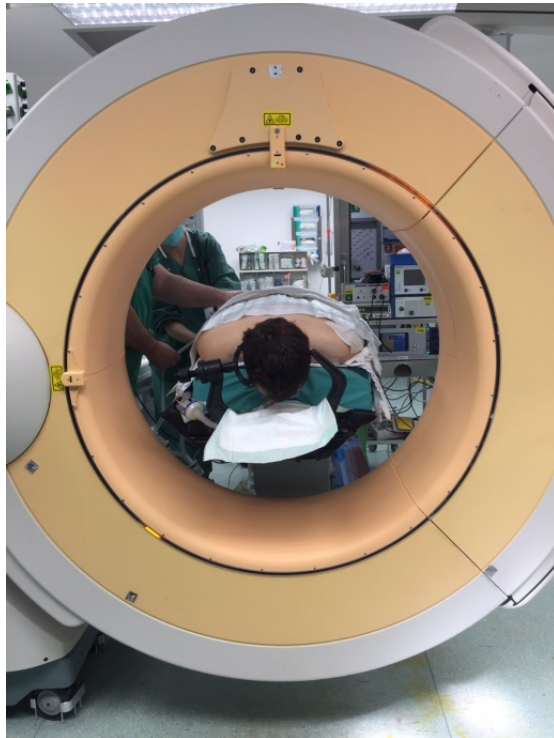


Abbildung 24: Lagerung des Patienten während der OP.

Der OP-Tisch lässt sich für einen intraoperativen Scan in den 3D-C-Bogen bewegen. Der Patient ist auf dem Bauch gelagert, der Kopf ist in einer strahlendurchgängigen Mayfield-Klemme aus Carbon fixiert.



Abbildung 25: Bohrer mit Navigation.

Auf dem Bauch gelagerter Patient, steril abgedeckt. Kugelförmige Referenzpunkte am Schaft des Bohrers.

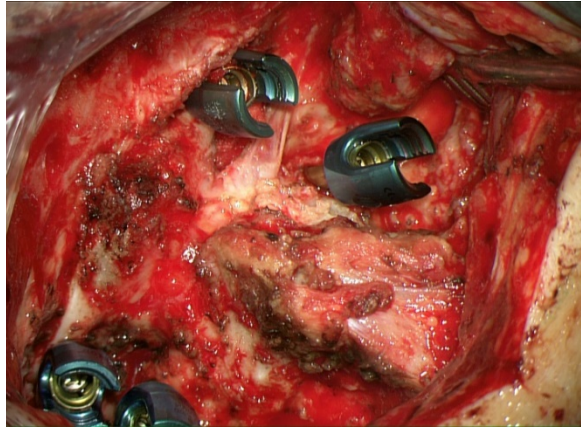


Abbildung 26: Dorsale Instrumentation, eingebrachte Schrauben, OP-Bild.

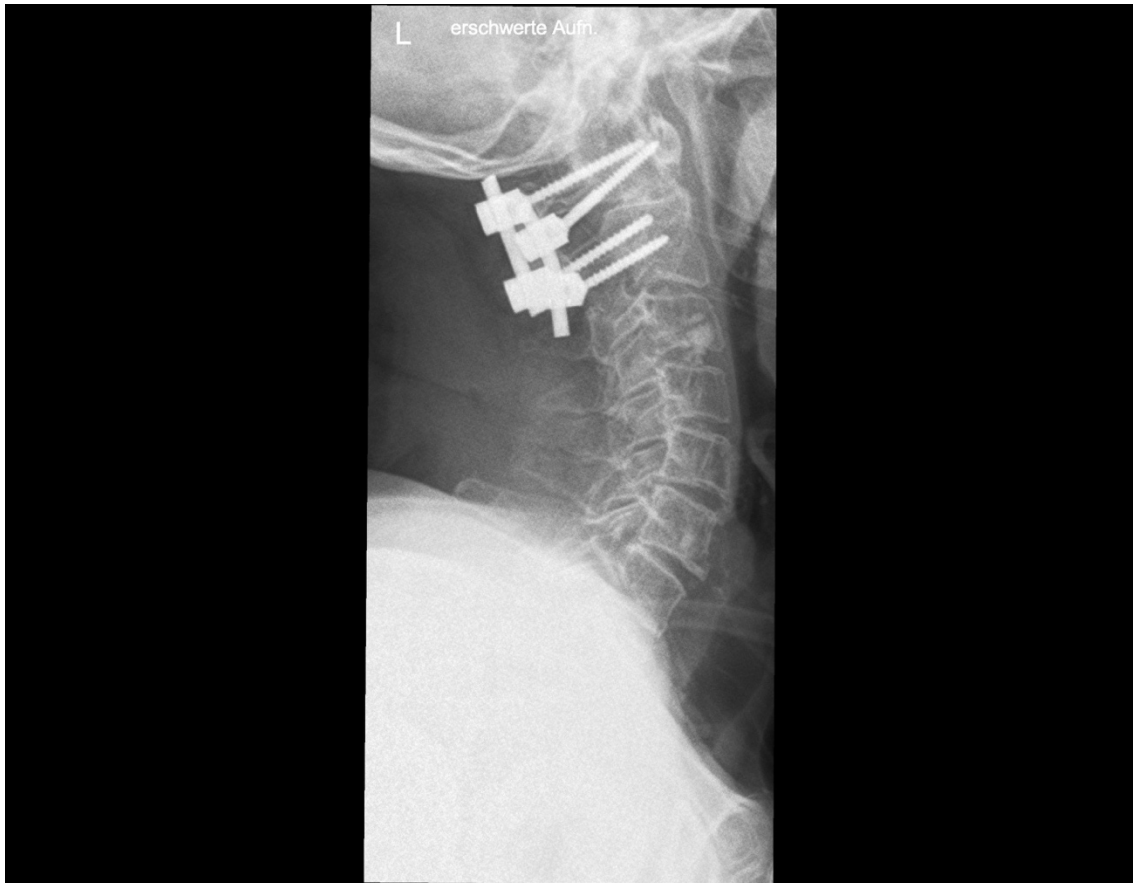


Abbildung 27: Dorsale Spondylodese nach Harms, Röntgenbild mit stabilisierenden Stäben.

1.7 Komplikationen und Behandlungsfolgen

Bleibt die Densfraktur unversorgt, besteht die Gefahr, dass es bei einer ausgeprägten instabilen Verletzung doch zu einer Rückenmarksaffektion kommen kann. Neben einer Blasen-/Mastdarmstörung (Trepel, 2003; Anderson et al., 2012) bei einem Querschnitt in Höhe des zweiten bzw. dritten Halswirbelkörpers ist auch der Abfall des Blutdrucks und Pulses oder eine Verminderung der Atemfrequenz zu befürchten (Arand und Kinzl, 1999; Dvořák und Grob, 1999). Damit besteht die Gefahr, dass die Patienten ateminsuffizient werden und eine Intubation nötig ist.

1.7.1 Komplikationen einer konservativen Therapie

Komplikationen der konservativen Therapie hängen zunächst vor allem mit dem dauerhaften Tragen der Zervikalorthesen zusammen. Dabei können sich Druckulcera ausbilden. Weitere Formen der Komplikation treten beim Halo-Fixateur auf, hier kann es zu Pin-Infektionen kommen.

Vor allem Patienten, die mit dem Halo-Fixateur versorgt wurden, waren eher unzufrieden. Es wurde u.a. von Schmerzen an den Pins und den Eintrittsstellen sowie Entzündungen berichtet., die nicht auf makroskopisch erkennbare Infektionen zurückzuführen waren (Girardo et al. 2018). Andere Patienten aus dieser Studiengruppe berichteten von einer Dermatitis und von einem Dekubitus unter der Dorsalplatte. Daher wurde bei 10 % der Patienten der Halo-Fixateur nach 10 Tagen durch eine rigide Orthese ersetzt (Girardo et al. 2018).

Die Arbeitsgruppe um Isidro zeigt weiterhin, dass 10,7 % der Patienten, die mit einem Halo-Fixateur versorgt wurden, als Therapieversager eingestuft werden müssen (Isidro et al., 2019). Bei fast der Hälfte aus der Studiengruppe traten Komplikationen auf - vor allem Nackenschmerzen. Weiterhin klagten die Patienten über eine eingeschränkte Bewegungsfreiheit (Isidro et al., 2019). Halskrausen scheinen von den Patienten etwas besser toleriert zu werden, obwohl auch berichtet wird, dass diese ebenso unbeliebt bei den Patienten sind (van de Kelft, 2019).

Die Hauptkomplikation einer nichtoperativen Behandlung ist allerdings die fehlende knöcherne Konsolidierung des Frakturspates und die Ausbildung einer Pseudarthrose. Angaben zu den Raten der Pseudarthrosen bei den konservativ behandelten Patienten schwanken, zumal stabile Pseudarthrosen als klinischer Erfolg gelten können. Aquila und seine Mitarbeiter geben eine Rate von 43 % an (Aquila et al.; 2018), Lofrese und seine Mitarbeiter von 52 % (Lofrese et al., 2019). Ein eindeutiger Unterschied im

Therapieversagen zwischen dem Halo-Fixateur und den Zervikalorthesen sieht die Arbeitsgruppe um Waqar allerdings nicht (Waqar et al., 2017).

1.7.2 Komplikationen einer operativen Therapie

Zu den Komplikationen der operativen Behandlung einer Densfraktur zählen zunächst die allgemeinen Operationsrisiken wie Blutungen, Infektionen, kardiopulmonale Probleme (Infarkte, Embolien), Implantatversagen wie z. B. Schraubenbrüche, Heilungsstörung (Pseudarthrose) der Fraktur oder Nervenläsionen. Darüber hinaus bestehen bei Eingriffen an der oberen Halswirbelsäule noch weitere Risiken. Dazu zählen Verletzungen der A. vertebralis oder des Rückenmarks. Der Spinalkanal ist im obersten Abschnitt der Halswirbelsäule jedoch relativ weit, sodass es hier selten zum Eintreten einer Querschnittssymptomatik kommt (Hansen et al., 2006; Lippert, 2006; Netter, 2011). Weiterhin können jedoch periphere Nerven (N. occipitalis major, N. laryngeus recurrens) oder der Ösophagus (ventraler Zugang) verletzt werden. Auch eine Meningitis kann ausgelöst werden oder Liquoristeln oder ösophagotracheale Fisteln können entstehen. Nicht zuletzt kann es aufgrund des Eingriffs bei ventralen Verfahren auch zu Schluckstörungen kommen.

Bei dem Verfahren der anterioren Schraubenosteosynthese ist allerdings das Risiko, eine Pseudarthrose auszubilden mit 23,4 % deutlich höher als bei den Patienten, die mit einer posterioren atlantoaxialen Fusion versorgt wurden (3,5 %; Shousha et al., 2019). Weiterhin ist die Gefahr einer Verletzung der vertebralen Arterie bei dorsalem Zugang und transartikulärer Verschraubung erhöht (1,3 % - 4,1 % während des Setzens der Schraube; Lall et al., 2010).

1.7.3 Pseudarthrose

Bleibt die knöcherne Überbrückung des Frakturspalts auch nach 6 bis 9 Monaten aus, wird von einer Pseudarthrose gesprochen (Abbildung 28). Sie entsteht auf der Grundlage einer übersehenen oder einer nur unzureichend therapierten Fraktur. In der bildgebenden Diagnostik ist die Pseudarthrose am persistierenden Frakturspalt und Ausfransen der Bruchlinien durch osteoklastische Aktivität erkennbar.

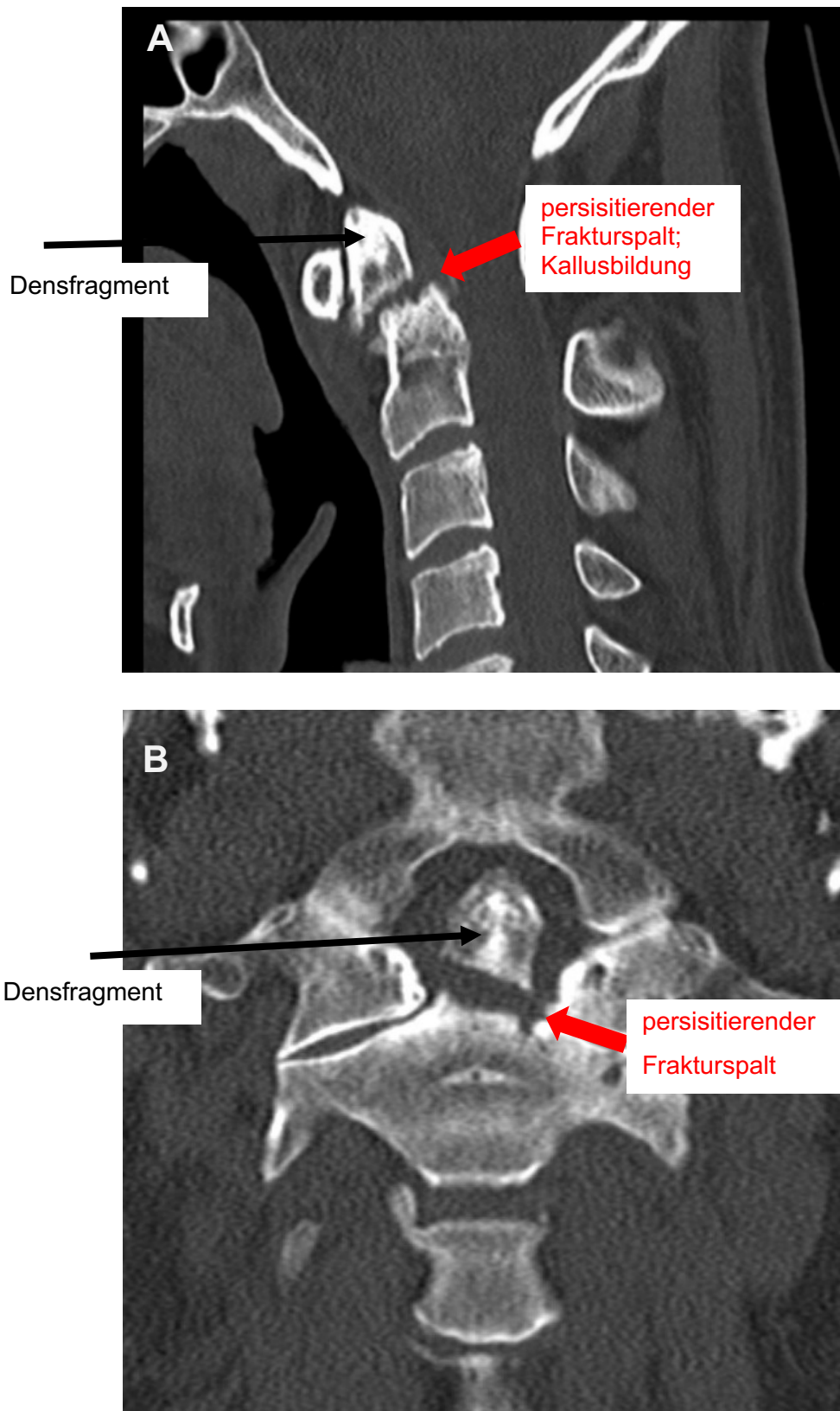


Abbildung 28: Computertomographische Aufnahmen von Pseudarthrosen am Frakturspalt von Densabbrüchen vom Typ II nach Anderson und D'Alonzo.

A: Aufnahme in Sagittalebene, Fraktur­ränder unregelmäßig, beginnende insuffiziente knöcherne Durchbauung; B: Aufnahme in Frontalebene.

Ursachen sind:

1. Mechanische Faktoren wie eine Interposition von Weichteilen in den Frakturspalt, Dislokation und Distraction
2. Mangelhafte Ruhigstellung
3. Instabilität
4. Verzögerte Kallusbildung
5. Gewebeverlust
6. Infekt
7. Mangelnde Perfusion des Densfragments

Zusätzlich stellen eine primäre Diastase sowie Resorptionsvorgänge im Frakturspalt weitere begünstigende Faktoren dar. Dies kann in Extremfällen dazu führen, dass Jahre später ein vom Corpus axis isolierter Dens in der Bildgebung gefunden werden kann (Torklus und Gehle, 1987). Weiterhin spielt der Frakturtyp eine entscheidende Rolle, so kommen Pseudarthrosen vor allem bei Densfrakturen Typ II vor (Clark und White, 1985). Die Pseudarthrose kann vor allem bei älteren Patienten auftreten (Bühren und Josten, 2013; Dunn und Seljeskog, 1986; Platzer et al., 2007a). Weitere Risiken sind eine unzureichende Immobilisierung, ein breiter Frakturspalt und eine Verkipfung des Densfragments.

Liegen nach der Reponierung der Fraktur und einer ausreichenden Ruhigstellung die Frakturflächen in engem Kontakt, kann die primäre Knochenheilung ohne Bildung eines nichtknöchernen Kallus erfolgen. Bei einer sekundären Knochenheilung erfolgt zunächst die Bildung des fibrösen Kallus, dessen Gewebestrukturen über den knochenähnlichen Kallus in Knochenmaterial umgewandelt wird, das schließlich den Frakturspalt durchbaut. Durch den fehlenden Kontakt der Knochenoberflächen kann die Kallusbildung nur verzögert und unzureichend eintreten, was die knöcherne Konsolidierung weiter erschwert.

Ein weiterer Einflussfaktor auf die Entstehung einer Pseudarthrose ist eine manifeste Osteoporose. Aufgrund des Verlusts von Knochenstruktur besteht zum einem ein primär erhöhtes Frakturrisiko, zum anderen ist ein derart vorbelasteter Knochen nur unzureichend dafür ausgelegt, einer eingebrachten Schraube ein ausreichendes Widerlager zu bieten. Bei einer histopathologischen Begutachtung fällt hier insbesondere die verminderte Anzahl an Trabekeln und dafür vermehrte Formation von Mikrokalli in der Basis des Dens axis auf (Amling et al., 1994).

Die klinischen Auswirkungen einer Pseudarthrose sind jedoch unterschiedlich. Ist sie stabil, treten keine Schmerzen auf und der Patient kann mit dem Ergebnis gut leben. In diesem Fall liegt eine hypertrophe Pseudarthrose vor, die durch eine gute Vaskularisierung und eine breite Zone von Faserknorpeln gekennzeichnet ist.

Eine instabile Pseudarthrose hingegen stellt keine Verbesserung zum Ursprungsbefund dar. Die Densspitze kann weiterhin dislozieren und es besteht weiterhin die Gefahr der Verletzung des Rückenmarks. Diese atrophe Pseudarthrose zeigt eine stark verminderte Durchblutung aufgrund nekrotischen Gewebes im Frakturspalt.

Abhängig vom verwendeten operativen Therapieverfahren kommt es meist zu einer Bewegungseinschränkung der Halswirbelsäule. Bei den dorsalen Stabilisierungsverfahren nach Magerl bzw. nach Goel/Harms ist eine Einschränkung der Rotation durch die Fusion des Atlantoaxialgelenkes bedingt (Magerl, 1986; Harms und Melcher, 2001). Die Bewegungsminderung bei der Rotation des Kopfes kann bis zu 50 % betragen (Böhler, 1981; Grob und Magerl, 1987). Bei dem Stabilisierungsverfahren nach Böhler, der Kompressionsschraubenosteosynthese des Dens axis, wird zwar nur bedingt in die rotatorische Bewegung eingegriffen, sie verursacht aber dennoch unter Umständen eine uni- oder bilaterale Einschränkung der Drehbewegung von etwa 15–55° (Böhler, 1981). Bei einer kraniozervikalen Stabilisierung ist auch die Flexions-/Extensionsbewegung der Kopfgelenke weitgehend eingeschränkt.

1.8 Beurteilung des Behandlungsziels

Das Behandlungsziel einer Therapie der Densfraktur ist die vollständige Verknöcherung des Frakturspaltes. Daher sind zur Beurteilung bildgebende Verfahren unabdingbar. Dabei können bereits im Röntgenbild die unterschiedlichen Stadien der knöchernen Konsolidierung, aber auch Heilungsstörungen unterschieden werden.

Inzwischen ist das CT der Goldstandard der Diagnostik, da damit die knöcherne Durchbauung des Frakturspaltes gut erkennbar ist. Dabei können Auffälligkeiten, die auf eine Heilungsstörung hindeuten, wie z.B. eine unregelmäßige knöcherne Konsolidierung, die durch Flecken in der Substanz gekennzeichnet ist, erkannt werden kann.

Allerdings stellt sich immer mehr die Frage, ob allein die radiologisch nachgewiesene vollständige knöcherne Konsolidierung des Frakturspaltes als Therapieerfolg angesehen werden sollte. Wird aber das patientenorientierte Ergebnis mit in Betracht gezogen, zeigt sich, dass viele Patienten auch mit einer nur teilweisen Konsolidierung oder auch mit einer stabilen Pseudarthrose leben können. So konnte die Gruppe um Wang zeigen,

dass es bei einem guten funktionellen Ergebnis für den Patienten nicht wichtig ist, ob die Knochenfragmente wieder zusammengewachsen sind (Wang et al., 2018). Einige Arbeitsgruppen dokumentieren, dass auch eine Nichtverwachsung ein gutes funktionelles Resultat sein kann (Aquila et al., 2018; Perry et al., 2018; De Bonis et al., 2019a; De Bonis et al., 2019b; Patel et al., 2015; Joestl et al., 2016b; Raudenbush und Molinari, 2015).

1.9 Fragestellung

Nach wie vor ist nicht eindeutig geklärt, ob nach einer Fraktur des Dens axis vom Typ II oder III nach Anderson und D'Alonzo eine konservative Behandlung oder eine operative Intervention die besseren Therapieerfolge bringt. Weiterhin ist der Therapieerfolg bislang lediglich als vollständige knöcherne Konsolidierung definiert, die radiologisch bestimmt wird. Eine Pseudarthrose wird somit mit einem Therapieversagen gleichgesetzt. Da die knöcherne Konsolidierung bei den operativen Maßnahmen besser ist, wurde lange Zeit die chirurgische Intervention als überlegene Therapie angesehen. Allerdings gibt es in erster Linie nach konservativer Therapie auch radiologisch ungünstige Verläufe mit Bildung einer sogenannten stabilen Pseudarthrose, die dennoch ein für den Patienten zufriedenstellendes Ergebnis darstellen. Weiterhin muss für eine Therapiewahl aber auch die potentielle behandlungsbedingte Morbidität und Mortalität einbezogen werden.

Daher ist das erste Ziel dieser Studie, eine klinisch relevante und patientenzentrierte Definition des Therapieversagens vorzunehmen und abzuklären, wie häufig ein Therapieversagen in Folge der Behandlung einer Densfraktur tatsächlich ist.

Auf Basis dieser Einteilung soll überprüft werden, bei welchen Therapieformen das Therapieversagen seltener bzw. häufiger vorkommt. Hier stellt sich auch die Frage, ob das Therapieversagen eher durch einen fehlenden Nutzen, sprich ausbleibende knöcherne Konsolidierung und schlechtes klinisches Ergebnis, oder durch ein erhöhtes Risiko bedingt ist. Weiterhin sollen patientenspezifische Faktoren identifiziert werden, die möglicherweise das Therapieversagen beeinflussen. Dabei stellt sich auch die Frage, ob diese Faktoren gegebenenfalls beeinflusst werden können oder ob auf deren Basis lediglich das Behandlungsverfahren gewählt werden kann.

Diese Einschätzung soll anhand einer retrospektiven Erhebung von Langzeitergebnissen nach sowohl konservativer als auch operativer Versorgung einer HWK 2-Fraktur von Patienten erstellt werden, die zwischen 2003 und 2016 in der Klinik für Neurochirurgie am Universitätsklinikum in Gießen versorgt wurden. Zur Identifizierung der prädiktiven

Faktoren für ein schlechtes Ergebnis wird eine Analyse der klinischen (z. B. Alter, Vorerkrankungen) und radiomorphologischen (z. B. prätherapeutische Morphologie der Fraktur, knöcherne Konsolidierung) Daten durchgeführt. Die Daten wurden vor Beginn der Therapie und nach einem mindestens 6-monatigen Follow-up erhoben. Nachdem die Patienten zu diesem Zeitpunkt als Therapieversager oder Therapieerfolg gewertet wurden, sollten die zu Beginn der Therapie erhobenen Daten auf ihre Vorhersagekraft überprüft werden, um daraus Prädiktoren für ein Therapieversagen ableiten zu können.

2 Methoden

Für diese monozentrische Studie wurden retrospektiv Daten von Patienten analysiert, die aufgrund einer Dens axis-Fraktur in der Klinik für Neurochirurgie am Medizinischen Zentrum für Neurologie und Neurochirurgie des Universitätsklinikums Gießen/Marburg in Gießen behandelt wurden.

2.1 Votum der Ethikkommission

Die Ethikkommission der Justus-Liebig-Universität Gießen hat dem Vorhaben am 05.02.2015 zugestimmt. Die Entscheidung ist unter dem Aktenzeichen 14/15 abgelegt.

2.2 Patientenkollektiv

Für die Studie kamen zunächst alle Patienten in Frage, die mit einer HWK 2-Fraktur im Zeitraum zwischen dem 01.01.2003 und dem 31.12.2016 konservativ oder chirurgisch behandelt wurden. Das Patientenkollektiv bestand initial aus 246 Personen (Abbildung 29).

Es wurde eine Analyse der vorhandenen Patientendaten durchgeführt. Diese beinhaltete eine Sichtung der vorliegenden Arztbriefe, Entlassungsbriefe, Ambulanzbriefe, externen Befunde (soweit fallrelevant), OP-Berichte, Laborbefunde sowie der radiologischen Befunde. Es wurde nach Komplikationen, die während des stationären Verlaufs (ggf. prä- und postoperativ) wie auch im späteren Verlauf (Follow-Up) auftraten, gesucht. Die Einschätzung der Begleiterkrankungen erfolgte anhand des Charlson Comorbidity Index inklusive der altersadjustierten Variante Charlson Age Comorbidity Index (CACI) (Lucif Jr. und Rocha, 2004; Woods et al., 2014). Alle Patienten wurden nach Anderson und D'Alonzo in ihrem Frakturtyp klassifiziert.

Um eine möglichst standardisierte Patientenkohorte für die Studie zur Verfügung zu haben, wurden nur die Frakturen der Typen II und III in die Studie eingeschlossen. Bei der Fraktur vom Typ I handelt es sich um ein seltenes Ereignis (1-4 %). Das Intervall für die Folgeuntersuchung mit mehr als 6 Monaten wurde so gewählt, dass ausreichend Zeit verstrichen ist, um die Tendenz zum Therapieversagen erkennen zu können.

2.2.1 Einschlusskriterien

Als Einschlusskriterien für die Studie wurden definiert: Patienten, die zwischen Januar 2003 und Dezember 2016 mit einer Fraktur des HWK 2 an der JLU Gießen behandelt wurden.

2.2.2 Ausschlusskriterien

Es wurden die Patienten ausgeschlossen,

- bei denen es aufgrund der insuffizienten Datenlänge nicht möglich gewesen ist, den stationären Aufenthalt adäquat zu reproduzieren
- mit nach Anderson und D'Alonzo anderen als Typ II oder Typ III klassifizierten traumatischen Densfrakturen
- bei denen das Intervall zwischen Unfall und Zuweisung >6 Wochen war
- bei denen das Intervall zwischen Unfall und zuletzt dokumentierter Follow-Up Untersuchung < 6 Monate war

In Abbildung 29 ist die Patientenselektion dargestellt zusammen mit den Ausschlusskriterien und der Anzahl der Patienten, die aufgrund der Ausschlusskriterien nicht in der Studie berücksichtigt wurden.

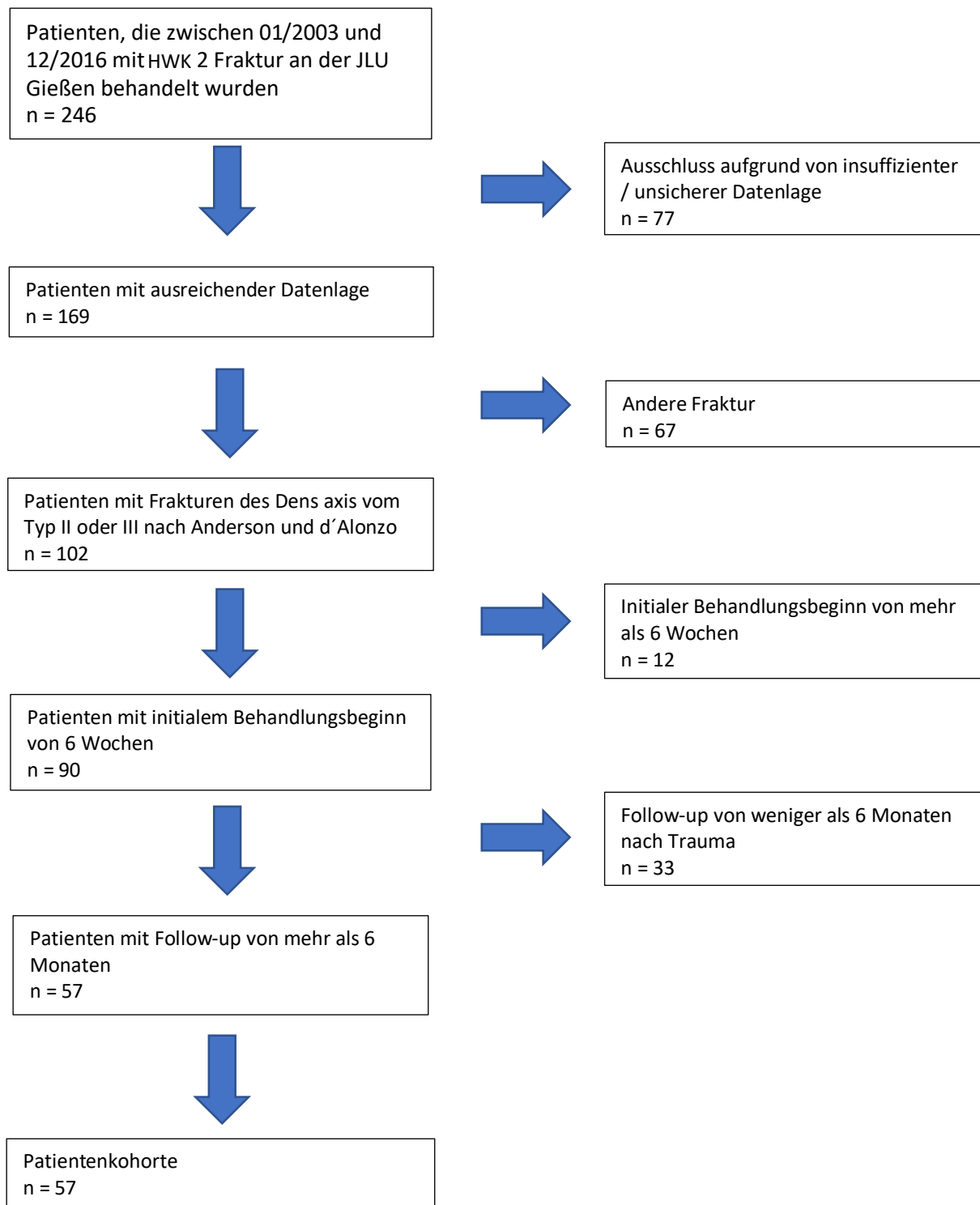


Abbildung 29: Flow-Chart zur Auswahl des Patientenkollektivs.

2.2.3 Ausgangsparameter

Bei der Einlieferung der Patienten wurden multiple Daten erhoben (siehe unten), aus denen sich die Scores Charlson Comorbidity Index (CCI), alterskorrigierter CCI (CACI), ASIA- und Smiley-Webster Score extrahieren/errechnen ließen.

2.2.3.1 Befunde

Folgende Parameter der Patienten wurden bei der Einlieferung der Patienten erhoben: Alter, Geschlecht, Mobilität vor dem Unfallereignis, relevante Vorerkrankungen (Osteoporose, Morbus Bechterew, Morbus Parkinson, Myokardinfarkt, Herzinsuffizienz, periphere vaskuläre Erkrankungen, Demenz, zerebrovaskuläre Erkrankungen, chronische Lungenerkrankungen, Bindegewebserkrankungen, Ulkus, chronische Lebererkrankungen oder Zirrhose, Hemiplegie, mittlere bis schwere Nierenerkrankungen, Diabetes mit Komplikationen, Tumore, Metastasen, Leukämie, Lymphome, AIDS oder zusätzlicher Risikofaktor), Tag des Unfallereignisses, Tag der Aufnahme und ob der Patient unter Nackenschmerzen leidet.

Folgende radiologische Parameter wurden erfasst: Frakturtyp nach Anderson und D'Alonzo, Begleitverletzungen, weitere Frakturen, Dislokation der Fraktur und Instabilität auf Röntgenfunktionsaufnahmen.

2.2.3.2 Scores:

Charlson Comorbidity Index (CCI)

Der Charlson Comorbidity Index (CCI) dient als Vorhersageinstrument der Ein-Jahres-Mortalität eines Patienten in Zusammenhang mit dessen individuellen Begleiterkrankungen, wie zum Beispiel Erkrankungen des Herz-Kreislaufsystems, Krebserkrankungen oder AIDS (Fried et al., 2001; Charlson et al., 2014; Charlson et al., 2008; Zhao et al., 2016). Insgesamt werden 19 Begleiterkrankungen mit diesem Punktesystem erfasst und abhängig von der Schwere mit 1, 2, 3 oder 6 Punkten gewertet (Tabelle 2). Am Ende werden diese Punkte zum Gesamtscore addiert (Maximum 33).

Der CCI wurde bereits mehrfach bei spinalen Erkrankungen verwendet. Die Arbeitsgruppe um Chan bewertet den CCI bei der Behandlung von HWK 2-Frakturen bei älteren Patienten als nützlich (Chan et al., 2019). Lofrese und seine Mitarbeiter konnten zeigen, dass ein schlechter CCI eine größere postoperative Behinderung im Nackenbereich vorhersagt (Lofrese et al., 2019). In der Studie von Veeravagu und seinen Mitarbeitern zeigte der CCI aber keinen Zusammenhang mit Komplikationen nach Eingriffen an der Wirbelsäule (Veeravagu et al. 2017).

Tabelle 2: Punktwerte der einzelnen Komorbiditäten im Charlson Comorbidity Index.

Punkte	Erkrankung
1	Herzinfarkt, Herzinsuffizienz, periphere arterielle Verschlusskrankheit, zerebrovaskuläre Erkrankungen, Demenz, chronische Lungenerkrankung, Kollagenose, Ulkuskrankheit, leichte Lebererkrankung, Diabetes mellitus (ohne Endorganschäden)
2	Hemiplegie, mäßig schwere und schwere Nierenerkrankung, Diabetes mellitus (mit Endorganschäden), Tumorerkrankung, Leukämie, Lymphom
3	Mäßig schwere und schwere Lebererkrankung
6	Metastasierter solider Tumor, AIDS

Der Charlson Age Comorbidity Index (CACI)

Ergänzend zum CCI kann dieser auch in einer alterskorrigierten Version, dem Charlson Age Comorbidity Index (CACI) angewendet werden (Dias-Santos et al., 2015; Asano et al., 2017; Fried et al., 2001; Verla et al., 2016). In dieses Scoring System wird das Patientenalter ab 50 Jahren mit zusätzlichen Punkten je nach Lebensdekade gewichtet (Tabelle 3). Entsprechend ist hier ein Maximalscore von 38 möglich.

Tabelle 3: Altersmodifikation im Charlson Age Comorbidity Index.

Punkte	Patientenalter
0	0 – 49 Jahre
1	50 – 59 Jahre
2	60 – 69 Jahre
3	70 – 79 Jahre
4	80 – 89 Jahre
5	90 – 99 Jahre

ASIA-Score

Um den neurologischen Status zu beurteilen, wurde der ASIA-Score eingesetzt, der bereits in Kapitel 1.5.2 (Seite 17) beschrieben wurde.

Smiley-Webster-Score

Der Smiley-Webster Score (SWS) wird als Hilfsmittel zur Beurteilung der funktionellen Ergebnisse, beispielsweise nach Verletzung der Wirbelsäule, verwendet. Insgesamt gibt es vier verschiedene Ausprägungsgrade, von einem exzellenten bis hin zu einem nicht zufriedenstellenden Ergebnis (Singh et al., 2012; Tabelle 4).

Tabelle 4: Smiley-Webster-Score, Berücksichtigung der einzelnen Elemente.

Einteilung	Grad	Schmerzen	Mobilität	Rückkehr zur normalen Aktivität	Neurologie
Exzellent	1	Keine	Normal	Keine Einschränkung	Intakt
Gut	2	Gelegentlich	Eingeschränkt	Eingeschränkt	Intakt
Akzeptabel	3	Mäßig	Stark beeinträchtigt	Stark beeinträchtigt	Leicht beeinträchtigt
Nicht zufriedenstellend	4	Erheblich	Stark beeinträchtigt	Unfähig	Stark beeinträchtigt

2.2.4 Dichotomisierung der Patienten nach dem CACI-Score

Patienten mit Werten im CACI bis zu 3 zeigten nach einer operativen Versorgung einer Femurhalsfraktur eine deutlich bessere 5-Jahres-Überlebensrate im Vergleich zu Patienten mit einem CACI von 6 oder mehr (Jiang et al. 2018). Um die Aussagekraft der hier vorgestellten Studie zu verbessern, erfolgte zusätzlich eine Unterteilung der Patienten in eine Hoch- sowie Normalrisikogruppe. Patienten mit einem CACI von >3 wurden als Hochrisikogruppe gewertet, Patienten mit einem Ergebnis von ≤ 3 hingegen als Normalrisikogruppe. Die Grenze zwischen Normal- und Hochrisikogruppe wurde anhand des Median aller CACI-Werte getroffen (Asano et al., 2017; Teague et al., 2015; Dias-Santos et al., 2015).

2.3 Therapieoptionen

Um die Auswirkungen der unterschiedlichen Behandlungen auf das Therapieversagen untersuchen zu können, wurden die Therapiemöglichkeiten folgendermaßen dokumentiert.

Konservative Therapien:

- Keine frakturspezifische Therapie
- Zervikalorthese (keine weitere Unterscheidung)
- Halo-Fixateur

Operative Therapien:

- Ventrale Densverschraubung nach Böhler
- Dorsaler Zugang (transartikuläre HWK 1/2-Spondylodese nach Magerl oder McGuire/Harkey; Dorsale HWK 1/2-Spondylodese oder Instrumentation nach Goel/Harms; okzipito-zervikale Spondylodese)

2.4 Parameter während des Klinikaufenthalts

Folgende Outcome-Parameter wurden bei der Entlassung der Patienten bestimmt: ASIA-Score, Smiley-Webster Score; weiterhin wurde abgefragt, ob noch Nackenschmerzen vorhanden sind und wie diese im Vergleich zum Zustand bei der Einweisung sind (besser, schlechter).

Um den kurzfristigen Erfolg der gewählten Therapie zu dokumentieren, wurden bis zur Entlassung folgende Parameter dokumentiert: Es wurde erfasst, ob Komplikationen innerhalb von 4 Wochen aufgetreten sind und ob sie OP-bedingt waren.

Diese Komplikationen wurden nach Art und Zahl aufgeschlüsselt und festgestellt, ob sie transient oder permanent (noch bei der Entlassung vorhanden) waren. Zu den Komplikationen zählen beispielsweise Schluckstörungen, postoperatives Delir, Hypoglossusparesie, Wundinfektion/Wundheilungsstörung, Revisionsoperation innerhalb von 30 Tagen. Mögliche Gründe für eine Reoperation sind: Pseudarthrose, Implantatfehlage, Implantatdislokation, Infektion/Wundheilungsstörung, Liquorfistel, Nachblutung oder anderweitige Ursachen.

2.5 Parameter bei den Nachuntersuchungen

Um den letztendlichen Erfolg der klinischen Intervention bewerten zu können, wurde mindestens 6 Monate nach dem Unfallereignis eine Kontrolluntersuchung durchgeführt. Zu diesem Zeitpunkt ist bei normalem Heilungsverlauf meist eine vollständige knöcherne Konsolidierung des Frakturspaltes nachweisbar.

Auch bei der Nachuntersuchung wurden die Outcome-Parameter bestimmt, die bereits bei der Entlassung aus der Klinik abgefragt wurden: ASIA-Score, Smiley-Webster-Score und das Vorhandensein von Nackenschmerzen. An dieser Stelle wurde weiterhin dokumentiert, ob es nach der Entlassung Todesfälle gegeben hat und ob der Tod im Zusammenhang mit der Densfraktur stand. Weiterhin wurde die Mobilität der Patienten dokumentiert.

Um den Zustand am Frakturspalt zu dokumentieren, wurden die Patienten radiologisch untersucht (entweder mittels CT, Standardröntgen oder Funktionsröntgen). Eine Instabilität des Densfragments ist an der Lageveränderung zwischen lateralen Aufnahmen in der Flexion und in der Extension der HWS erkennbar.

Dabei wurden folgende Ergebnisse differenziert:

- Knöchern, komplett konsolidiert
- Knöchern, partiell konsolidiert
- Pseudarthrose
- Instabilität (Funktionsröntgen)

2.6 Ergebnisparameter

Der primäre Endpunkt dieser Studie ist das Therapieversagen. Therapieversagen wurde definiert als:

- Tod während des Krankenhausaufenthaltes nach Therapieentscheidung
- Schwere behandlungsassoziierte Komplikation mit oder ohne die Notwendigkeit einer (Re-)Operation
- Ausbleibende knöcherne Konsolidierung und Notwendigkeit der (Re-)Operation
- Ausbleibende knöcherne Konsolidierung und schlechter Smiley-Webster Score

Folgende sekundäre Endpunkte wurden definiert:

- Patientenorientierte Prädiktoren: Wird das Therapieversagen von Alter, Geschlecht, Vorerkrankungen, Typ der Densfraktur oder von einem Scorewert wie dem CACI oder CCI prädiktiv beeinflusst?
- Therapieform: (operativ oder konservativ) Häufigkeit des Therapieversagens bei den unterschiedlichen Behandlungsformen
- Smiley-Webster Score: Steht dieser patientenorientierte Wert im Zusammenhang mit der knöchernen Konsolidierung des Frakturspaltes und der Therapieform

2.7 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgte mithilfe der Programme Numbers (Apple, USA) und SPSS Statistics (IBM Analytics, USA) und wurde am Institut für Medizinische Informatik der JLU Gießen bzw. der Klinik für Neurochirurgie der JLU Gießen (Sigma Plot 12.3 Systat Software GmbH, Erkrath Deutschland) durchgeführt. Die Analyse der Daten, die retrospektiv aus routinemäßig erhobenen Parametern ohne eine vorherige Fallzahlplanung gewonnen wurden, erfolgt rein deskriptiv und exploratorisch in Anlehnung an die Vorgehensweise von Muche und seinen Mitarbeitern (Muche et al., 2000). Die im Folgenden aufgeführten Prozeduren sind in SPSS implementiert.

Es wurden mit Hilfe der NPAR1Way Prozedur alle Variablen separat geprüft, ob sie zur Prognose des Therapieversagens beitragen. Dies erfolgte in einem univariaten Regressionsmodell mit zugehörigem Likelihood-Ratio-Test. Nur wenn die Variable bei einem Signifikanzniveau von 20 % signifikant ist, wird sie im weiteren Verfahren berücksichtigt.

Als Nullhypothese wurde angenommen, dass die einzelnen Variablen „Alter des Patienten“, „CCI-Score bei Einlieferung“ und „Therapieentscheidung“ keinen Einfluss auf das Therapieversagen hat. Mit Hilfe des einseitigen und zweiseitigen Wilcoxon Two-Sample Tests wurde überprüft, ob diese Nullhypothese abgelehnt werden kann. Das Signifikanzniveau wurde auf 0,05 festgelegt.

Mit dem Kruskal-Wallis Test wurde überprüft, ob die als Gruppen definierten Patientenergebnisse Therapieversagen vs. Kein Therapieversagen hinsichtlich der untersuchten Variablen Alter, CCI und Therapiewahl aus einer Gesamtpopulation stammen. Die Nullhypothese bei diesem Test ist, dass zwischen den Gruppen kein Unterschied besteht.

Mit Hilfe der FREQ-Prozedur wurde der gegenseitige Einfluss von CCI und Therapieentscheidung anhand eines Chi-Quadrat Tests und eines Fischer-Exakt Tests untersucht.

3 Ergebnisse

3.1 Charakterisierung der Patientenkohorte

Nach Anwendung der Ein- und Ausschlusskriterien konnten die Daten von 57 Patienten in die Auswertung aufgenommen werden. Davon waren 30 Personen männlich (52,6 %). Bei der Einlieferung in das Gießener Uniklinikum litten 47 (82,5 %) Patienten unter moderaten bis starken Nackenschmerzen, die restlichen 10 Patienten (17,5 %) klagten zumindest über vorhandene Schmerzen. Kein Patient war schmerzfrei.

3.1.1 Altersstruktur

Das Alter der Patienten lag zwischen 3 und 93 Jahren mit einem Median von 73 Jahren. Die Altersverteilung ist in Abbildung 30 dargestellt. Dabei ist eine deutliche Steigerung der Häufigkeit bei den Alterskohorten ab 70 Jahren zu erkennen.

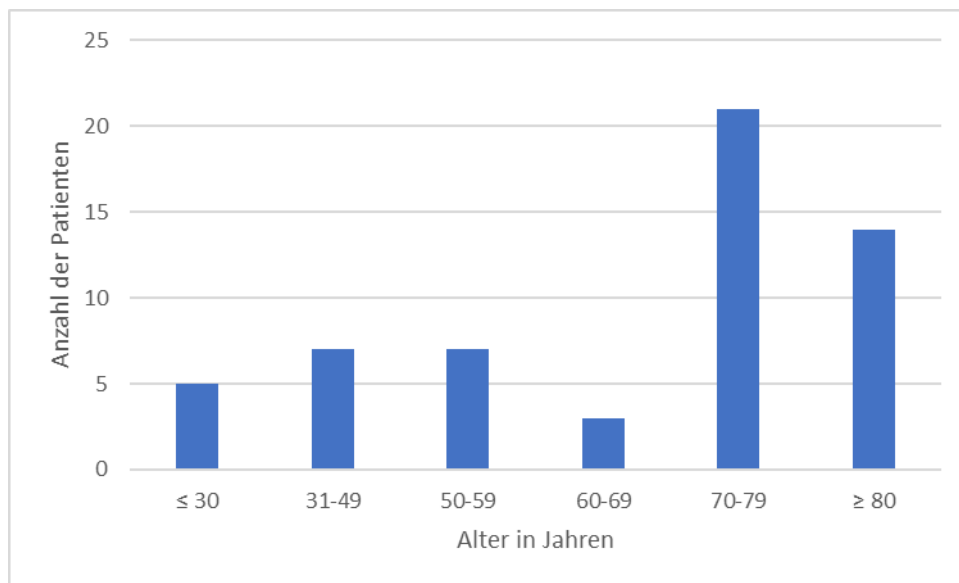


Abbildung 30: Altersverteilung der Patientenkohorte (n=57).

3.1.2 Klassifizierung der Densfrakturen

Von den 57 Patienten hatten 40 Patienten (70,2 %) eine Fraktur vom Typ II und 17 (29,8 %) vom Typ III nach Anderson und D'Alonzo. Die Einteilung der beiden Frakturtypen nach Alterskohorten zeigt keine Abhängigkeit des Frakturtyps vom Alter (Tabelle 5). Bei 22 der 57 Patienten (38,6 %) wurde die Fraktur aufgrund von Röntgen- und/oder Röntgenfunktionsaufnahmen als instabil gewertet. Bei 31 der 57 Patienten als stabil (54,4 %), bei 4 Patienten (7,0 %) konnte nachträglich aus den Aufnahmen kein Befund abgeleitet werden.

Aufgrund der geringen Patientenzahlen vor allem in den jungen Kohorten wurde auf eine statistische Absicherung dieser Aussage verzichtet. Die Dislokation der Frakturfragmente in Abhängigkeit vom Frakturtyp ist in Tabelle 6 zusammengefasst. In Frakturklasse II lag bei 42,5 % der Patienten sicher eine Dislokation vor, in Frakturklasse III bei 52,9 % der Patienten.

Weiterhin zeigt sich auch keine Altersabhängigkeit bezüglich der Frage, ob es sich bei der Densfraktur um die einzige Fraktur handelt, oder ob es während des Traumas noch zu weiteren Frakturen der HWS oder in anderen Bereichen des Körpers gekommen ist (Tabelle 5).

Tabelle 5: Vorkommen der unterschiedlichen Frakturtypen in den einzelnen Alterskohorten.

Alterskohorte	Frakturtyp II			Frakturtyp III		alleinige Fraktur	
	n	n	[%]	n	[%]	n	[%]
≤ 30	5	3	60,0	2	40,0	0	0
31-49	7	3	42,9	4	57,1	4	57,1
50-59	7	6	85,7	1	14,3	3	42,3
60-69	3	3	100,0	0	0	2	66,6
70-79	21	16	76,2	5	23,8	10	47,6
≥ 80	14	9	64,3	5	35,7	7	50,0
Summe	57	40	70,2	17	29,8	26	45,6

n: Anzahl der Patienten; Einteilung der Frakturtypen nach Anderson und D'Alonzo.

Tabelle 6: Dislokation der Fragmente.

Frakturtyp	n	Dislokation					
		nein		ja		keine Angaben	
		n	[%]	n	[%]	n	[%]
II	40	16	40	17	42,5	7	17,5
III	17	7	41,2	9	52,9	1	5,9

3.1.3 Begleitverletzungen und Vorerkrankungen

Bei der Einweisung wiesen 30 Patienten (52,6 %) eine schwerwiegende Begleitverletzung auf. Folgende Begleitverletzungen wurden dokumentiert: Eine isolierte HWS-Fraktur lag in 10 Fällen vor (17,5 %), bei 15 Patienten konnten weitere knöcherne

Verletzungen festgestellt werden (26,3 %), weitere Weichteil- oder Organverletzungen lagen in 2 Fällen vor (3,5 %) und ein Polytrauma bei 3 Patienten (5,3 %). Bei 27 Patienten wurden keine Begleitverletzungen dokumentiert (47,4 %).

Weiterhin wurden die Komorbiditäten und Risikofaktoren mit in die Bewertung aufgenommen. 22 der Patienten (38,6 %) litten unter arterieller Hypertonie, 11 (19,3 %) unter einer koronaren Herzkrankheit und 6 (10,5 %) unter Diabetes mellitus. Je 3 Patienten (je 5,3 %) hatten ein Malignom, litten unter Demenz oder unter Hypothyreose. Unter Osteoporose litten 4 (7 %) Patienten, einer (1,8 %) litt unter Morbus Bechterew, ein weiterer unter Polyarthritits, ein weiterer litt unter Depressionen. Weitere 6 Patienten hatten Risikofaktoren wie Adipositas (1; entspricht 1,8 %) und Tabakabusus (5, entspricht 8,8 %). Insgesamt hatten 19 Patienten (33,3 %) keinerlei Vorerkrankung, bei den übrigen 38 (66,7 %) Patienten war mindestens eine Komorbidität oder ein Risikofaktor vorhanden.

3.1.4 Charlson Comorbidity Index und alterskorrigierter Charlson Comorbidity Index

Einerseits ist der CCI ein bereits etablierter Parameter zur Abschätzung des Therapieerfolges. Auf der anderen Seite treten die im Rahmen dieser Studie untersuchten Frakturen des Dens axis vor allem in der älteren Bevölkerungsgruppe auf. Daher sollte überprüft werden, ob dieses Tool auch in der Fragestellung der hier vorgelegten Arbeit verwendbar ist.

Im Zuge der Eingangsuntersuchung wurde der CCI und der alterskorrigierte CACI erhoben (Abbildung 31). Während 33 der 57 Patienten (57,9 %) einen CCI-Wert von 0 aufwiesen, zeigte sich beim CACI ein differenzierteres Bild. Hier erreichten lediglich 11 (19,3 %) der Patienten den niedrigsten Wert.

Da das Ziel der Studie war unter anderem, Prädiktoren für ein Therapieversagen zu finden. Daher wurde mit dem CACI weitergearbeitet, auf dessen Basis (Median als Grenze zwischen den beiden Gruppen) die Patienten in 2 Untergruppen eingeteilt wurden, die als Hochrisiko- und Normalrisikogruppe (HR bzw. NR) bezeichnet wurden. Die Hochrisikogruppe bestand aus 27 Patienten (47,4 %), die einen CACI von mehr als 3 hatten, die Normalrisikogruppe aus 30 Patienten (52,6%), die einen CACI zwischen 0 und 3 hatten.

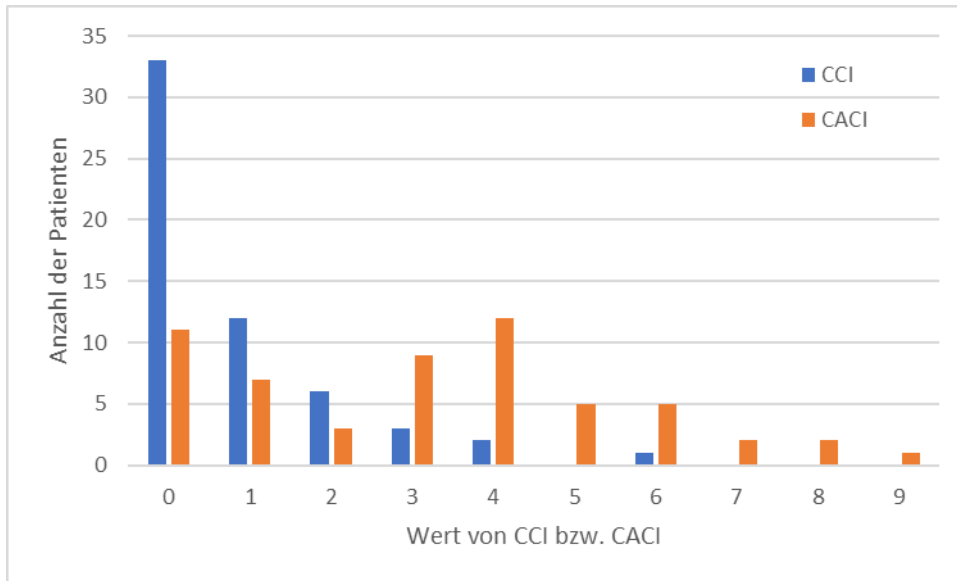


Abbildung 31: Charlson Comorbidity-Index und Charlson Age Comorbidity Index vor Therapiebeginn.

3.1.5 ASIA-Status

Der bei Aufnahme erhobene ASIA-Status ergab, dass 53 Patienten (93,0 %) ohne ein begleitendes neurologisches Defizit zugewiesen wurden. Bei 3 Patienten (5,3 %) lag ein inkompletter Querschnitt und lediglich bei 1 Patienten (1,7 %) lag ein kompletter Querschnitt vor. Von den Patienten mit einer inkompletten Querschnittssymptomatik hatten alle eine Typ II-Fraktur, der Patient mit der kompletten Querschnittslähmung hatte eine Typ III-Fraktur.

3.2 Therapie

3.2.1 Zeitraum zwischen Unfall und Therapiebeginn

Im Durchschnitt lag die Zeit zwischen dem Unfall und der Einweisung bzw. Überweisung ins Gießener Uniklinikum bei weniger als 1 Tag (Range: 0–42 Tage). Der Median der Zeit zwischen Zuweisung und einer im Haus eingeleiteten Therapie lag bei 6 Tagen.

Der Zeitraum zwischen dem Unfall und dem Therapiebeginn ist in Abbildung 32 zusammengefasst. Im Durchschnitt lag dieser Zeitraum bei 10 Tagen, der Median lag bei 6 Tagen. Bei 5 Patienten wurde die Therapie am Tag des Unfallereignisses initiiert, bei einem Patienten lagen zwischen dem Unfallereignis und dem Therapiebeginn 72 Tage.

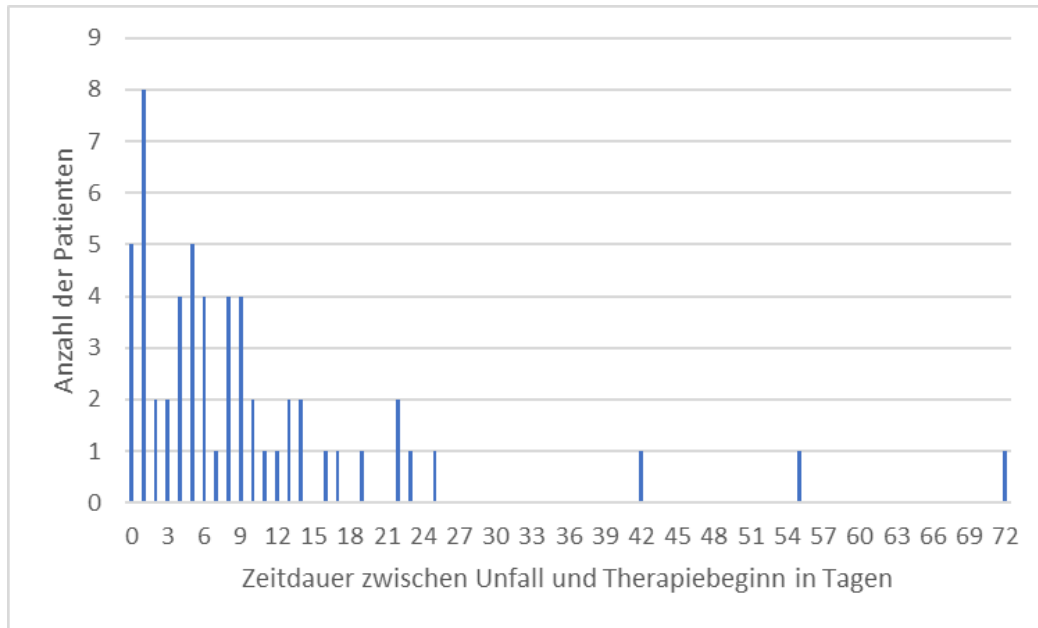


Abbildung 32: Zeitraum zwischen Unfall und Therapiebeginn der Patienten am UK Gießen.

Patienten, die zwei Tage oder noch später nach dem Unfallereignis in das Gießener Uniklinikum kamen, wurden meist von den primärversorgenden Krankenhäusern überwiesen. Bei den Patienten, die eine Woche und später nach dem Trauma eingewiesen wurden, handelte es sich in vier Fällen um reine Erstversorgungen im Haus. Der Patient, der erst 42 Tage nach dem Unfall aufgenommen wurde, wurde unmittelbar nach dem Trauma stationär in einer anderen Klinik versorgt und nach einem Tag wieder entlassen. Er litt zum Zeitpunkt der Aufnahme in Gießen an starken Nackenschmerzen, hatte aber keine Lähmungssymptome.

3.2.2 Therapieentscheidung

Von allen Patienten wurden 49,1 % (28 Patienten) primär chirurgisch therapiert, 50,9 % (29 Patienten) primär konservativ. Die Therapieverteilung ist in Tabelle 7 zusammengefasst. Patienten mit einer Fraktur vom Typ II wurden meist operativ versorgt (62,5 %), Patienten mit einer Fraktur vom Typ III dagegen meist konservativ (82,4 %). Bei der konservativen Versorgung überwog die Anwendung des Halo-Fixateurs, bei der chirurgischen Versorgung der Typ-II-Frakturen die ventrale Densverschraubung nach Böhler. Bei zwei dieser Patienten wurde die Densbasis zusätzlich zementiert.

Tabelle 7: Therapieform in Bezug auf den Frakturtyp.

Therapie		Frakturtyp			
		II		III	
		n = 40	[%]	n = 17	[%]
konservativ	29 Patienten (50,9 %)	15/40	37,5	14/17	82,4
	Keine frakturspezifische Therapie	-	0	1/14	7,1
	Zervikalorthese	6/15	40,0	4/14	28,6
	Halo-Fixateur	9/15	60,0	9/14	64,3
chirurgisch	28 Patienten (49,1 %)	25/40	62,5	3/17	17,6
	Ventrale Densverschraubung nach Böhler	14/25	56,0	-	0
	HWK1/2-Spondylodese nach McGuire	8/25	32,0	1/3	33,3
	HWK1/2-Spondylodese nach Harms	-	0	1/3	33,3
	Craniozervikale Spondylodese	3/25	12,0	1/3	33,3

Ferner wurde untersucht, ob das Alter bei der Therapieentscheidung, ob konservativ oder chirurgisch behandelt wird, eine Rolle spielt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8 zusammengefasst. Lediglich bei den Patienten, die jünger als 30 Jahre bzw. die älter als 80 Jahre waren wurde eine konservative Therapie bevorzugt. In der Altersgruppe zwischen 60 und 69 Jahren wurde dagegen eine chirurgische Vorgehensweise favorisiert.

Tabelle 8: Therapieform in Bezug auf das Alter der Patienten.

Altersgruppe	n	konservativ	[%]	chirurgisch	[%]
≤ 30	5	5/5	100	0/5	0
31-49	7	3/7	42,9	4/7	57,1
50-59	7	3/7	42,9	4/7	57,1
60-69	3	0/3	0	3/3	100
70-79	21	9/21	42,9	12/21	57,1
≥ 80	14	9/14	64,3	5/14	35,7

Weiterhin wurde überprüft, ob der CACI einen Einfluss auf die Therapieentscheidung hat. Die Aufstellung in Tabelle 9 zeigt das man sich in der Gruppe der CACI Patienten mit ≤ 3 Punkten deutlich häufiger für einen primär chirurgischen Therapieansatz

entschieden hat (56,7% -> 40,7%) als in der Gruppe der Patienten mit einem CACI von >3. Allerdings ist dieser Unterschied nicht statistisch signifikant.

Tabelle 9: Therapien in Korrelation zum CACI.

CACI-Score	n	konservativ	[%]	chirurgisch	[%]
≤ 3	30	13	43,3	17	56,7
> 3	27	16	59,3	11	40,7

3.2.3 Komplikationen

Bei 42 Patienten (73,7 %) traten keine Komplikationen auf. Bei 8 Patienten (14,0 %) konnte eine, bei 7 weiteren (12,3 %) mehrere behandlungsassoziierte Komplikationen beobachtet werden.

In der primär chirurgisch therapierten Gruppe (28 Patienten) waren 11 Patienten mit 20 Komplikationen betroffen (39,3 % der Gruppe). Weitere 4 Personen waren in der 29 Patienten umfassenden primär konservativen Gruppe betroffen (13,8 % der Gruppe). Bei diesen Patienten wurde jeweils nur eine Komplikation dokumentiert. Die Art der Komplikationen ist in Tabelle 10 zusammengefasst. Bei der chirurgisch behandelten Gruppe traten Pneumonien, Heiserkeit und Schluckstörungen auf, die bei der konservativ behandelten Gruppe nicht festgestellt wurden. Eine Dislokation des Densfragments wurde dagegen nur in der konservativ behandelten Gruppe festgestellt. In 5 Fällen führten die Komplikationen zum Tod des Patienten. In der konservativ behandelten Gruppe verstarben 2 Patienten (6,9 % der Gruppe), in der chirurgisch behandelten 3 (10,7 % der Gruppe).

Tabelle 10: Behandlungsassoziierte Komplikationen.

Behandlungsassoziierte Komplikationen	chirurgische Gruppe n=28	konservativ beh. Gruppe n=29
Lungenembolie	1	
Kardiale Dekompensation	2	1
Multiorganversagen	1	
Ateminsuffizienz	1	1
Sepsis	1	
Pneumonie	3	
Dysphasie	1	
Heiserkeit	2	
Pneumothorax	1	
Schluckstörung	3	
Sehstörung	1	
Verletzung der A. vertebralis	1	
Postop. kognitive Dysfunktion	1	
Wundheilungsstörung	1	1
Dislokation des Densfragments		1

3.2.4 Reoperationen innerhalb eines Monats

Drei der primär konservativ mit einem Halo-Fixateur versorgten Patienten mussten innerhalb von 30 Tagen doch operiert werden. Diese sind daher als Therapieversager zu werten, da sich die ursprünglich gewählte Therapieform damit als falsch erwies. Ein Patient, der bereits primär chirurgisch mit einer HWK1/2 -Verschraubung nach Magerl versorgt wurde, musste sich einer erneuten Operation unterziehen, da das Gelenk nicht ausreichend stabilisiert war und die Densspitze erneut abkippte.

3.3 Zustand der Patienten bei der Entlassung

3.3.1 Verweildauer im Krankenhaus

Im Durchschnitt lag die mittlere Verweildauer bei 12 Tagen, mit einer Spannweite von 1-59 Tagen. Weiterhin wurde untersucht, von welchen Parametern die Verweildauer abhängt (Tabelle 11). Die Verweildauer in Abhängigkeit vom Alter der Patienten, vom Frakturtyp und vom CACI unterschied sich nicht. Während aber konservativ behandelte

Patienten im Schnitt 10 Tage im Klinikum verbrachten, war dies bei den operativ behandelten Patienten 19 Tage.

Tabelle 11: Verweildauer im Krankenhaus in Abhängigkeit von unterschiedlichen Parametern.

Parameter	Verweildauer [d]				
		n	Range	Mittel	Median
Alter	< 30	5	7-20	10,2	11
	31-49	7	3-18	10,3	11
	50-59	7	6-59	22,3	7
	60-69	3	6-18	12,3	13
	70-79	21	3-58	16,0	13
	≥ 80	14	1-31	13,0	13
Frakturtyp	II	40	3-59	15,9	12,5
	III	17	1-25	12,0	11
CACI	≤ 3	30	3-59	14,1	11
	>3	27	1-58	15,0	13
Behandlung	konservativ	29	1-28	10,0	13
	operativ	28	4-59	19,0	18

Alter in Jahren, Frakturtyp nach Anderson und D´Alonzo; n: Anzahl der Patienten; d: Tage

3.3.2 ASIA-Score und Nackenschmerzen

Von den 52 entlassenen Patienten gaben 50 eine Verbesserung der Nackenschmerzen im Vergleich zum Zustand vor der Therapie an, zwei Patienten berichteten von gleichbleibenden Nackenschmerzen. Ein Patient wurde mit einer inkompletten Querschnittslähmung entlassen, dieser verstarb noch vor der Follow-up-Untersuchung. Alle anderen Patienten wurden ohne dokumentierte neurologische Defizite gemäß ASIA-Score entlassen.

3.3.3 Smiley-Webster-Score

Um das Ergebnis der Behandlung klassifizieren zu können, wurde der SW-Score bei der Entlassung aus dem Krankenhaus bei 52 Patienten ermittelt, in den der neurologische Status, aber auch eventuell noch vorhandene Schmerzen einfließen. Scores von 1 und 2 wurden als Therapieerfolg gewertet, die Scores von 3 und 4 in Zusammenhang mit einer ausbleibenden knöchernen Konsolidierung als Therapieversager (Tabelle 12).

Von den 52 Patienten, die entlassen werden konnten, wurden 7 (13,5 %) als Therapieversager gewertet. Insgesamt galten bei der Entlassung 4 Patienten aus der konservativen Gruppe (14,8 %) und 3 Patienten aus der operativen Gruppe (12,0 %) als Therapieversager. In der Hochrisikogruppe mit einem CACI von mehr als 3 lag die Rate der Therapieversager bei 22,7 % im Vergleich zu 6,7 % bei der Normalrisikogruppe. Patienten mit einer Fraktur vom Typ III waren unter den Therapieversagern nicht zu finden, wohingegen 16,7 % der Patienten mit Typ II-Fraktur zu dieser Gruppe gerechnet werden mussten. Die Gruppe der Patienten unter 50 Jahren war bei den Therapieversagern nicht vertreten. In der Alterskohorte zwischen 50 und 59 Jahren waren es 14,3 %, in der Kohorte zwischen 60 und 69 Jahren 33,3 %, in der Kohorte zwischen 70 und 79 Jahren 15 % und bei den über 80jährigen 20 %.

Tabelle 12: Smiley-Wester-Score bei der Entlassung in Abhängigkeit von unterschiedlichen Parametern.

Parameter		Smiley-Webster Score				
		n	1 [%]	2 [%]	3 [%]	4 [%]
gesamt		52	6	39	5	2
Alter	< 30	5		5 [100]		
	31-49	7		7 [100]		
	50-59	7		6 [85,7]	1 [14,3]	
	60-69	3		2 [66,7]	1 [33,3]	
	70-79	20	6 [30,0]	11 [55,0]	2 [10,0]	1 [5,0]
	≥ 80	10		8 [80,0]	1 [10,0]	1 [10,0]
Frakturtyp	II	36	5 [13,9]	25 [69,4]	4 [11,1]	2 [5,6]
	III	15	1 [6,7]	14 [93,3]		
CACI	≤ 3	30	4 [13,3]	24 [80,0]	2 [6,7]	
	>3	22	2 [9,1]	15 [68,2]	3 [13,6]	2 [9,1]
Behandlung	konservativ	27	1 [3,7]	22 [81,5]	3 [11,1]	1 [3,7]
	operativ	25	5 [20,0]	17 [68,0]	2 [8,0]	1 [4,0]

3.4 (Re-) Operationen mehr als 30 Tage nach Therapiebeginn

Auch mehr als einen Monat nach dem Beginn der primären Therapie war bei weiteren sechs Patienten, die konservativ versorgt wurden, eine Operation nötig (20,7 %). Damit sank der Anteil der allein konservativ behandelten Patienten von ursprünglich 50,9 % auf 28,6 %. Von diesen 6 Patienten waren 4 primär mit einem Halo-Fixateur und 2 mit einer Zervikalorthese versorgt worden. Gründe für die Reoperation waren entweder Probleme mit dem Halo-Fixateur, wobei sich entweder die Pins entzündet hatten oder eine Luxation aus dem Halo-Fixateur auftrat oder die fehlende knöcherne Konsolidierung.

Auch von den primär operativ versorgten Patienten mussten 4 weitere erneut operiert werden. Davon waren je 2 primär mit der ventralen Densverschraubung nach Böhler bzw. mittels dorsaler HWK1/2 -Verschraubung nach Magerl versorgt worden. Die Gründe für die Reoperationen waren Implantatfehlagen, eine Infektion/Wundheilungsstörung und eine fehlende knöcherne Konsolidierung mit Liquorfistel.

3.5 Zustand der Patienten bei der Kontrolluntersuchung

Noch bevor die Kontrolluntersuchung durchgeführt werden konnte, war 1 weiterer Patient verstorben, er hatte eine Fraktur vom Typ II und war chirurgisch behandelt worden. Mehr als die Hälfte der Patienten hatten sich im ersten Jahr nach dem Ereignis zur Kontrolluntersuchung eingefunden, ein weiteres Fünftel im 2. Jahr (Abbildung 33). Insgesamt konnte die Follow-up-Untersuchung bei 51 Patienten durchgeführt werden. Der Zeitpunkt des Follow-ups lag im Median bei 11 Monaten nach dem Unfallereignis. Für die Bewertung wurden die Daten des letzten Follow-up-Termins herangezogen, da damit ein Therapieerfolg oder Therapieversagen zuverlässiger bewertet werden kann als bei Follow-up-Terminen, die näher am Unfallereignis lagen.

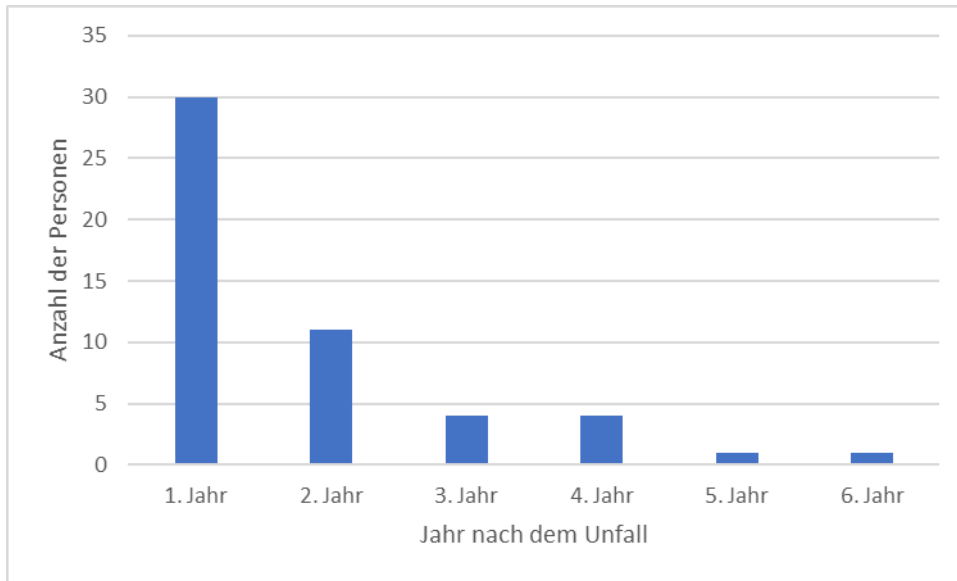


Abbildung 33: Zeitspanne zwischen Unfall und Kontrolluntersuchung (n=51).

3.5.1 Mobilität, Nackenschmerzen und Einnahme von Analgetika

Die Mobilität und der ASIA-Score blieben im Vergleich zum Zustand bei der Entlassung unverändert. Es klagten noch 10 Patienten über geringe und 9 Patienten über moderate Nackenschmerzen. Kein Patient litt unter starken Nackenschmerzen. 8 Patienten nahmen regelmäßig Analgetika ein, 43 gaben an, bei Bedarf Schmerzmittel einzunehmen.

3.5.2 Radiologische Untersuchung

Die Kontrolluntersuchung beinhaltete auch eine Überprüfung der Fraktur mit Hilfe bildgebender Untersuchungsmethoden. Das radiologische Ergebnis wurde in 73 % der Fälle (37 Patienten) mittels CT bewertet, in 25 % der Fälle mittels Röntgen (13 Patienten) sowie in 2 % (1 Patient) mittels MRT. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Tabelle 13 zusammengefasst.

Insgesamt konnte bei 38 % der Patienten eine unzureichende knöcherne Konsolidierung des Frakturspaltes festgestellt werden. Es zeigte sich, dass der CACI ($p=0,025$) einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis der Verknöcherung hat. Das Alter zeigte eine Tendenz zum Einfluss ($p=0,0911$). Personen mit einem niedrigen CACI haben eine höhere Wahrscheinlichkeit (73,3 %), dass eine vollständige knöcherne Konsolidierung des Frakturspaltes eintritt. Weiterhin ist diese Wahrscheinlichkeit bei den jüngeren Patienten erhöht (zwischen 85 und 100 %). Das radiologische Ergebnis war nicht mit dem Frakturtyp ($p=0,3197$) oder der Behandlung ($p=0,3591$) korreliert.

Tabelle 13: Status der Frakturen bei der Kontrolluntersuchung in Abhängigkeit von Alter, und CACI der Patienten, Frakturtyp und Behandlung.

Parameter		Status der Fraktur			
		n	1 [%]	2 [%]	3 [%]
gesamt		51	31 [60,8]	7 [13,7]	13 [25,5]
Alter	< 30	5	5 [100]		
	31-49	7	6 [85,7]	1 [14,3]	
	50-59	7	6 [85,7]	1 [14,3]	
	60-69	3	3 [100]		
	70-79	20	7 [35,0]	5 [25,0]	8 [40,0]
	≥ 80	9	4 [44,4]		5 [55,6]
Frakturtyp	II	36	20 [55,5]	6 [16,7]	10 [27,8]
	III	15	11 [73,3]	1 [6,7]	3 [20,0]
CACI	≤ 3	30	22 [73,4]	4 [13,3]	4 [13,3]
	>3	21	9 [42,9]	3 [14,2]	9 [42,9]
Behandlung	konservativ	27	18 [66,7]	4 [14,8]	5 [18,5]
	operativ	24	13 [54,2]	3 [12,5]	8 [33,3]

Status 1: komplette knöcherne Konsolidierung; Status 2: partielle knöcherne Konsolidierung; Status 3: Pseudarthrose.

3.5.3 Smiley-Webster-Score

Um die eventuell noch vorhandenen Schmerzen, die Mobilität und eine Normalisierung des Lebens der Patienten nach der Densfraktur und der Therapie in die Auswertung einfließen zu lassen, wurde auch bei der Kontrolluntersuchung bei den 51 Patienten der SW-Score bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 14 zusammengefasst. Wird davon ausgegangen, dass ein Smiley-Webster-Score von 3 oder 4 ein schlechtes Resultat der Behandlung bedeutet, dann ist die Behandlung bei einem Fünftel der Patienten nicht zufriedenstellend. Eine Abhängigkeit von den untersuchten Parametern, wie Alter der Patienten ($p=0,3107$), Frakturtyp ($p=0,8095$), Behandlung ($p=0,2755$) ist dabei nicht zu nachzuweisen. Allerdings zeigte sich eine Tendenz zur Abhängigkeit von Komorbiditäten ($p=0,0688$).

Tabelle 14: Smiley-Webster-Score der Patienten bei der Kontrolluntersuchung in Abhängigkeit von Alter und CACI der Patienten, Frakturtyp und Behandlung.

Parameter		Smiley-Webster-Score			
		n	1 [%]	2 [%]	3 [%]
gesamt		51	21 [41,2]	19 [37,2]	11 [21,6]
Alter	< 30	5	2 [40,0]	1 [20,0]	2 [40,0]
	31-49	7	2 [28,6]	4 [57,1]	1 [14,3]
	50-59	7	3 [42,9]	4 [57,1]	
	60-69	3		1 [33,3]	2 [66,7]
	70-79	20	10 [50,0]	6 [30,0]	4 [20,0]
	≥ 80	9	4 [44,4]	3 [33,3]	2 [22,3]
Frakturtyp	II	36	16 [44,4]	13 [36,2]	7 [19,4]
	III	15	5 [33,3]	6 [40,0]	4 [26,7]
CACI	≤ 3	30	12 [40,0]	12 [40,0]	6 [20,0]
	>3	21	9 [42,9]	7 [33,3]	5 [23,8]
Behandlung	konservativ	27	11 [40,7]	10 [37,0]	6 [22,3]
	operativ	24	10 [41,7]	9 [37,5]	5 [20,8]

n: Anzahl der Patienten; Smiley-Webster-Score 1: exzellent, 2: gut; 3: akzeptabel.

3.6 Therapieversagen

Bei 20 Patienten der 57 eingeschlossenen Patienten zeigte sich ein Therapieversagen. Der Grund für das Therapieversagen und die Einordnung in die entsprechende Kategorie des Therapieversagens ist für jeden einzelnen der betroffenen Patienten in Tabelle 15 aufgelistet. Der Hauptgrund für das Therapieversagen war die Notwendigkeit einer Reoperation aufgrund eines schlechten radiologischen Ergebnisses. Ein zunächst konservativ behandelter Patient musste aufgrund seiner mangelnden Mitarbeit bei der Behandlung mit dem Halo-Fixateur operiert werden, bei einem weiteren war der Grund für die Reoperation eine Dislokation der Schrauben. Dieser Patient litt an einer Fraktur des Dens axis und an einer Atlasfraktur. Weitere 6 Patienten sind nach der Therapieentscheidung verstorben.

Tabelle 15: Gründe für das Therapieversagen der 20 Patienten.

Patient	SW und Radio	(Re)OP und Radio	Kompl.	Tod
2	X	X		
3	X			
4			X	X
7		X		
9		X		
14			X	X
16		X		
25	X	X		
26		X		
28		X		
34		X		
36	X	X	X	
38		X	X	
39			X	X
44		X	X	
47			X	X
50			X	X
51	X			
53			X	X
55		X		
Σ	5	12	9	6

SW: Smiley-Webster Score bei der Nachsorgeuntersuchung ungenügend; Radio: knöchernen Durchbauung bei der Nachsorgeuntersuchung ungenügend; (Re)OP: (Re-) Operation; Kompl.: schwere behandlungsassoziierte Komplikationen..

3.6.1 Abhängigkeit vom Alter der Patienten

Beim Smiley-Webster-Score war der Trend zu einer Altersabhängigkeit des klinischen Therapieerfolges zu erkennen (Kapitel 3.5.3). Daraufhin wurde der allgemeine Therapieerfolg der einzelnen Altersgruppen untersucht (Tabelle 17). Es konnte ein Zusammenhang zwischen dem Alter des Patienten und einem Therapieversagen gezeigt werden ($p=0,0425$).

Tabelle 16: Abhängigkeit des Therapieversagens vom Alter.

Alter		Therapieform							TV	
	n	1	2	3	4	5	6	7	n	[%]
<30	5			5					1	20,0
31-49	7			3		2	1	1	2	28,6
50-59	7			3		3		1	2	28,6
60-69	3				2	1				
70-79	21		4	5	8	3		1	7	33,3
≥80	14	1	6	2	4			1	8	57,1

TV: Therapieversagen; n: Anzahl der Patienten; Therapieformen: 1: keine frakturspezifische Therapie/Konservativ; 2: Zervikalorthese; 3: Halo-Fixateur; 4: Ventrale Densverschraubung (Böhler); 5: HWK1/2 -Verschraubung nach Magerl (Klassisch Dorsal); 6: HWK1/2 -Verschraubung nach Harms (4 Schrauben, Ventral); 7: Cranio-zervikale Spondylodese (nur mit Occip. Platte).

3.6.2 Abhängigkeit vom Geschlecht der Patienten

Ein Therapieversagen trat in insgesamt 35,1 % der Fälle auf. Ein Therapieversagen war in 29,6 % der Fälle bei den Frauen zu verzeichnen, wohingegen es bei den Männern insgesamt in 40,0 % der Fälle zu einem Therapieversagen kam ($p=0,2118$).

3.6.3 Abhängigkeit vom Typ der Densfraktur

Insgesamt gab es keine Differenz in Bezug auf ein Therapieversagen zwischen den betrachteten Frakturtypen. Es gab insgesamt 32,5 % Therapieversager unter den Typ II klassifizierten, im Gegensatz zu 41,2 % bei den Typ-III-Frakturen. Der Unterschied war aber statistisch nicht nachweisbar ($p=0,1303$).

3.6.4 Abhängigkeit von der Behandlung

Ein Therapieversagen trat in der konservativ behandelten Gruppe bei 44,8 % der Patienten auf, bei den operativ versorgten Patienten in 25 % der Fälle ($p=0,2118$). Die Therapieversager waren sowohl in der primär chirurgischen als auch primär konservativen Gruppe zu verzeichnen. Die Aufschlüsselung der Gründe für das Therapieversagen in der konservativ bzw. chirurgisch behandelten Gruppe sind in Tabelle 17 (konservativ behandelte Gruppe) und Tabelle 18 (chirurgisch behandelte Gruppe) dargestellt.

Beim ventralen Zugang kam es in 33,3 % der Fälle zu einem Therapieversagen. Hatte der Operateur sich allerdings für einen dorsalen Zugang entschieden, lag die Rate bei 15,4 %.

Tabelle 17: Gründe des Therapieversagens bei primär konservativ therapierten Patienten.

Grund des Therapieversagens	Halo-Fixateur n=18 (%)	Zervikalorthese n=11 (%)
Tod	0 (0,0)	2 (18,2)
Smiley-Webster	0 (0,0)	1 (9,1)
Schwere behandlungsassoziierte Komplikation	1 (5,6)	0 (0,0)
Ausbleibende knöchernerne Konsolidierung und Reoperation	6 (33,3)	3 (27,3)
Therapieversager gesamt	7 (38,9)	6 (54,5)

Tabelle 18: Gründe des Therapieversagens bei primär chirurgisch therapierten Patienten.

Grund des Therapieversagens	ventrale Schrauben- osteosynthese n=15 (%)	dorsale Spondylo- dese n=13 (%)
Tod	3 (20,0)	1 (7,7)
Ausbleibende knöchernerne Konsolidierung und Reoperation	2 (13,3)	1 (7,7)
Therapieversager gesamt	5 (33,3)	2 (15,4)

3.6.5 Abhängigkeit von der Zugehörigkeit zur Risikogruppe

Zunächst wurden die Patienten unabhängig vom Alter und allein aufgrund ihrer dokumentierten Risikofaktoren nach dem CCI in 2 Gruppen eingeteilt: Patienten mit geringem oder moderatem Risiko mit einem CCI von 0 oder 1 und Patienten mit einem erhöhten Risiko CCI > 1. Die Bedeutung der Gruppenzugehörigkeit für die knöchernerne Konsolidierung, das klinische Outcome (SW-Score) und ein Therapieversagen sind in Tabelle 19 zusammengefasst. Der CCI hat einen deutlichen Einfluss auf das Therapieversagen, eine Tendenz zum Einfluss auf den SW-Score und damit das klinische Ergebnis und keinen Einfluss auf die Rate der knöchernerne Konsolidierung des Frakturspaltes.

Tabelle 19: Korrelation der knöchernen Konsolidierung, des klinischen Outcomes und des Therapieversagens mit der Zugehörigkeit zur CCI-Gruppe.

	CCI > 1	CCI ≤1	p
n=57, (weibl.: n=27)	n=12	n=45	
Inkomplette knöcherne Konsolidierung	42 %	33 %	0,310
Schlechtes Klinisches Outcome	25 %	18 %	0,069
Therapieversagen	67 %	27 %	0,025

CCI: Charlson Comorbidity Index; n: Anzahl der Patienten; p: Signifikanz; Schlechtes klinisches Outcome: Smiley-Webster Score von 3 oder 4; knöcherne Konsolidierung radiologisch bestimmt.

Es wurden 27 Patienten als Hochrisikogruppe mit einem CACI über 3 (HR) sowie 30 Patienten als Normalrisikogruppe (NR) klassifiziert (Kapitel 3.1.4). Das Alter der Patienten war ein hochsignifikanter Einflussfaktor auf die Gruppeneinteilung ($p < 0,001$). Das zeitliche Intervall zwischen Unfall und Aufnahme in der Klinik korrelierte dagegen nicht mit der Gruppenzugehörigkeit ($p = 0,499$), ebenso wenig der Zeitpunkt des Follow-Ups in Monaten ($p = 0,722$).

Insgesamt erlitten 40 Patienten eine Typ II- und 17 eine Typ-III-Fraktur, wobei die Frakturtypen in beiden CACI-Gruppen gleich verteilt waren ($p = 1,000$). Eine Operation erfolgte bei 41 % der Patienten der HR-Gruppe und bei 57 % der Patienten der NR-Gruppe, dem gegenübergestellt wurden die Patienten in insgesamt 29 Fällen konservativ behandelt ($p = 0,349$). Die Korrelation der Zugehörigkeit zur HR bzw. NR-Gruppe für die Art der Densfraktur und die Art der Versorgung, die bei einer Densfraktur von Bedeutung sind, ist in Tabelle 20 zusammengefasst.

Tabelle 20: Korrelation des Frakturtyps und der operativen Versorgung mit der Zugehörigkeit zur Hochrisikogruppe und zur Normalrisikogruppe (CACI).

	HR	NR	p
n=57, (weibl.: n=27)	n=27	n=30	
Typ II Fraktur	70 %	70 %	1,000
Typ III Fraktur	30 %	30 %	1,000
Operative Versorgung	41 %	57 %	0,349

HR: Hochrisikogruppe mit einem alterskorrigierten Charlson Comorbidity Index (CACI) >3; NR: Normalrisikogruppe mit einem CACI ≤3; n: Anzahl der Patienten; p: Signifikanz

Ein Therapieversagen zeigte sich bei 20 Patienten, 14 dieser Patienten gehörten zur HR- und 6 Patienten zur NR-Gruppe ($p=0,025$ vs. kein Therapieversagen). Der Einfluss der Zugehörigkeit zu den beiden Risikogruppen auf die patientenrelevanten Ergebnisparameter der knöchernen Konsolidierung ($p=0,057$), des klinischen Outcomes (Smiley-Webster Score; $p=0,984$) und des Therapieversagens ($p=0,025$) ist in Tabelle 21 zusammengefasst.

Tabelle 21: Korrelation der knöchernen Konsolidierung, des klinischen Outcomes und des Therapieversagens mit der Zugehörigkeit zur Hochrisikogruppe und zur Normalrisikogruppe (CACI).

	HR	NR	p
n=57, (weibl.: n=27)	n=27	n=30	
Inkomplette knöcherner Konsolidierung	57 %	27 %	0,057
Schlechtes Klinisches Outcome	24 %	20 %	0,984
Therapieversagen	52 %	20 %	0,025

HR: Hochrisikogruppe mit einem alterskorrigierten Charlson Comorbidity Index CACI >3 ; NR: Normalrisikogruppe mit einem CACI ≤ 3 ; n: Anzahl der Patienten; p: Signifikanz; Schlechtes klinisches Outcome: Smiley-Webster Score von 3 oder 4; knöcherner Konsolidierung radiologisch bestimmt.

Damit ist die Korrelation des CACI mit dem Therapieversagen deutlich vorhanden ($p=0,025$). Patienten aus der Hochrisikogruppe haben eine weit höhere Wahrscheinlichkeit, als Therapieversager gewertet zu werden als Patienten aus der Normalrisikogruppe. Somit ist eine Bewertung des CACI als prädiktiven Faktor für das Ergebnis einer Behandlung der Fraktur des Dens axis möglich.

Gründe für ein Therapieversagen bei den HR-Patienten waren: Tod des Patienten ($n=6$), schwere Komplikation ($n=1$), (Re-) Operation bei knöcherner Non-Fusion ($n=5$) sowie schlechter SW/Non-Fusion ($n=2$). Die Gründe für ein Therapieversagen bei den NR-Patienten waren ausschließlich (Re-) Operationen bei knöcherner Non-Fusion. 100 % ($n=6$) der Therapieversager nach ventraler Schraubenosteosynthese sowie 100 % ($n=5$) der Therapieversager nach Orthesenbehandlung traten in der HR-Gruppe auf, wohingegen 83 % ($n=5$) der Therapieversager nach Versorgung mittels Halo-Fixateur in der NR-Gruppe auftraten. Zu einem Therapieversagen nach dorsaler Fusion kam es lediglich bei zwei Patienten (einer in jeder CACI-Gruppe). Weiterhin hat der CACI eine Tendenz zum Einfluss auf das radiologische Ergebnis und keinen Einfluss auf den SW-Score (klinisches Ergebnis).

3.6.6 Abhängigkeit des Therapieversagens von Alter, CCI und Therapieentscheidung

Es wurde mit Hilfe der NPAR1Way-Prozedur überprüft, ob die Einflussgrößen Alter, CCI und Therapieentscheidung einen Einfluss auf den Zielwert Therapieversagen bzw. Radiologie haben. Dabei konnte gezeigt werden, dass der CCI, aber nicht die Therapieentscheidung einen signifikanten Einfluss auf das Therapieversagen haben. Auf den Zielwert Radiologie hatte kein untersuchter Parameter einen statistisch signifikanten Einfluss.

Weiterhin wurde der Einfluss von Alter, CCI und Therapiewahl auf den Endpunkt Therapieversagen ermittelt. Die Analyse zeigte, dass eine operative Versorgung zu einer Verringerung der Wahrscheinlichkeit führte, als Therapieversager eingestuft zu werden, die aber nicht signifikant ist ($p = 0,0844$), gleichzeitig führt eine Erhöhung des CCI zu einer signifikanten Erhöhung dieser Wahrscheinlichkeit ($p = 0,0460$). Das Alter allein hat annähernd keinen Einfluss ($p = 0,4009$).

In einem nächsten Schritt wurde überprüft, ob in den beiden Risikogruppen eine Abhängigkeit des Therapieversagens von der Art der Behandlung besteht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 22 zusammengefasst. Dabei zeigte sich eine signifikante Korrelation zwischen einer ventralen Operationsmethode und dem Therapieversagen bei Patienten aus der Hochrisikogruppe, die bei dorsalem Zugang nicht bestand. Weiterhin war eine Tendenz zum Therapieversagen in der HR-Gruppe bei der Behandlung nur mit einer Zervikalorthese erkennbar.

Tabelle 22: Korrelation von Behandlungsart und Therapieversagen (%) in den unterschiedlichen Risikogruppen.

	HR	NR	p
n=57, (weibl.: n=27)	n=27	n=30	
Zervikalorthese	75 %	0 %	0,061
Halo-Fixateur	25 %	50 %	0,367
Ventraler Zugang bei OP	63 %	0 %	0,026
Dorsaler Zugang bei OP	33 %	10 %	0,423

Angaben des Anteils der Therapieversager in %. HR: Hochrisikogruppe mit einem alterskorrigierten Charlson Comorbidity Index (CACI) >3; NR: Normalrisikogruppe mit einem CACI ≤3; n: Anzahl der Patienten; p: Signifikanz.

4 Diskussion

Obwohl es sich bei den Frakturen des Dens axis um klar definierte Verletzungen handelt, gibt es bis heute keinen international einheitlichen und anerkannten Behandlungsalgorithmus, anhand dessen der versorgende Arzt eine chirurgische Intervention oder eine konservative Strategie planen und begründen kann (Van de Kelft, 2019). Lediglich die Deutsche Gesellschaft für Orthopädie und Unfallchirurgie stellte 2018 eine Empfehlung zur Diskussion (Gonschorek et al., 2018). Demnach sollen Frakturen vom Typ II oder III auf die Dislokation des Densfragments und die Instabilität hin überprüft werden. Falls eines dieser Merkmale vorliegt, ist eine operative Intervention indiziert. Ist eine Stabilisierung des Atlantoaxialgelenkes notwendig, wird bei älteren Patienten die transartikuläre Fixierung empfohlen, bei jungen Patienten mit guter Knochenqualität eine direkte Verschraubung des Knochens.

Da die optimale Behandlung basierend auf einer entsprechenden Evidenz eingeleitet werden sollte, zeigt sich hier das Hauptproblem bei den Densfrakturen. Aufgrund der besonderen Lage der Frakturstelle und der möglichen lebensbedrohlichen Folgen für den Patienten bei Nichtbehandlung können keine randomisierten kontrollierten Studien durchgeführt werden. (Van de Kelft, 2019). Daher ist es von großer Bedeutung, durch den Vergleich von unterschiedlichen Behandlungsgruppen und deren Ergebnis retrospektiv die entsprechenden Eingriffe zu bewerten und daraus eine allgemeingültige Behandlungsstrategie abzuleiten.

Dabei stellt sich auch die Frage, welches Ergebnis bei der Behandlung einer Fraktur des Dens axis als Therapieerfolg gewertet werden kann. Aus chirurgischer Sicht ist primär die vollständige knöcherne Konsolidierung des Frakturspaltes als Therapieerfolg zu werten. Allerdings werden auch die teilweise knöcherne Konsolidierung und eine stabile Pseudarthrose als Therapieerfolg gewertet, da diese beiden Resultate ebenfalls für ein stabiles Ergebnis stehen (Osman et al., 2017) – im Gegensatz zu einer instabilen Fraktur, die jederzeit zu neurologischen Ausfällen beim Patienten führen kann. Allerdings berücksichtigen auch immer mehr Autoren das patientenorientierte Ergebnis. Für den Patienten ist es am wichtigsten, möglichst schmerzfrei und mit guter Beweglichkeit der Halswirbelsäule weiterleben zu können (Van de Kelft, 2019; Fam et al., 2017). Jedoch setzt sich diese Sichtweise erst langsam durch, nachdem sie von Shears und Armitstead (2008) angemahnt wurde.

Im Rahmen der hier vorgelegten Studie sollte das patientenorientierte Ergebnis ebenso wie das chirurgisch definierte Ergebnis anhand standardisierter Bewertungssysteme

untersucht werden. Die Patienten wurden konservativ oder operativ aufgrund einer Fraktur vom Typ II oder III des Dens axis behandelt. Als Therapieversagen wurde in dieser Studie nicht – wie in der Literatur allgemein definiert – allein die unvollständige knöcherne Durchbauung des Frakturspaltes gewertet, sondern es floss vor allem die Notwendigkeit einer Reoperation, ein schlechter Smiley-Webster-Score und behandlungsassoziierte Komplikationen als patientenzentriertes Behandlungsergebnis in die Wertung ein.

Das Ergebnis wurde mit Parametern korreliert, die bereits bei der Einweisung der Patienten erhoben wurden. Einer dieser Parameter ist der alterskorrigierte CCI (CACI) bei der Bewertung des Zustandes der Patienten. Dessen Berücksichtigung ist bei der Behandlung von Frakturen des Dens axis neuartig. Bei den Frakturen des Dens axis handelt es sich um eher seltene Verletzungen, daher sind die Patientenzahlen gering, was eine statistisch valide Aufarbeitung des Datenmaterials einschränkt. In die retrospektive monozentrische Studie wurden 57 Patienten eingeschlossen, die zwischen 2003 und 2016 am Universitätsklinikum Gießen versorgt wurden.

4.1 Patientenkohorte

Um die Ergebnisse aus der hier vorliegenden Untersuchung mit Studien aus der Literatur vergleichen zu können, ist eine Charakterisierung der Patientenkohorte von großer Bedeutung, da sich viele Arbeitsgruppen auf eingegrenzte Patientenkohorten, beispielsweise geriatrische Patienten oder Patienten nur mit einer Typ-II-Fraktur beziehen. Die Fraktur des Dens axis gilt als ein Ereignis, das vor allem bei geriatrischen Patienten nach einem Sturz beobachtet werden kann, wobei die Zahlen in dieser Altersgruppe weiter steigen (Pearson et al., 2016). Zunehmend sind auch jüngere Personen von Frakturen des 2. Halswirbels betroffen (zusammengefasst in Robinson et al., 2017). Dabei handelt es sich meist um einen Aufprall mit großer Wucht, etwa bei einem Verkehrsunfall. Die Patientenkohorte in dieser Studie spiegelt diese beiden Altersspeaks gut wider: Es waren vor allem Personen über 70 Jahre betroffen, wobei auch eine relative Häufung bei den Personen im Alter zwischen 30 und 60 Jahren vorkam.

Am häufigsten kommt eine Fraktur vom Typ II nach Anderson und D'Alonzo vor, weniger vom Typ III (Gonschorek et al., 2018). Auch dieser Umstand ist in der Patientenkohorte repräsentiert. Lediglich in der Altersgruppe zwischen 31 und 49 Jahren treten mehr Typ-III- als Typ-II-Frakturen auf. Da diese Altersgruppe lediglich aus 7 Patienten bestand, handelte es sich dabei möglicherweise um eine zufällige Verteilung. In allen anderen Altersgruppen überwog der Anteil an Typ-II-Frakturen.

Insgesamt sind der Frakturtyp und das Vorhandensein von Begleitverletzungen bei der hier untersuchten Patientengruppe altersunabhängig. In annähernd allen Altersgruppen war etwa die Hälfte der Densfrakturen ein singuläres Ereignis. Bei 40 % in jeder Frakturtypkohorte lag keine Dislokation vor. Das Ausmaß der Fragmentdislokationen bzw. die Größe des Frakturspaltes sind allerdings nicht dokumentiert. Da Dislokationen bis 2 mm auch rein konservativ behandelt werden können (Lofrese et al., 2019), wäre diese Information für eine Bewertung der Therapieentscheidung wichtig gewesen.

Weiterhin wurde bei der Eingangsuntersuchung der CCI und der CACI bestimmt. Der CCI lag bei 78,9 % der Patienten bei einem Wert von maximal 1 und drückt damit ein moderates Risiko aus. Der CACI, der eine alterskorrigierte Form des CCI darstellt, lag bei 52,6 % bis zu einem Wert von 3 und bei 47,4 % über 3. Diese Unterscheidung ist für die Abschätzung der Folgen eines operativen Eingriffs von Bedeutung. Patienten mit CACI-Werten bis zu 3 zeigten beispielsweise nach einer operativen Versorgung einer Femurhalsfraktur eine deutlich bessere 5-Jahres-Überlebensrate im Vergleich zu Patienten mit einem CACI von 6 oder mehr (Jiang et al., 2018). Dies rechtfertigt eine Einteilung der Patientenkohorte in eine Gruppe bis zu einem CACI von einschließlich 3 und einer Gruppe mit einem CACI von mehr als 3, um die Folgen nach einer operativen Versorgung der Densfraktur mit dem Zustand des Patienten bei der Einlieferung korrelieren zu können.

4.2 Bewertung der Interventionen

Bei einer Fraktur des Dens axis ist eine schnelle Diagnose und ein frühzeitiger Therapiebeginn entscheidend, um spätere neurologische Defekte aufgrund eines dislozierten Densfragments zu vermeiden. Der Therapiebeginn folgte in den meisten Fällen dieser Studie im Durchschnitt nach 10 Tagen, der Median lag bei 6 Tagen.

In 12 Fällen begann die Therapie mehr als 2 Wochen nach dem Trauma. Grund hierfür war in der Regel der Vorrang der Versorgung anderer Verletzungen. Ein weiterer Grund war eine verspätete Vorstellung des Patienten. In einem Fall wurde die Densfraktur nicht sofort diagnostiziert. Insgesamt wurden von den 12 Patienten, deren Therapiebeginn 14 Tage und länger nach dem Trauma erfolgte, 50 % als Therapieversager eingestuft. Ob dieser erhöhte Wert im Vergleich zur Rate der Therapieversager in der Gesamtgruppe von 35 % allein auf den späten Therapiebeginn zurückzuführen ist, kann jedoch nicht nachgewiesen werden. Weiterhin sind die meisten Parameter, die zu einem verspäteten Therapiebeginn führen, nicht vom behandelnden Arzt beeinflussbar. Lediglich die Diagnostik kann noch verbessert werden, denn trotz des Einsatzes moderner bildgebender

Verfahren bleiben manche Frakturen unentdeckt. Deren Rate wird auf 20 % geschätzt (Keller et al., 2015). Meist wird bei diesen Patienten die Fraktur des Dens axis erst erkannt, wenn sie aufgrund persistierender Nackenschmerzen einen Arzt aufsuchen (Keller et al., 2015).

Etwa die Hälfte der Patienten (50,9 %) wurde konservativ behandelt, die andere Hälfte chirurgisch (49,1 %). In der konservativ behandelten Gruppe erhielt lediglich ein Patient mit einer Typ-III-Fraktur keine frakturspezifische Behandlung, allerdings ist dieser Patient bereits am Tag nach seinem Unfall verstorben. Die konservative Behandlung bestand bei einem Drittel der Patienten in einer Zervikalorthese, bei den übrigen Patienten in einem Halo-Fixateur. Die chirurgische Versorgung war eine ventrale Verschraubungen nach Böhler, eine HWK1/2 Verschraubung nach Magerl/McGuire oder nach Harms. Bei 4 Patienten wurde eine kraniozervikale Spondylodese durchgeführt. Bei der chirurgischen Versorgung der Typ-II-Frakturen wurde meist auf eine anteriore (ventrale) Verschraubung zurückgegriffen (56 %) oder eine posteriore (dorsale) Verschraubung nach Magerl bzw. McGuire durchgeführt. Die 3 Patienten mit den Typ-III-Frakturen, die operativ versorgt wurden, wurden mittels HWK1/2-Verschraubungen nach Harms und Magerl bzw. mit einer kraniozervikalen Spondylodese versorgt. Inwieweit hier die Erfahrung des Operators mit den entsprechenden OP-Methoden bei der Wahl der operativen Versorgung eine Rolle spielte, bleibt jedoch unklar (Faure et al., 2017). Zudem besteht in jüngerer Zeit eine zunehmende Tendenz zur Wahl eines dorsalen Verfahrens.

Obwohl der operative Eingriff vor allem auch bei jüngeren Patienten als Standard propagiert wird (Esteves et al., 2016; Gonschorek et al., 2018), wurden die Patienten, die jünger als 30 Jahre waren, durchweg konservativ versorgt. In den Altersklassen bis 79 Jahre wurden etwa 60 % chirurgisch versorgt, erst bei den Patienten über 80 Jahre nahm die chirurgische Versorgung wieder auf 36 % ab. Allerdings wird in der Literatur bereits ein Alter von mehr als 50 Jahren als Risikofaktor für ein Therapieversagen bei konservativer Behandlung angesehen (Gonschorek et al., 2018).

Wird davon ausgegangen, dass vor allem die Komorbiditäten und das Alter eine Rolle bei der Therapieentscheidung spielen, dann müsste ein statistisch signifikanter Unterschied im CACI zwischen den konservativ und operativ versorgten Gruppen erkennbar sein. Unter Berücksichtigung der Einteilung der Patienten in die Risikogruppen anhand des CACI bestand jedoch nur ein geringer Unterschied zwischen der konservativen und operativen Interventionsgruppe.

Insgesamt wurden mehr Patienten konservativ behandelt, als es von der internationalen Literatur vorgeschlagen wird, die eine operative Therapie deutlich bevorzugt. Dort wird davon ausgegangen, dass ein Therapieerfolg lediglich durch die knöchernen Konsolidierung des Frakturspalts definiert sein kann, die durch einen operativen Eingriff in über 90 % der Fälle erreicht wird (Baogui und Juwen, 2019). Weiterhin wird von einigen Arbeitsgruppen die chirurgische Versorgung auch bei geriatrischen Patienten mit einem Alter von mehr als 80 Jahren als primäre Therapieoption genannt (Ishak et al., 2017; Wagner et al., 2017).

Wird dagegen der vorgeschlagene Entscheidungsalgorithmus der Deutschen Gesellschaft für Orthopädie und Unfallchirurgie zugrunde gelegt, die bei einer stabilen, nicht dislozierten Typ-II/III-Fraktur die konservative Therapie empfiehlt, wurden in der Studienpopulation mehr Patienten operiert, als unbedingt nötig wären. Es wurden 11 Patienten trotz fehlender Dislokation operativ versorgt, wobei in den Unterlagen die Feststellung der Instabilität fehlt. Diese würde eine operative Versorgung rechtfertigen (Gonschorek et al., 2018). Allerdings kann die Indikation anhand der vorliegenden Daten nur schwer beurteilt werden, da vor allem die Angaben über das Ausmaß einer Dislokation fehlen.

4.3 Zustand der Patienten bei der Kontrolluntersuchung im Vergleich zur Entlassung

Zur Kontrolluntersuchung zwischen 1 und 6 Jahre nach dem Trauma erschienen 51 Patienten. Bei ihnen wurden sowohl der SW-Score als auch die knöchernen Konsolidierung des Frakturspalts mithilfe bildgebender Verfahren erhoben.

4.3.1 Smiley-Webster-Score

Bei der Entlassung werteten 39 Patienten (76,5 %) ihren Zustand mit „gut“, bei der Kontrolluntersuchung nur noch 29 (56,9 %). Bei 4 dieser 10 Patienten hatte sich der Status zu „sehr gut“ verbessert, bei 6 Patienten von „gut“ nach „akzeptabel“ verschlechtert. Diese 6 Patienten wurden auf lange Sicht zu Therapieversagern, obwohl sie nach der Entlassung zunächst als Therapieerfolg gewertet worden wären.

Die Veränderung des SW-Scores zwischen Entlassung und Kontrolluntersuchung zeigt die mögliche positive oder negative Entwicklung dieses patientenorientierten Messparameters im Laufe der Zeit. Als Beispiel für diese Entwicklung kann ein Patient herangezogen werden, der bei der Entlassung einen SW von 4 und damit ein „nicht zufriedenstellendes“ Ergebnis hatte. Dieser Patient hatte sechs Monate später bei der

Kontrolluntersuchung einen SW von 1. Im Gegensatz dazu hat sich zwischen dem Entlassungszeitpunkt und der Kontrolluntersuchung bei einigen Patienten ein vorher „guter“ SW verschlechtert.

Vermutlich spielt vor allem bei den älteren Patienten eine Rolle, ob sie nach dem für sie traumatischen Ereignis wieder unabhängig leben können oder ob sie in ein Pflegeheim ziehen mussten. Dieser Parameter fließt ebenfalls in den SW-Score ein. Die Studie von Dhall und seinen Mitarbeitern konnte zeigen, dass nach konservativer Behandlung 26,8 %, nach operativer Behandlung lediglich 18,8 % der Patienten wieder nach Hause zurückkehren konnten (Dhall et al., 2017). Diese Änderung der Lebensumstände ist vermutlich der Grund für den schlechten SW-Score bei einigen Patienten.

Ein weiterer Grund könnte auch der Abstand zum Trauma und der Behandlung sein. Während die Patienten bei der Entlassung eine deutliche Verbesserung ihres Zustandes registrieren, der sich in einem guten SW-Score ausdrückt, könnten bis zu 6 Jahre nach Therapieende die Ansprüche der Patienten an ihren Zustand gestiegen sein. So werden eventuell andauernde, wenn auch leichte Schmerzen nach Jahren als einschränkender empfunden als direkt nach dem Trauma. Weiterhin kann nicht ausgeschlossen werden, dass von der Densfraktur unabhängige Beeinträchtigungen das Ergebnis des SW verfälschen.

4.3.2 Knöcherne Konsolidierung des Frakturspalts

Im Hinblick auf die ausbleibende knöcherne Konsolidierung des Frakturspaltes als Therapieversagen stellt sich das Ergebnis im Vergleich zum SW-Score weniger gut dar. Lediglich 66,7 % der konservativ und 54,2 % der operativ behandelten Patienten wiesen zum Zeitpunkt der Kontrolluntersuchung eine komplette knöcherne Konsolidierung auf.

Damit liegen die Werte dieser Studie im Vergleich zu anderen Studien im unteren Bereich. Publikationen aus den letzten Jahren zeigen durchweg höhere Durchbauungsraten nach chirurgischer Versorgung der Densfraktur (Tabelle 23). Hier ist vor allem die Studie von Gembruch und seinen Mitarbeitern bemerkenswert, die bei hochbetagten Patienten bereits 3 Monate nach der Versorgung Konsolidierungsraten von 70 % bei konservativer und 90,8 % bei operativer Versorgung feststellen konnten (Gembruch et al., 2019). Allerdings zeigen die Studien, die eine konservative Therapie miteinschließen, in der Regel geringere Konsolidierungsraten (Tabelle 23).

Insgesamt berichten alle Arbeitsgruppen seit 2015 von Konsolidierungsraten von mindestens 85 % nach operativer Versorgung der Densfraktur (Tabelle 23). Vorher lagen die Konsolidierungsraten bei durchschnittlich 68,5 % (Deng et al., 2016). Dies könnte

daran liegen, dass heute vermehrt die chirurgische Versorgung der Densfraktur favorisiert wird und diese damit von darin erfahrenen Chirurgen routiniert erfolgen kann.

Tabelle 23: Konsolidierungsraten der Densfrakturen aus Studien ab 2015.

Gruppe	Behandlung	Rate	Bemerkungen
Sawarkar et al., 2015	anteriore Verschraubung posteriore Fixierung	95 % 96,5 %	
Joestl et al., 2016a	posteriore Fixierung konservativ	100 % 7,1 %	Primäre Nonunion als Einschlusskriterium
Deng et al., 2016	operativ nicht operativ	68,5 % 43,2 %	Metaanalyse, alle Artikel bis 03/2016 eingeschlossen
Alhashash et al., 2018	post. Verschraubung	88,2 %	alle Patienten älter als 65 Jahre
Yuan et al., 2018	anteriore Verschraubung posteriore Stabilisierung	90,9 % 96 %	
Girardo et al., 2018	Halo-Fixateur anteriore Verschraubung	30 % 85,2 %	alle Patienten älter als 65 Jahre
Aquila et al., 2018	konservativ	45 %	
Faure et al., 2018	post. Verschraubung	100 %	alle Patienten älter als 75 Jahre
Charles et al., 2019	konservativ operativ	75,7 % k.A.	≤ 70 Jahre 93,5 % Fusion > 70 Jahre 62,5 % Fusion
Huang et al., 2019	post. Verschraubung	94,8 %	keine Patienten über 65 Jahre
Gembruch et al., 2019	konservativ operativ	70,0 % 90,8 %	alle Patienten älter als 80 Jahre, Follow-up: 3 Monate

Welche Gründe in der hier vorgelegten Studie für die geringe Rate der vollständigen knöchernen Konsolidierung des Frakturspalts - vor allem auch nach chirurgischer Versorgung - vorlagen, kann retrospektiv nicht nachvollzogen werden. Allerdings wurde in den zitierten Studien meist kein Unterschied zwischen einer vollständigen und einer partiellen Verknöcherung gemacht, was vor allem die exzellenten Ergebnisse der Arbeitsgruppe um Gembruch nach bereits 3 Monaten nahelegen (Gembruch et al., 2019). Werden bei den Konsolidierungsdaten, welche der hier vorliegenden Arbeit zugrunde liegen, die teilweisen Verknöcherungen hinzugenommen, würde diese auf 81,5 % für die konservative Behandlung und 66,7 % für die operative Behandlung steigen.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die Frakturen vom Typ III in der Regel konservativ behandelt werden (Ryken et al., 2013), wie auch in der hier vorgelegten Studie (82,4 %). Diese heilen insgesamt besser (Greene et al., 1997; Müller et al., 2003; Polin et al., 1996; Patel et al., 2015; Govender und Grootboom, 1988; Hadley et al., 1989). Dieser Bias führte damit möglicherweise zu einer insgesamt höheren Konsolidierungsrate bei den konservativ behandelten Patienten in dieser Studie im Vergleich zu den chirurgisch behandelten Patienten.

Die Konsolidierungsrate hängt nicht zuletzt auch von der OP-Technik ab. Einerseits ist der Zugang von ventral mit dem Erhalt der Beweglichkeit und einer geringeren Operationsdauer im Vergleich zu den dorsalen Techniken verbunden. Sie führt andererseits jedoch zu einer erhöhten Rate an Reoperationen (Patterson et al., 2017) und zu einer geringeren Rate an vollständiger knöcherner Durchbauung des Frakturspalts, die als Therapieversagen gewertet wird (Baogui und Juwen, 2019). Die Hälfte der chirurgisch versorgten Patienten aus der hier vorliegenden Studie wurden von ventral versorgt. Dies führt zu einer niedrigeren Konsolidierungsrate als der dorsale Zugang und damit insgesamt zu einer Verringerung der Rate nach OP in der Studie.

Ein weiterer Parameter, der den Grad der Konsolidierung des Frakturspaltes und damit die Bewertung als Therapieversager beeinflussen, ist der Zeitpunkt der Follow-up-Untersuchung. Je weiter dieser vom Zeitpunkt des Traumas und der Therapie entfernt liegt, umso größer ist die Wahrscheinlichkeit einer knöchernen Durchbauung des Frakturspaltes und umso geringer ist die Gefahr, den Patienten als Therapieversager werten zu müssen. Daher sollte in weiteren Studien mehrere Follow-up-Untersuchungen in einheitlichen Zeitabständen eingeplant werden. Darüber hinaus ist es entscheidend, mit welchem bildgebenden Verfahren die knöcherne Konsolidierung bewertet wird. Eine computertomographische Aufnahme ist in der Regel besser dazu geeignet, um den Grad einer inkompletten Fusion beurteilen zu können als eine klassische Röntgenuntersuchung.

4.4 Prädiktive Faktoren des Therapieversagens

4.4.1 Geschlecht und Klasse der Densfraktur haben keinen direkten Einfluss auf das Therapieversagen

Die statistische Auswertung der Patientenergebnisse ergab keine Abhängigkeit des Therapieerfolges vom Geschlecht der Patienten. Dieses Ergebnis steht in Einklang mit den Daten aus der Literatur. Die Arbeitsgruppe um Lofrese, die 50 Patienten konservativ

behandelte, zeigte ebenfalls, dass das Geschlecht keinen Einfluss auf das klinische Ergebnis hat (Lofrese et al. 2019). Weiterhin hatte in der hier zugrunde liegenden Patientenkohorte die Art der Fraktur keinen Einfluss auf das Ergebnis der Behandlung.

4.4.2 Der Einfluss der Therapieentscheidung auf das Therapieversagen ist umstritten

Von den konservativ behandelten Patienten wurden 44,8 % als Therapieversager gewertet. Die Rate des Therapieversagens bei der operativen Therapie lag bei 25 %. Es zeigte sich ein Trend zur Verringerung der Rate der Therapieversager nach operativer Intervention. Allerdings erreichte dieser Trend nicht die statistische Signifikanz. Daher muss die Nullhypothese, dass die Therapieentscheidung keinen Einfluss auf das Therapieversagen hat, angenommen werden.

Dieser Trend wurde auch von der Arbeitsgruppe um Perry gefunden, die ebenfalls eine höhere Rate an Therapieversagern nach konservativer und geringerer Rate nach operativer Versorgung feststellen konnte (Perry et al. 2018). Allerdings war dies bei Perry vor allem auf eine geringere Rate der knöchernen Konsolidierung nach konservativer Behandlung zurückzuführen, anders als in der hier vorgelegten Studie. Die Metaanalyse der Arbeitsgruppe um Yang führte zur Schlussfolgerung, dass die konservative Behandlung der Typ-II-Frakturen des Dens axis zu einer höheren Zahl an Nichtfusionen im Vergleich zur operativen Versorgung führt (Yang et al. 2015). Allerdings wurde in die hier vorgelegte Studie eine Mischklientel eingeschlossen, die aus Patienten mit Typ-II- und Typ-III-Frakturen bestand. Daher sind die Schlussfolgerungen von Yang nur bedingt vergleichbar.

Vergleiche zwischen operativen und konservativen Therapien wurde von mehreren Arbeitsgruppen mit zum Teil stark differierenden Patientenkohorten und Therapieoptionen angestellt. Chapman, Vaccaro und ihre jeweiligen Mitarbeiter erkennen eine geringere langfristige Mortalitätsrate bei chirurgisch behandelten Patienten (Chapman et al., 2013; Vaccaro et al., 2013). Auch Schroeder und seine Mitarbeiter konnten 2015 in ihrem Review zeigen, dass Patienten, die älter als 60 Jahre sind, Vorteile durch eine chirurgische Therapie ihrer Typ-II-Densfraktur haben, ohne dass sich dabei das Risiko von Komplikationen erhöht (Schroeder et al., 2015). Weiterhin findet die Arbeitsgruppe um Joestl, dass eine anteriore Verschraubung besser ist als der Halo-Fixateur (Joestl et al., 2016a). Gembruch und seine Mitarbeiter sehen ebenfalls Vorteile bei allen operativen Stabilisierungsstrategien im Vergleich zu konservativen Behandlungen (Gembruch et al., 2019). Auch Deng und seine Mitarbeiter sehen in der operativen Therapie einen Vorteil, da hier höhere Raten der knöchernen Konsolidierung erreicht werden (Deng et al., 2016). Stein

und seine Mitarbeiter bzw. auch die Gruppe um Clark sehen ebenfalls nach einer operativen Versorgung Vorteile für das langfristige Ergebnis (Clark et al., 2018; Stein et al., 2017). Auch die Gruppe um Ishak favorisiert diesen Weg gerade bei sehr alten Patienten (Ishak et al., 2017).

Die Arbeitsgruppe um Delcourt findet dagegen keine Unterschiede zwischen den konservativen und operativen Therapien (Delcourt et al., 2015), ebenso wie die Gruppen um Girardo, um Charles und um De Bonis (Girardo et al., 2018; Charles et al., 2019; De Bonis et al., 2019a). Im Gegensatz dazu favorisieren Perry und seine Mitarbeiter den konservativen Weg aufgrund der erhöhten Komplikationsrate der chirurgischen Versorgung bei fehlendem Überlebensvorteil (Perry et al., 2018).

Allerdings fehlen nach wie vor Ergebnisse aus randomisierten und kontrollierten Studien, um diese Widersprüche in der Literatur aufzuklären. Erst 2018 wurde von Robinson und ihren Mitarbeitern ein Studienplan für eine randomisierte und kontrollierte klinische Studie erarbeitet, jedoch liegen derzeit noch keine Ergebnisse vor (Robinson et al. 2018; NTC 02789774). In dieser Studie soll eine posteriore Fusion von HWK1 und HWK2 mit der Behandlung mit einer steifen Halskrause verglichen werden. Eine ähnliche Studie zur Behandlungsstrategie von Densfrakturen bei sehr alten Patienten (älter als 80 Jahre) wurde mit der INNOVATE-Studie 2014 begonnen, die ebenfalls noch nicht abgeschlossen ist (Huybregts et al., 2014).

In der hier vorgelegten Arbeit wurden jüngere Patienten bis zu einem Alter von 59 Jahren konservativ ausschließlich mit einem Halo-Fixateur versorgt. Lediglich ältere Patienten über 70 Jahre wurden entweder mit Halo-Fixateur oder mit einer Orthese behandelt (Tabelle 16, Seite 65). Die Rate der Therapieversager mit dem Halo-Fixateur lag bei 38 %, mit der Orthese bei 54 %. Die Rate der ausbleibenden knöchernen Konsolidierung war in beiden Gruppen etwa 30 %. Aufgrund der geringen Fallzahlen und des Einflusses des Altersbias auf die Rate der Therapieversager kann hier keine valide Entscheidung getroffen werden, welche der beiden konservativen Behandlungsformen die besseren Ergebnisse erzielt.

In entsprechenden Studien, die konservative Therapien miteinander vergleichen, werden keine gravierenden Unterschiede im Ergebnis zwischen dem Halo-Fixateur und den unterschiedlichen Formen der Ruhigstellung der zervikalen Wirbelsäule mittels Orthesen festgestellt (Waqar et al., 2017; Patel et al., 2015; Schroeder et al., 2015).

Hinsichtlich des operativen Verfahrens sind sich die Autoren anderer Studien uneins. Keine Unterschiede in der Mortalität und Komplikationsrate zwischen anteriorem und posteriorem chirurgischen Zugang sehen die Gruppen um Schroeder und um Yuan (Schroeder et al., 2015; Yuan et al., 2018).

Wagner und Mitarbeiter favorisieren ebenso wie Faure und seine Gruppe die posteriore HWK1-HWK2-Arthrodesen, wenn keine Kontraindikation zu einer Operation besteht (Wagner et al., 2017; Faure et al., 2017). Auch Baogui und Juwen sehen hier Vorteile gegenüber einer anterioren Densverschraubung (Baogui und Juwen, 2019). Der anteriore Zugang als erste Wahl bei der chirurgischen Versorgung wird ebenfalls von einigen Arbeitsgruppen aufgrund der kürzeren Operationszeit favorisiert (Sawarkar et al., 2015; Patterson et al., 2017).

Insgesamt liegen aber für die anteriore Densverschraubung einige Kontraindikationen vor. So sollte bei einer älteren Fraktur, einer Trümmerfraktur oder bei ungünstigem Verlauf der Frakturlinie (Typ C nach Eysel und Roosen; Abbildung 11, Seite 16) die anteriore Densverschraubung vermieden werden. Weitere Kontraindikationen sind eine Kyphose und Morbus Bechterew. Darüber hinaus hat die Versorgung von dorsal den Vorteil, dass keine Gefahr besteht, dass die Schraube in die Kortikalis einbricht. Auch das Risiko für Pseudarthrosen, Reoperationen und ungeplante Hospitalisierungen ist bei dorsaler Versorgung geringer und überwiegt somit die Vorteile der kürzeren Operationszeit bei ventralem Zugang (Patterson et al., 2017; Shousha et al., 2019).

Gründe für diese Uneindeutigkeit sind vermutlich neben unterschiedlichen Patientenkohorten auch die unterschiedliche Definition des Behandlungserfolges (Mortalität, Fusionsrate, Patientenzufriedenheit) und die Erfahrung des Teams mit den einzelnen Verfahren. In der hier vorgestellten Studie war die Art des operativen Eingriffs nicht Gegenstand der Untersuchung. Außerdem waren die Fallzahlen für die einzelnen Methoden des chirurgischen Zugangs zu gering, um valide Aussagen zum Einfluss der Operationstechnik auf das Therapieversagen treffen zu können.

4.4.3 Die Kombination von Alter und Vorerkrankungen hat einen prädiktiven Aussagewert

Aufgrund der geringen Patientenzahl konnten keine spezifischen Vor- oder Begleiterkrankungen statistisch valide herausgefiltert werden, die einen Einfluss auf das Behandlungsergebnis hatten. In der hier vorliegenden Studie wurde der ASIA-Score als Maß für das neurologische Defizit bei der Einlieferung erhoben. Allerdings war lediglich bei 3 Patienten (5,4 %) ein neurologischer Ausfall festzustellen. Aufgrund dieser wenigen

Fälle konnte keine statistisch valide Korrelation zwischen dem ASIA-Score und dem Therapieversagen hergestellt werden. De Bonis und seine Mitarbeiter fanden jedoch, dass ein neurologisches Defizit bei der Einlieferung der Patienten ebenfalls ein prädiktiver Faktor für das Ergebnis ist (De Bonis et al., 2019a).

In der Literatur gilt der CCI als Maß für die Vor- und Begleiterkrankungen eines Patienten als Prädiktor für das funktionelle Ergebnis und einer eventuell vorhandenen posttherapeutischen Behinderung (De Bonis et al., 2019a). Auch in der hier untersuchten Patientenkohorte hatte der CCI Einfluss auf das Therapieversagen und den Trend zum Einfluss auf das klinische Outcome in Form des SW-Scores. Ein CCI von 2 und mehr führt zu einer Erhöhung der Wahrscheinlichkeit des Therapieversagens. Allerdings konnte anhand des CCI keine Vorhersage hinsichtlich der knöchernen Konsolidierung des Frakturspalts getroffen werden.

Die Korrelation des CCI mit dem Therapieerfolg wird in der Literatur bestätigt. Auch die Arbeitsgruppe um Woods konnte zeigen, dass die Patienten mit Densfraktur, die eine konservative oder operative Therapie 3 Monate bzw. ein Jahr überlebten, ursprünglich einen geringeren CCI aufwiesen (Woods et al., 2014). Ausgehend vom Therapieerfolg zeigte Lofrese im Widerspruch dazu, dass in zwei Gruppen mit und ohne Therapieerfolg gleiche CCI-Werte bestimmt wurden (Lofrese et al. 2019). Weiterhin ist die Mortalitätsrate bei sehr alten Patienten mit Wirbelsäulenverletzungen sehr hoch und der CCI hat vor allem bei dieser Patientengruppe keinen Vorhersagewert (Shiban et al., 2019).

Der CCI kann auch in der hier vorliegenden Arbeit als Prädiktor für das Therapieversagen herangezogen werden, allerdings nicht für die tatsächliche Heilung der Fraktur in Form der vollständigen knöchernen Durchbauung oder den SW-Score bei der Nachuntersuchung.

Auch das Alter der Patienten hatte in der hier vorgelegten Studie einen deutlichen Einfluss auf das Therapieversagen ($p=0,0425$). Damit muss die Nullhypothese abgelehnt werden, nach der das Alter des Patienten keinen Einfluss auf das Therapieversagen hat. Tian und seine Mitarbeiter berichten in ihrer Metaanalyse ebenfalls, dass ein höheres Alter signifikant zu einer geringeren Fusionsrate führt (Tian et al., 2014). Dabei untersuchten die Autoren ausnahmslos anteriore Verschraubungen, die in der Regel hohe Konsolidierungsraten aufweisen (Tabelle 23). Auch Charles und seine Mitarbeiter

kommen zum Ergebnis der Altersabhängigkeit des Behandlungsergebnisses (Charles et al., 2019; Tabelle 23).

Allerdings stellt sich die Frage der Definition des Alters. Während bei der Gruppe um Charles Patienten bis zu einem Alter von 60 Jahren noch zu der jungen Gruppe zählen, zieht die Gruppe um Osman diese Grenze bei einem Alter von 40 Jahren und findet bereits hier einen altersabhängigen Unterscheid in der Heilungsrate, wenn auch statistisch nicht signifikant (Osman et al., 2017). Wang und seine Mitarbeiter stellen weiterhin fest, dass ein fortgeschrittenes Alter – hier 45 Jahre – ein prädisponierender Faktor für das Ausbleiben der knöchernen Konsolidierung des Frakturspaltes ist (Wang et al., 2018).

Insgesamt liegen aber nur wenige Daten über den Einfluss des Alters speziell auf die Heilungsrate von Densbrüchen vor, da in der Regel nur ältere Patienten in die Studien aufgenommen wurden. Von geriatrischen Patienten ist im Allgemeinen jedoch bekannt, dass eine verzögerte oder ausbleibende Frakturkonsolidierung auftritt, und es werden Methoden entwickelt, um dem entgegenzutreten, beispielsweise Ultraschall oder die Vermeidung nichtsteroidaler Entzündungshemmer (Foulke et al., 2016). Allerdings ist der Einfluss des Alters auf den Mechanismus der knöchernen Konsolidierung einer Fraktur noch nicht vollständig aufgeklärt (Clark et al., 2017).

Daher wurde mit dem CACI ein altersabhängiger Index betrachtet. Dieser wurde bereits mehrfach mit dem Ergebnis bei diversen Eingriffen oder als Risikofaktor korreliert. So zeigte sich, dass ein Wert unter 3 bei Hüftfrakturen einen statistisch hochsignifikanten Mortalitätsvorteil 5 Jahre nach der operativen Therapie hatte (Jiang et al., 2018). Patienten mit einem CACI von über 7 hatten bereits nach 2 Jahren eine geringere Überlebensrate (González Quevedo et al., 2017). Eine ähnliche Korrelation wurde bereits für Eingriffe im Beckenbereich festgestellt (Dessai et al., 2018). Auch die generelle 30-Tage-Überlebensrate bzw. Notwendigkeit der intensivmedizinischen Betreuung nach einer Notoperation kann mit dem CACI zumindest bei Patienten unter 65 Jahren vorausgesagt werden (St-Louis et al., 2015). Weiterhin haben ältere Patienten ein erhöhtes Risiko für die Entwicklung einer Dysphagie (Tian et al., 2014). Diese kann aufgrund der nicht korrekt eingestellten Neutralstellung des Kopfes nach einer atlantookzipitalen Fusion entstehen (Izeki et al., 2014; Kaneyama et al., 2017) oder durch den ventralen Zugang bedingt sein.

In der hier vorgelegten Studie waren Patienten in einem Altersbereich von 3 bis 93 Jahren eingeschlossen, die einen CACI zwischen 0 und 9 hatten. Die Patientenkohorte wurde abhängig vom Median in 2 Gruppen aufgeteilt. Der CACI der ersten Gruppe, bei der ein niedriges Risiko für Probleme nach der Behandlung vermutet wurde, lag bei maximal 3, der CACI der Hochrisikogruppe zwischen 4 und 9. Der CACI hatte einen deutlichen Einfluss auf das Therapieversagen, allerdings keinen Einfluss auf das klinische Outcome in Form des SW-Scores. Damit wird die Nullhypothese, dass ein alterskorrigierter CCI keinen Einfluss auf das Therapieversagen hat, abgelehnt. Weiterhin hatte der CACI einen Trend zum Einfluss auf die Konsolidierung der Fraktur ($p=0,057$; Tabelle 21).

Weiterhin zeigte sich, dass Patienten, die gemäß CACI zur Hochrisikogruppe gezählt werden, eindeutig Nachteile bei der anterioren Densverschraubung haben. Das Risiko des Therapieversagens liegt bei dieser Kombination von Risiko und Versorgung signifikant höher. Damit ist der CACI ein Prädiktor für das Therapieversagen bei anterioren Densverschraubungen.

Damit wurde in dieser Arbeit erstmals der CACI als prädiktiver Faktor des Therapieversagens nach der Behandlung von Frakturen des Dens axis vom Typ II oder III identifiziert. Dieses Assessment der Komorbiditäten in Verbindung mit dem Alter sollte in künftige Studien mit aufgenommen werden (Sarode und Demetriades, 2018).

4.5 Limitationen der Studie

Die größte Limitation der Aussagekraft der Studie liegt in der Anzahl der berücksichtigten Patienten. Obwohl es sich beim Universitätsklinikum Gießen um eine zentrale Versorgungseinrichtung handelt, ist die Anzahl der hier behandelten Patienten vergleichsweise gering. So werden in Gießen im Schnitt nur 18 Patienten pro Jahr aufgrund einer Fraktur des HWK 2 behandelt. Damit gab es in jedem Jahr für die unterschiedlichen Behandlungsstrategien nur wenige Patienten pro Gruppe. Aufgrund der geringen Fallzahlen war es nicht möglich, valide und statistisch signifikante Aussagen darüber zu treffen, ob ein Therapieversagen eher aufgrund des fehlenden Nutzens der Therapie oder aufgrund eines erhöhten Risikos durch den Eingriff festgestellt werden musste.

Wird davon ausgegangen, dass der Erfolg einer chirurgischen Therapie unter anderem von der Routine des Operateurs abhängt, besteht auch allein in der geringen Fallzahl eine Limitation der Studie. Möglicherweise wären weniger Therapieversager nach den chirurgischen Eingriffen zu verzeichnen gewesen, wenn der behandelnde Arzt mehr

derartige Eingriffe in einem gewissen Zeitraum vorgenommen hätte. Allerdings muss hier auch in Betracht gezogen werden, dass Patienten per se und auch die Verhältnisse an den Frakturspalten unterschiedlich sind. Dies erschwert es, annähernd einheitliche Patientengruppen zu definieren, deren Outcome im Vergleich valide bewertet werden kann.

Die Einschränkung des Behandlungszeitraums führte zu einer weiteren Begrenzung der Patientenzahl. Allerdings war dies erforderlich, um einerseits zu gewährleisten, dass die Patienten mit einem vergleichbaren Methodenrepertoire versorgt worden sind, andererseits wurde nach Abschluss der Therapie ein genügend großes Zeitfenster für die Follow-up-Untersuchung benötigt.

Weiterhin sind die Unterschiede im Zeitraum bis zur Follow-up-Untersuchung ein weiterer Parameter, der die Aussagekraft der Studie limitiert. Einerseits sollte mit einem Zeitraum von 6 Monaten sichergestellt werden, dass sich das Behandlungsergebnis stabilisieren kann, andererseits kann es bei manchen Patienten eine längere Zeit dauern, bis die vollständige knöcherne Durchbauung des Frakturspaltes erfolgt ist. Damit müssten diese Patienten als Therapieversager gewertet werden, wenn die Nachuntersuchung bereits nach 6 Monaten stattgefunden hat. Abhilfe könnten hier mehrere Nachuntersuchungen in definierten zeitlichen Abständen schaffen. Damit könnte auch untersucht werden, wie lange es bei geriatrischen Patienten dauern kann, bis diese Konsolidierung erfolgt ist.

Es konnte darüber hinaus nur ein Teil der tatsächlich in dem eingeschlossenen Zeitraum behandelten Patienten in die Studie aufgenommen werden, da die Dokumentation in einigen Fällen nicht ausreichend für die Beantwortung der Fragestellung war. Aber auch in den berücksichtigten Patientenakten fehlten Angaben, beispielsweise zur Instabilität der Fraktur. Damit kann im Rückblick die Therapieentscheidung nicht mehr nachvollzogen werden. Diese Diskrepanz in der Dokumentation lag vermutlich vor allem an der unterschiedlichen Gewichtung durch die behandelnden Ärzte.

4.6 Schlussfolgerung

Nach wie vor ist die optimale Versorgung der Fraktur des Dens axis weder bei geriatrischen noch bei jungen Patienten eindeutig entschieden. Dazu sollte zunächst festgelegt werden, ob eine vollständige knöcherne Konsolidierung des Frakturspaltes als einzig erfolgreiche Therapie gewertet werden soll. In der hier vorgelegten Studie wurde das Therapieversagen als Tod nach der Therapieentscheidung, schwere

behandlungsassoziierte Komplikationen oder eine Reoperation oder eine ausbleibende knöcherne Konsolidierung in Verbindung mit einem schlechten SW-Score definiert. Pseudarthrose allein mit gutem SW-Score war kein Therapieversagen.

Zumindest die posteriore Fusion ist auch bei geriatrischen Patienten jenseits des Alters von 80 Jahren bzw. mit einem CACI von mehr als 3 eine Behandlungsoption. Diese erreicht trotz der damit verbundenen perioperativen Komplikationen und einer hohen Inzidenz von Komorbiditäten zufriedenstellende Ergebnisse (Ryang et al., 2016). Weiterhin führt eine operative Therapie in der Alterskohorte der 65- bis 74-Jährigen zu einer Zunahme der qualitätskorrigierten Lebensjahre (Quality Adjusted Life Years, QALY) (Barlow et al., 2016). Allerdings werden operativ versorgte Patienten, die vorher selbständig lebten, häufiger in Pflegeheime entlassen als konservativ versorgte Patienten (Dhall et al., 2017). Weiterhin zeigen die hier vorgelegten Daten, dass bei etwa einem Drittel der konservativ behandelten Patienten eine Operation aufgrund der ausbleibenden Verknöcherung des Frakturspalts erfolgen musste. Dies spricht auch bei der hier verwendeten Patientenkohorte für eine primär chirurgische Therapie mit dorsalem Zugang, da auch bei ventralem Zugang häufiger Reoperationen nötig waren bzw. vermehrt Todesfälle auftraten.

Das Therapieversagen ist nicht generell abhängig von der Therapieentscheidung (konservativ oder operativ), sondern vom Alter der Patienten in Kombination mit den Komorbiditäten. Daher sollte vor jeder Therapie der CACI bestimmt werden. Dessen Aussagekraft ist hier erstmals bei der Behandlung der Frakturen des Dens axis gezeigt worden. Damit können diejenigen Patienten – im Falle der Densfraktur mit einem CACI von 4 und mehr - identifiziert werden, die in Gefahr sind, ein schlechtes therapeutisches Ergebnis zu erleiden und zu Therapieversagern zu werden. Weiterhin ist der CACI aufgrund der Alterskorrektur zusätzlich ein Hinweis auf mögliche Probleme bei der knöchernen Konsolidierung.

Patienten mit einer Typ-III-Fraktur sollten weiterhin möglichst konservativ behandelt werden, da die Heilungsaussichten dabei sehr gut sind. Bei Patienten mit einem hohen CACI und einer Typ-II-Fraktur sollte die dorsale Schraubenosteosynthese favorisiert werden, da diese Patienten am ehesten von einer mangelhaften Frakturheilung betroffen sind, die durch diese Therapieform weniger ins Gewicht fällt. Die schlechte Frakturheilung führt nach konservativer Behandlung oder nach ventraler Behandlung zum Therapieversagen und der Notwendigkeit einer Reoperation.

Bei Patienten mit einem niedrigen CACI können am ehesten mit einer ventralen Osteosynthese versorgt werden. Das Risiko des Therapieversagens lag in dieser Gruppe bei

ventralem Zugang signifikant unter dem Risiko für Personen mit einem CACI über 3. Aber die Normalrisikogruppe profitiert vermutlich von der dorsalen Schraubenosteosynthese. In der Patientengruppe, die mit einer ventralen Osteosynthese versorgt wurden, musste insgesamt ein Drittel (33,3 %) als Therapieversager gewertet werden. Dies ließe sich möglicherweise mit der entsprechenden OP-Methode verbessern, da die Therapieversagerrate bei der dorsalen Versorgung bei lediglich 15,4 % lag.

In dieser Studie konnte vor allem aufgrund der geringen Patientenzahlen nicht gezeigt werden, dass der SW-Score mit dem radiologisch definierten Therapieversagen im Zusammenhang steht. Das Gleiche gilt für den Zusammenhang der knöchernen Konsolidierung mit der Therapieform und/oder dem SW-Score.

4.7 Ausblick

Ein gutes klinisches Ergebnis ist nach wie vor das Hauptziel der Behandlung einer Fraktur des Dens axis, allerdings sollte versucht werden, eine knöcherne Konsolidierung des Frakturspaltes zu erreichen. Die Wahrscheinlichkeit eines nicht zufriedenstellenden radiologischen Ergebnisses wird allerdings mit steigendem Alter und vermehrten Komorbiditäten größer. Möglicherweise könnten auch Wirkstoffe eingesetzt werden, die eine Frakturkonsolidierung bei älteren und gebrechlichen Patienten unterstützen. Mit der Gabe von Teriparatid, einem rekombinanten Parathormon-Fragment, konnte dies in Einzelfällen gezeigt werden (Pola et al., 2017; Tsai und Hu, 2019). Jedoch fehlen auch hier noch systematische Studien (Hesse et al., 2019).

Weiterhin besteht die Notwendigkeit, gute randomisierte oder nicht randomisierte prospektive Studien durchzuführen, um die optimale Therapie für jeden Patienten herausfinden zu können. Diese Studien sollten möglichst multizentrisch angelegt sein, da die Inzidenz der Densfraktur mit einer alternden Bevölkerung zwar zunimmt, es sich dabei aber dennoch um eine verhältnismäßig seltene Pathologie handelt. Nur so können die Aussagen statistisch valide untermauert werden.

Zudem ist es wichtig, die Gebrechlichkeit der älteren Patienten und damit ihr Risiko mittels Frailty Scores weiter zu eruieren und somit noch genauer herauszufinden, wem man das Risiko einer OP zumuten kann und wem nicht. Insgesamt geht die Tendenz allerdings in Richtung dorsaler OP.

5 Zusammenfassung

Frakturen des zweiten Halswirbels treten vor allem bei geriatrischen Patienten häufig nach einem Sturz auf. Dennoch ist bislang noch kein einheitliches Behandlungsregime etabliert. Eine Therapie kann konservativ mittels Ruhigstellung der Halswirbelsäule durch einen Halo-Fixateur oder unterschiedliche rigide Orthesen erfolgen oder operativ. Bei dieser Therapievariante wird meist entweder das Densfragment mit dem 2. Halswirbel verschraubt oder es erfolgt eine Fixation der ersten beiden Halswirbel, bis eine knöcherne Konsolidierung des Frakturspalts eintritt. Sowohl bei konservativer als auch bei operativer Versorgung gibt es Therapieversager. Bislang ist noch nicht geklärt, welche Patientenvoraussetzungen ein Therapieversagen wahrscheinlich machen.

Daher wurden erstmals in einer retrospektiven monozentrischen Langzeitstudie die Daten von Patienten ausgewertet, die zwischen 2003 und 2016 am Universitätsklinikum Gießen behandelt wurden. Um Prädiktoren identifizieren zu können, wurden neben den allgemeinen Patientendaten auch die Art der Densfraktur, der neurologische Status der Patienten (ASIA), der Smiley-Webster-Score (SW), der Charlson Comorbidity Index (CCI) und die Therapieentscheidung erfasst. Um den Therapieerfolg zu dokumentieren, wurde bei der Nachuntersuchung nach mindestens 6 Monaten neben den Indizes auch die Rate der Durchbauung des Frakturspaltes erfasst. Therapieversagen wurde definiert als Tod nach der Therapieentscheidung, unvollständige Durchbauung des Frakturspaltes in Verbindung mit einem SW von 3 oder 4 oder (Re-) Operation und schwere behandlungsassoziierte Komplikationen mit oder ohne einer (Re-) Operation.

Das Alter der 57 Patienten lag zwischen 3 und 93 Jahren, davon waren 30 männlich. 29 Patienten wurden konservativ, 28 Patienten operativ therapiert. 20 Patienten, 13 aus der konservativ behandelten Gruppe und 7 aus der operativ behandelten Gruppe, wurden als Therapieversager gewertet (6 verstorben, 12 reoperiert inkl. fehlender Durchbauung, 2 schlechter SW-Score). Keinen prädiktiven Wert hatten Geschlecht, Art der Fraktur oder die Therapieoption. Lediglich der CCI und der alterskorrigierte CCI (CACI) waren mit dem Therapieerfolg korreliert. Das Therapieversagen war bei einem CACI von mehr als 3 unabhängig von der Therapiewahl höher als bei einem CACI unter oder gleich 3.

Damit konnte erstmals der CACI, der bei der Einlieferung der Patienten erhoben wird, Prädiktor für ein Therapieversagen bei der Behandlung der Frakturen des Dens axis bestätigt werden. Weitere randomisierte multizentrische Studien mit einer höheren Patientenzahl sind nötig, um Aussagen über spezifische Risikofaktoren und Vorerkrankungen machen zu können.

6 Summary

Fractures of the second cervical vertebra often occur after a fall, especially in geriatric patients. Nevertheless, a uniform treatment regime has not yet been established. Therapy can be conservative by immobilization of the cervical spine by a halo fixator or various rigid orthoses, or surgical. In this therapy option, either the fragment of the odontoid is screwed to the 2nd cervical vertebra or the first two cervical vertebrae are fixed until a bony consolidation of the fracture gap occurs. There are therapy failures in both conservative and surgical treatments. It has not yet been established which patient prerequisites lead to therapy failure.

Therefore, for the first time in a retrospective monocentric long-term study, the data of patients treated at the University Hospital Giessen between 2003 and 2016 were evaluated. In order to identify predictors, the type of dens fracture, the neurological status of the patients (ASIA), the Smiley Webster Score (SW), the Charlson Comorbidity Index (CCI) and the therapy decision were recorded in addition to the general patient data. In order to document the success of the therapy, the follow-up examination after at least 6 months recorded not only the indices but also the rate of healing of the fracture gap. Therapy failure was defined as death after therapy decision, incomplete healing of the fracture gap in conjunction with a SW of 3 or 4 or (re-)surgery and severe treatment-related complications with or without (re-)surgery.

The age of the 57 patients was between 3 and 93 years, 30 of whom were male. 29 patients were treated conservatively, 28 patients surgically. 20 patients, 13 from the conservatively treated group and 7 from the surgically treated group, were classified as therapy failures (6 deceased, 12 secondary surgery, 2 poor SW score). Sex, type of fracture or therapy option had no predictive value. Only the CCI and the age corrected CCI (CACI) was significantly correlated with therapy success. The outcome was better for a CACI between 0 and 3 regardless of the choice of therapy than for a CACI above 3.

Thus, for the first time, the CACI, which is collected when patients are admitted, could be confirmed as a predictor of treatment failure in the treatment of fractures of the odontoid. Further randomised multicentre studies with a higher number of patients are necessary in order to be able to make further statements about specific risk factors and pre-existing conditions.

7 Abkürzungsverzeichnis

AO	Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen
ASIA	American Spinal Injury Association
C	Cervikalwirbel
CACI	alterskorrigierter Charlson Comorbidity Index
CCI	Charlson Comorbidity Index
CT	Computertomographie
et al.	und andere
HR	Hochrisikogruppe (CACI >3)
HWK	Halswirbelkörper
HWS	Halswirbelsäule
MRT	Magnetresonanztomographie
MS-CT	Mehrschicht-Computertomographie
NR	Normalrisikogruppe (CACI ≤3)
OP	Operation
p	Signifikanzniveau
SW	Smiley-Webster Score

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anatomie der Halswirbelsäule und ihrer Begleitstrukturen.	3
Abbildung 2: Ligamente an den Kopfgelenken, Ansicht von posterior.	5
Abbildung 3: Kurze Nackenmuskulatur.....	6
Abbildung 4: Trabekelstruktur des Dens axis.	7
Abbildung 5: Flexion und Extension des atlantookzipitalen Gelenks, Ansicht lateral von rechts.	8
Abbildung 6: Atlantoaxiale Rotation; Aufsicht.	9
Abbildung 7: Verletzungen des Axis Klasse III Typ A nach der AO-Klassifikation.	13
Abbildung 8: Verletzungen des Axis Klasse III Typ B nach der AO-Klassifikation.	13
Abbildung 9: Verletzung des Axis Klasse III Typ C nach der AO-Klassifikation.	13
Abbildung 10: Einteilung der Densfrakturen nach Anderson und D'Alonzo.....	14
Abbildung 11: Einteilung der Densfrakturen nach Eysel und Roosen (1993).....	16
Abbildung 12: Röntgenaufnahmen der Halswirbelsäule von frontal durch den geöffneten Mund.	19
Abbildung 13: Computertomographie der Halswirbelsäule in koronarer Rekonstruktion mit einer Densfraktur Typ II nach Anderson und D'Alonzo.	20
Abbildung 14: Computertomographie der Halswirbelsäule in sagittaler Rekonstruktion mit stark dorsal dislozierter Densfraktur Typ II nach Anderson und D'Alonzo.	20
Abbildung 15: Schanz-Kragen.	22
Abbildung 16: Philadelphia-Kragen.	23
Abbildung 17: Miami-J Zervikalorthese.....	24
Abbildung 18: Stiff-Neck®.....	25
Abbildung 19: Patienten mit Halo-Fixateuren nach der Mobilisation.	26
Abbildung 20: Röntgenbilder von Densosteosynthesen nach Böhler.....	28
Abbildung 21: Okzipito-zervikale Spondylodese.....	29
Abbildung 22: Verschraubung mit Atlasklammer.....	30
Abbildung 23: Operativer Zugangsweg von dorsal.....	31
Abbildung 24: Lagerung des Patienten während der OP.	32
Abbildung 25: Bohrer mit Navigation.	32
Abbildung 26: Dorsale Instrumentation, eingebrachte Schrauben, OP-Bild.....	33
Abbildung 27: Dorsale Spondylodese nach Harms, Röntgenbild mit stabilisierenden Stäben.....	33
Abbildung 28: Computertomographische Aufnahmen von Pseudarthrosen am Frakturspalt von Densabbrüchen vom Typ II nach Anderson und D'Alonzo.....	36

Abbildung 29: Flow-Chart zur Auswahl des Patientenkollektivs	43
Abbildung 30: Altersverteilung der Patientenkohorte (n=57).	50
Abbildung 31: Charlson Comorbidity-Index und Charlson Age Comorbidity Index vor Therapiebeginn.	53
Abbildung 32: Zeitraum zwischen Unfall und Therapiebeginn der Patienten am UK Gießen.	54
Abbildung 33: Zeitspanne zwischen Unfall und Kontrolluntersuchung (n=51).....	61

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Klinische Ausprägungsgrade bei Verletzungen des Rückenmarks anhand der ASIA-Score Klassifizierung.	18
Tabelle 2: Punktwerte der einzelnen Komorbiditäten im Charlson Comorbidity Index.	45
Tabelle 3: Altersmodifikation im Charlson Age Comorbidity Index.	45
Tabelle 4: Smiley-Webster-Score, Berücksichtigung der einzelnen Elemente.	46
Tabelle 5: Vorkommen der unterschiedlichen Frakturtypen in den einzelnen Alterskohorten.	51
Tabelle 6: Dislokation der Fragmente.	51
Tabelle 7: Therapieform in Bezug auf den Frakturtyp.	55
Tabelle 8: Therapieform in Bezug auf das Alter der Patienten.	55
Tabelle 9: Therapien in Korrelation zum CACI.	56
Tabelle 10: Behandlungsassoziierte Komplikationen.	57
Tabelle 11: Verweildauer im Krankenhaus in Abhängigkeit von unterschiedlichen Parametern.	58
Tabelle 12: Smiley-Wester-Score bei der Entlassung in Abhängigkeit von unterschiedlichen Parametern.	59
Tabelle 13: Status der Frakturen bei der Kontrolluntersuchung in Abhängigkeit von Alter, und CACI der Patienten, Frakturtyp und Behandlung.	62
Tabelle 14: Smiley-Webster-Score der Patienten bei der Kontrolluntersuchung in Abhängigkeit von Alter und CACI der Patienten, Frakturtyp und Behandlung.	63
Tabelle 15: Gründe für das Therapieversagen der 20 Patienten.	64
Tabelle 16: Abhängigkeit des Therapieversagens vom Alter.	65
Tabelle 17: Gründe des Therapieversagens bei primär konservativ therapierten Patienten.	66
Tabelle 18: Gründe des Therapieversagens bei primär chirurgisch therapierten Patienten.	66
Tabelle 19: Korrelation der knöchernen Konsolidierung, des klinischen Outcomes und des Therapieversagens mit der Zugehörigkeit zur CCI-Gruppe.	67
Tabelle 20: Korrelation des Frakturtyps und der operativen Versorgung mit der Zugehörigkeit zur Hochrisikogruppe und zur Normalrisikogruppe (CACI).	67
Tabelle 21: Korrelation der knöchernen Konsolidierung, des klinischen Outcomes und des Therapieversagens mit der Zugehörigkeit zur Hochrisikogruppe und zur Normalrisikogruppe (CACI).	68

Tabelle 22: Korrelation von Behandlungsart und Therapieversagen (%) in den unterschiedlichen Risikogruppen.....	69
Tabelle 23: Konsolidierungsraten der Densfrakturen aus Studien ab 2015.	76

10 Literaturverzeichnis

- Aebi M, Etter C, Coscia M. (1989) Fractures of the odontoid process. Treatment with anterior screw fixation. *Spine*; 14(10):1065-70.
- Agrillo A, Russo N, Marotta N, Delfini R. (2008) Treatment of remote type ii axis fractures in the elderly: feasibility of anterior odontoid screw fixation. *Neurosurgery*; 63(6):1145-1151.
- Alhashash M, Shousha M, Gendy H, Barakat AS, Boehm H. (2018) Percutaneous Posterior Transarticular Atlantoaxial Fixation for the Treatment of Odontoid Fractures in the Elderly: A Prospective Study. *Spine (Phila Pa 1976)*; 43(11):761-766.
- Amling M, Wening VJ, Pösl M, Grote HJ, Hahn M, Delling G. (1994) Structure of the axis-key to the etiology of the dens fracture. *Chirurg*; 65(11):964-9.
- Amyes EW, Anderson FM. (1956) Fracture of the odontoid process; report of sixty-three cases. *AMA Arch Surg*; 72(3):377-93.
- Anderson DG, Vaccaro AR, Ebook I. (2012) *Decision Making in Spinal Care*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Anderson LD, D'Alonzo RT. (1974) Fractures of the odontoid process of the axis. *J Bone Joint Surg Am*; 56(8):1663-74.
- Apfelbaum RI, Lonser RR, Veres R, Casey A. (2000) Direct anterior screw fixation for recent and remote odontoid fractures. *J Neurosurg*; 93(2 Suppl):227-36.
- Aquila F, Tacconi L, Baldo S. (2018) Type II Fractures in Older Adults: Can They Be Treated Conservatively?: A Single-Center Experience and Review of the Literature. *World Neurosurg*; 118:e938-e945.
- Arand M, Kinzl L. (1999) *Praxis der Unfallchirurgie – Verletzungen der Wirbelsäule*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Ariyada K, Shibahashi K, Hoda H, Watanabe S, Nishida M, Hanakawa K, Murao M. (2019) Bilateral Internal Carotid and Left Vertebral Artery Dissection after Blunt Trauma: A Case Report and Literature Review. *Neurol Med Chir (Tokyo)*; 59(4):154-161
- Asano T, Yamada S, Fujii T, Yabusaki N, Nakayama G, Sugimoto H, Koike M, Fujiwara M, Kodera Y. (2017) The Charlson age comorbidity index predicts prognosis in patients with resected pancreatic cancer. *Int J Surg*; 39:169-175.
- Baaj AA, Mummaneni PV, Uribe JS, Vaccaro AR, Greenberg MS. (2012) *Handbook of Spine Surgery*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Baogui L, Juwen C. (2019) Fusion rates for odontoid fractures after treatment by anterior odontoid screw versus posterior C1-C2 arthrodesis: a meta-analysis. *Arch Orthop Trauma Surg*; doi: 10.1007/s00402-019-03164-0.
- Barlow DR, Higgins BT, Ozanne EM, Tosteson AN, Pearson AM. (2016) Cost Effectiveness of Operative Versus Non-Operative Treatment of Geriatric Type-II Odontoid Fracture. *Spine (Phila Pa 1976)*; 41(7):610-7.
- Baron BJ, McSherry KJ, Larson JL, Scalea TM. (2011) *Spine and Spinal Cord Trauma. Tintinalli's Emergency Medicine: A Comprehensive Study Guide*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Ben Aïcha K, Laporte C, Akrouf W, Atallah A, Kassab G, Jégou D. (2009) Surgical management of a combined fracture of the odontoid process with an atlas posterior arch disruption: a review of four cases. *Orthop Traumatol Surg Res*; 95(3):224-8.

- Bisson EF, Mumert ML, Mazur MD, Dailey AT, Schmidt MH. (2015) The Fate of Type II Odontoid Fractures after Posterior Atlantoaxial Fusion: Where Does Healing Occur? *J Neurol Surg A Cent Eur Neurosurg*; 76(4):274-8.
- Blauth M, Richter M, Kiesewetter B, Lange U. (1999) [Operative versus non operative treatment of odontoid non unions. How dangerous is it not to stabilize a non union of the dens?]. *Chirurg*; 70(11):1225-38.
- Böhler J. (1965) Fractures of the odontoid process. *J Trauma*; 5: 386-391.
- Böhler J. (1981) [Screw-osteosynthesis of fractures of the dens axis (author's transl)]. *Unfallheilkunde*; 84(6):221-3.
- Börm W, Kast E, Richter HP, Mohr K. (2003) Anterior screw fixation in type II odontoid fractures: is there a difference in outcome between age groups? *Neurosurgery*; 52:1089-1094.
- Bogduk N, Mercer S. (2000) Biomechanics of the cervical spine. I: Normal kinematics. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*; 15(9):633-48.
- Brand P, Hollister A. (1999) *Clinical Biomechanics of the Hand*. 2. Auflage. Philadelphia: Lippincott.
- Bronson WH, Protosaltis T. (2019) Management of Type II Odontoid Fractures in Adults. *Bull Hosp Jt Dis* (2013); 77(1):4-10.
- Bühren V. (2003) Verletzungen der Brust- und Lendenwirbelsäule. *Unfallchirurg*; 106:55-69.
- Bühren V, Josten C. (2013) *Chirurgie der verletzten Wirbelsäule: Frakturen, Instabilitäten, Deformitäten*. Springer Berlin, Heidelberg
- Burke JT, Harris JH Jr. (1989) Acute injuries of the axis vertebra. *Skeletal Radiol*; 18(5):335-46.
- Castellana C, Kósa F. (1999) Morphology of the cervical vertebrae in the fetal-neonatal human skeleton. *J Anat*; 194 (Pt 1):147-52.
- Chan HH, Segreto FA, Horn SR, Bortz C, Choy GG, Passias PG, Deverall HH, Baker JF. (2019) C2 Fractures in the Elderly: Single-Center Evaluation of Risk Factors for Mortality. *Asian Spine J*; May 14. doi: 10.31616/asj.2018.0300. [Epub ahead of print]
- Chapman J, Smith JS, Kopjar B, Vaccaro AR, Arnold P, Shaffrey CI, Fehlings MG. (2013) The AOSpine North America Geriatric Odontoid Fracture Mortality Study: a retrospective review of mortality outcomes for operative versus nonoperative treatment of 322 patients with long-term follow-up. *Spine (Phila Pa 1976)*; 38(13):1098-104.
- Charles YP, Ntilikina Y, Blondel B, Fuentes S, Allia J, Bronsard N, Llieu M, Nicot B, Chailier V, Godard J, Kouyoumdjian P, Lonjon N, Marinho P, Berthiller J, Freitas E, Barrey C. (2019) Mortality, complication, and fusion rates of patients with odontoid fracture: the impact of age and comorbidities in 204 cases. *Arch Orthop Trauma Surg*; 139(1):43-51.
- Charlson M, Wells MT, Ullman R, King F, Shmukler C. (2014) The Charlson comorbidity index can be used prospectively to identify patients who will incur high future costs. *PLoS One*; 9(12):e112479.
- Charlson ME, Charlson RE, Peterson JC, Marinopoulos SS, Briggs WM, Hollenberg JP. (2008) The Charlson comorbidity index is adapted to predict costs of chronic disease in primary care patients. *J Clin Epidemiol*; 61(12):1234-40.
- Chiba K, Fujimura Y, Toyama Y, Takahata T, Nakanishi T, Hirabayashi K. (1993) Anterior screw fixation for odontoid fracture: clinical results in 45 cases. *Eur Spine J*; 2:76-81.

- Cho DC, Sung JK. (2012) Analysis of risk factors associated with fusion failure after anterior odontoid screw fixation. *Spine*; 37:30-34.
- Clark CR, White AA 3rd. (1985) Fractures of the dens. A multicenter study. *J Bone Joint Surg Am*; 67(9):1340-8.
- Clark D, Nakamura M, Miclau T, Marcucio R. (2017) Effects of Aging on Fracture Healing. *Curr Osteoporos Rep*; 15(6):601-608.
- Clark S, Nash A, Shasti M, Brown L, Jauregui JJ, Mistretta K, Koh E, Banagan K, Ludwig S, Gelb D. (2018) Mortality Rates After Posterior C1-2 Fusion for Displaced Type II Odontoid Fractures in Octogenarians. *Spine (Phila Pa 1976)*; 43(18):E1077-E1081.
- Connolly B, Emery D, Armstrong D. (1995) The odontoid synchondrotic slip: an injury unique to young children. *Pediatr Radiol*; 25 Suppl 1:129-33.
- De Bonis P, Iaccarino C, Musio A, Martucci A, De Iure F, Donati R, Cultrera F, Tosatto L, Servadei F, Alesi D, Cavallo MA, Ghadirpour R, Molinari F, Lofrese G. (2019a) Functional Outcome of Elderly Patients Treated for Odontoid Fracture: A Multicenter Study. *Spine (Phila Pa 1976)*; 44(13):951-958.
- De Bonis P, Trapella G, Mongardi L, Olei S, Musio A, Iaccarino C, Lofrese G, Molinari F, Dugoni D, Ghadirpour R, Servadei F, Cavallo MA. (2019b) Functional Outcome After Odontoid Fractures in the Elderly. *Acta Neurochir Suppl*; 125:329-333.
- Delcourt T, Bégué T, Saintyves G, Mebtouche N, Cottin P. (2015) Management of upper cervical spine fractures in elderly patients: current trends and outcomes. *Injury*; 46 Suppl 1:24-7.
- Deng H, Yue JK, Upadhyayula PS, Burke JF, Suen CG, Chan AK, Winkler EA, Dhall SS. (2016) Odontoid fractures in the octogenarian: a systematic review and meta-analysis. *J Neurosurg Sci*; 60(4):543-55.
- DePasse JM, Palumbo MA, Ahmed AK, Adams CA Jr, Daniels AH. (2017) Halo-Vest Immobilization in Elderly Odontoid Fracture Patients: Evolution in Treatment Modality and In-Hospital Outcomes. *Clin Spine Surg*; 30(9):E1206-E1210.
- Dessai SB, Fasal R, Dipin J, Adarsh D, Balasubramanian S. (2018) Age-adjusted charlson comorbidity index and 30-day morbidity in pelvic surgeries. *South Asian J Cancer*; 7(4):240-243.
- Deutsche Gesellschaft für Unfallchirurgie. (2016) S3 - Leitlinie Polytrauma / Schwerverletzten-Behandlung. Internetquelle: https://www.awmf.org/uploads/tx_szleitlinien/012-019l_S3_Polytrauma_Schwererletzten-Behandlung_2017-08.pdf [Stand 28.2.2020].
- Deutsche Gesellschaft für Unfallchirurgie. (2018) Leitlinien 012-011 Verletzungen der oberen Halswirbelsäule. Internetquelle: https://www.awmf.org/uploads/tx_szleitlinien/012-011l_S1_Verletzungen-der-oberen-HWS_2018-09.pdf [Stand 28.2.2020].
- Dhall SS, Yue JK, Winkler EA, Mummaneni PV, Manley GT, Tarapore PE. (2017) Morbidity and Mortality Associated with Surgery of Traumatic C2 Fractures in Octogenarians. *Neurosurgery*; 80(6):854-862.
- Dias-Santos D, Ferrone CR, Zheng H, Lillemoe KD, Fernández-Del Castillo C. (2015) The Charlson age comorbidity index predicts early mortality after surgery for pancreatic cancer. *Surgery*; 157(5):881-7.
- Divi SN, Schroeder GD, Oner FC, Kandziora F, Schnake KJ, Dvorak MF, Benneker LM, Chapman JR, Vaccaro AR. (2019) AOSpine-Spine Trauma Classification System: The Value of Modifiers: A Narrative Review With Commentary on Evolving Descriptive Principles. *Global Spine J*; 9(1 Suppl):77S-88S.

- Donnally CJ 3rd, Trapana EJ, Barnhill SW, Bondar KJ, Rivera S, Sheu JI, Wang MY. (2019) The Most Influential Publications in Odontoid Fracture Management. *World Neurosurg*; 123:41-48.
- Dunn ME, Seljeskog EL. (1986) Experience in the management of odontoid process injuries: an analysis of 128 cases. *Neurosurgery*; 18(3):306-10.
- Dvořák J, Grob D. (1999) *Halswirbelsäule: Diagnostik und Therapie*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Ea HK, Weber AJ, Yon F, Lioté F. (2004) Osteoporotic fracture of the dens revealed by cervical manipulation. *Joint Bone Spine*; 71(3):246-50.
- El Masry WS, Tsubo M, Katoh S, El Miligui YH, Khan A. (1996) Validation of the American Spinal Injury Association (ASIA) motor score and the National Acute Spinal Cord Injury Study (NASCIS) motor score. *Spine (Phila Pa 1976)*; 21(5):614-9.
- Emohare O, Dittmer A, Morgan RA, Switzer JA, Polly DW Jr. (2015) Osteoporosis in acute fractures of the cervical spine: the role of opportunistic CT screening. *J Neurosurg Spine*; 23(1):1-7.
- Ersmark H, Löwenhielm P. (1988) Factors influencing the outcome of cervical spine injuries. *J Trauma*; 28(3):407-10.
- Esteves LA, Joaquim AF, Tedeschi H. (2016) Retrospective analysis of a case series of patients with traumatic injuries to the craniocervical junction. *Einstein (Sao Paulo)*; 14(4):528-533.
- Ewerbeck V, Wentzense, A, Grützner PA, Holz F, Krämer K-L. (2014) *Standardverfahren in der operativen Orthopädie und Unfallchirurgie*. 4. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Eysel P, Roosen K. (1993) [Ventral or dorsal spondylodesis in dens basal fracture--a new classification for choice of surgical approach]. *Zentralbl Neurochir*; 54(4):159-65.
- Fairholm D, Lee ST, Lui TN. (1996) Fractured odontoid: the management of delayed neurological symptoms. *Neurosurgery*; 38(1):38-43.
- Fam MD, Zeineddine HA, Nassir RM, Bhatt P, Kamel MH. (2017) Patient-reported outcome following nonsurgical management of type II odontoid process fractures in adults. *J Craniovertebr Junction Spine*; 8(1):64-69.
- Faure A, Graillon T, Pesenti S, Tropiano P, Blondel B, Fuentes S. (2017) Trends in the surgical management of odontoid fractures in patients above 75 years of age: Retrospective study of 70 cases. *Orthop Traumatol Surg Res*; 103(8):1221-1228.
- Faure A, Prost S, Mansouri N, Farah K, Blondel B, Fuentes S. (2018) Odontoid Fracture in Patients Age >75 Years Surgically Managed by the Harms Technique: Bone Healing and 1-Year Mortality Rate in 57 Cases. *World Neurosurg*; 116:e1087-e1091.
- Foulke BA, Kendal AR, Murray DW, Pandit H. (2016) Fracture healing in the elderly: A review. *Maturitas*; 92:49-55.
- Fountas KN, Kapsalaki EZ, Karampelas I, Feltes CH, Dimopoulos VG, Machinis TG, Nikolakakos LG, Boev III AN, Choudhri H, Smisson HF. (2005) Results of long-term follow-up in patients undergoing anterior screw fixation for type II and rostral type III odontoid fractures. *Spine*; 30: 661-669.
- France JC, Powell EN 2nd, Emery SE, Jones DL. (2012) Early morbidity and mortality associated with elderly odontoid fractures. *Orthopedics*; 35(6):e889-94.
- Fried L, Bernardini J, Piraino B. (2001) Charlson comorbidity index as a predictor of outcomes in incident peritoneal dialysis patients. *Am J Kidney Dis*; 37(2):337-42.

- Gale SC, Gracias VH, Reilly PM, Schwab CW. (2005) The inefficiency of plain radiography to evaluate the cervical spine after blunt trauma. *J Trauma*; 59(5):1121-5.
- Gebauer M, Lohse C, Barvencik F, Pogoda P, Rueger JM, Püschel K, Amling M. (2006) Subdental synchondrosis and anatomy of the axis in aging: a histomorphometric study on 30 autopsy cases. *Eur Spine J*; 15(3):292-8.
- Gedeit R. (2001) Head injury. *Pediatr Rev*; 22(4):118-24. Erratum in: *Pediatr Rev*; (2001) 22(7):251.
- Gembruch O, Lemonas E, Ahmadipour Y, Sure U, El Hindy N, Dodel R, Müller O. (2019) Treatment of Odontoid Type II Fractures in Octogenarians: Balancing Two Different Treatment Strategies. *Neurospine*; doi: 10.14245/ns.1836250.125.
- Gertz SD, Liebman M. (2003) *Basiswissen Neuroanatomie: Leicht verständlich - Knapp - klinikbezogen*. 4. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Girardo M, Rava A, Gargiulo G, Coniglio A, Artiaco S, Massè A, Fusini F. (2018) Clinical and radiological union rate evaluation of type 2 odontoid fractures: A comparison between anterior screw fixation and halo vest in elderly patients. *J Craniovertebr Junction Spine*; 9(4):254-259.
- Goldberg W, Mueller C, Panacek E, Tigges S, Hoffman JR, Mower WR; NEXUS Group. (2001) Distribution and patterns of blunt traumatic cervical spine injury. *Ann Emerg Med*; 38(1):17-21.
- Gonschorek O, Vordemvenne T, Blattert T, Katscher S, Schnake KJ. (2018) Spine Section of the German Society for Orthopaedics and Trauma (2018). Treatment of Odontoid Fractures: Recommendations of the Spine Section of the German Society for Orthopaedics and Trauma (DGOU). *Global Spine J*; 8(2 Suppl):12S-17S.
- González Quevedo D, Mariño IT, Sánchez Siles JM, Escribano ER, Granero Molina EJ, Enrique DB, Smoljanović T, Pareja FV. (2017) Patient survival and surgical re-intervention predictors for intracapsular hip fractures. *Injury*; 48(8):1831-1836.
- Govender S, Grootboom M (1988) Fractures of the dens-The results of non-rigid immobilization. *Injury*. 19(3):165-7
- Govender S, Maharaj J, Haffajee M. (2000) Fractures of the odontoid process. *J Bone Joint Surg Br*; 82(8):1143-7.
- Grauer JN, Shafi B, Hilibrand AS, Harrop JS, Kwon BK, Beiner JM, Albert TJ, Fehlings MG, Vaccaro AR. (2005) Proposal of a modified, treatment-oriented classification of odontoid fractures. *Spine J*; 5(2):123-9.
- Greenberg MS. (2010) *Handbook of Neurosurgery*. 7. Auflage. New York: Georg Thieme Verlag.
- Greene KA, Dickman CA, Marciano FF, Drabier JB, Hadley MN, Sonntag VKH. (1997) Acute axis fractures: analysis of management and outcome in 340 consecutive cases. *Spine*; 22:1843-52.
- Grob D, Magerl F. (1987) Operative Stabilisierung bei Frakturen von C1 und C2. *Orthopäde*; 16(1):46-54.
- Grob D, Panjabi M, Dvorak J, Humke T, Lydon C, Vasavada A, Crisco J 3rd. (1994) Die instabile Wirbelsäule - eine „In-vitro-“ und „In-vivo-Studie“ zum besseren Verständnis der klinischen Instabilität. *Orthopäde*; 23(4):291-8.
- Hadley MN, Browner C, Sonntag VKH. (1985) Axis fractures: a comprehensive review of management and treatment in 107 cases. *Neurosurgery*; 17: 281-290.
- Hadley MN, Dickman CA, Browner CM, Sonntag VK. (1989) Acute axis fractures: a review of 229 cases. *J Neurosurg*; 71(5 Pt 1):642-7.

- Hansen JT, Lambert DR, Netter FH. (Hg.) (2006) Netters Klinische Anatomie. 2. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Hanssen AD, Cabanela ME. (1987) Fractures of the dens in adult patients. *J Trauma*; 27(8):928-34.
- Harms J, Melcher RP. (2001) Posterior C1-C2 fusion with polyaxial screw and rod fixation. *Spine (Phila Pa 1976)*; 26(22):2467-71.
- Harrop JS, Hart R, Anderson PA. (2010) Optimal treatment for odontoid fractures in the elderly. *Spine (Phila Pa 1976)*; 35(21 Suppl):S219-27.
- Hasler RM, Exadaktylos AK, Bouamra O, Benneker LM, Clancy M, Sieber R, Zimmermann H, Lecky F. (2012) Epidemiology and predictors of cervical spine injury in adult major trauma patients: a multicenter cohort study. *J Trauma Acute Care Surg*; 72(4):975-81
- Hénaux PL, Cueff F, Diabira S, Riffaud L, Hamlat A, Brassier G, Morandi X. (2012) Anterior screw fixation of type IIB odontoid fractures in octogenarians. *Eur Spine J*; 21(2):335-9.
- Hesse E, Neuerburg C, Kammerlander C, Stumpf U, Stange R, Böcker W. (2019) Einfluss spezifischer Osteoporosemedikamente auf die Frakturheilung. *Unfallchirurg*; 122(7):506-511.
- Hsu WK, Anderson PA. (2010) Odontoid fractures: update on management. *J Am Acad Orthop Surg*; 18(7):383-94.
- Huang DG, Zhang XL, Hao DJ, He BR, Wang XD, Liu TJ. (2019) The Healing Rate of Type II Odontoid Fractures Treated With Posterior Atlantoaxial Screw-rod Fixation: A Retrospective Review of 77 Patients. *J Am Acad Orthop Surg*; 27(5):e242-e248.
- Hülsmeier VI, Flatz K, Putschbach K, Bechter MR, Weiler S, Fischer A, Feist M. (2015) Traumatic odontoid process synchondrosis fracture with atlantoaxial instability in a calf: clinical presentation and imaging findings. *Ir Vet J*; 68(1):6. doi: 10.1186.
- Huybregts JG, Jacobs WC, Peul WC, Vleggeert-Lankamp CL (2014) Rationale and design of the INNOVATE Trial: an international cooperative study on surgical versus conservative treatment for odontoid fractures in the elderly. *BMC Musculoskelet Disord*; 15:7.
- Huybregts JG, Jacobs WC, Vleggeert-Lankamp CL. (2013) The optimal treatment of type II and III odontoid fractures in the elderly: a systematic review. *Eur Spine J*; 22(1):1-13.
- Imhof H. (2006) Wirbelsäule. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Ishak B, Schneider T, Gimmy V, Unterberg AW, Kiening KL. (2017) Early Complications, Morbidity, and Mortality in Octogenarians and Nonagenarians Undergoing Posterior Intra-Operative Spinal Navigation-Based C1/2 Fusion for Type II Odontoid Process Fractures. *J Neurotrauma*; 34(24):3326-3335.
- Isidro S, Molinari R, Ikpeze T, Hernandez C, Mahmoudi MS, Mesfin A. (2019) Outcomes of Halo Immobilization for Cervical Spine Fractures. *Global Spine J*; 9(5):521-526.
- Lucif N Jr, Rocha JS. (2004) [Study of inequalities in hospital mortality using the Charlson comorbidity index]. *Rev Saude Publica*; 38(6):780-6.
- Ivancic PC. (2014) Odontoid fracture biomechanics. *Spine (Phila Pa 1976)*; 39(24):E1403-10.
- Izeki M, Neo M, Takemoto M, Fujibayashi S, Ito H, Nagai K, Matsuda S. (2014) The O-C2 angle established at occipito-cervical fusion dictates the patient's destiny in terms of postoperative dyspnea and/or dysphagia. *Eur Spine J*; 23(2):328-36.

- Jenkins S, Bordes S, Aly I, Jeyamohan S, Ishak B, Iwanaga J, Loukas M, Tubbs RS. (2019) Internal Morphology of the Odontoid Process: Anatomical and Imaging Study with Application to C2 Fractures. *World Neurosurg*; pii: S1878-8750(19)31044-7.
- Jiang L, Chou ACC, Nadkarni N, Ng CEQ, Chong YS, Howe TS, Koh JSB. (2018) Charlson Comorbidity Index Predicts 5-Year Survivorship of Surgically Treated Hip Fracture Patients. *Geriatr Orthop Surg Rehabil*; 9:2151459318806442.
- Joestl J, Lang N, Bukaty A, Platzer P. (2016a) A comparison of anterior screw fixation and halo immobilisation of type II odontoid fractures in elderly patients at increased risk from anaesthesia. *Bone Joint J*; 98-B(9):1222-6.
- Joestl J, Lang NW, Tiefenboeck TM, Hajdu S, Platzer P. (2016b) Management and Outcome of Dens Fracture Nonunions in Geriatric Patients. *J Bone Joint Surg Am*; 98(3):193-8.
- Julien TD, Frankel B, Traynelis VC, Ryken TC. (2000) Evidence-based analysis of odontoid fracture management. *Neurosurg Focus*; 15;8(6):e1.
- Kaesmacher J, Schweizer C, Valentinitsch A, Baum T, Rienmüller A, Meyer B, Kirschke JS, Ryang YM. (2017) Osteoporosis Is the Most Important Risk Factor for Odontoid Fractures in the Elderly. *J Bone Miner Res*; 32(7):1582-1588.
- Kaneyama S, Sumi M, Takabatake M, Kasahara K, Kanemura A, Hirata H, Darden BV. (2017) The Prediction and Prevention of Dysphagia After Occipitospinal Fusion by Use of the S-line (Swallowing Line). *Spine (Phila Pa 1976)*; 42(10):718-725.
- Keller S, Bieck K, Karul M, Schönagel B, Adam G, Habermann C, Yamamura J. (2015) Lateralized Odontoid in Plain Film Radiography: Sign of Fractures? A Comparison Study with MDCT. *Rofo*; 187(9):801-7.
- Koeh F, Ackland HM, Varma DK, Williamson OD, Malham GM. (2008) Nonoperative management of type II odontoid fractures in the elderly. *Spine (Phila Pa 1976)*; 33(26):2881-6.
- Konieczny MR, Gstrein A, Müller EJ. (2012) Treatment algorithm for dens fractures: non-halo immobilization, anterior screw fixation, or posterior transarticular C1-C2 fixation. *J Bone Joint Surg Am*; 94(19):e144(1-6).
- Kortmann HR, Eggers C, Schofer M, Hax PM. (2000) Diagnostik und Therapie der Verletzungen der oberen Halswirbelsäule. *Trauma Berufskrankh*; 2: 134-147.
- Lall R, Patel NJ, Resnick DK. (2010) A review of complications associated with craniocervical fusion surgery. *Neurosurgery*; 67(5):1396-402; discussion 1402-3.
- Laurer H, Sander A, Maier B, Marzi I. (2010) Frakturen der Halswirbelsäule. *Orthopäde*; 39: 237-246.
- Lennarson PJ, Mostafavi H, Traynelis VC, Walters BC. (2000) Management of type II dens fractures: a case-control study. *Spine (Phila Pa 1976)*; 25(10):1234-7.
- Lippert H. (2006) *Lehrbuch Anatomie*. 8. Auflage. München und Jena: Urban & Fischer Verlag/Elsevier GmbH.
- Lofrese G, Musio A, De Iure F, Cultrera F, Martucci A, Iaccarino C, Essayed W, Ghadirpour R, Servadei F, Cavallo MA, De Bonis P. (2019) Type II odontoid fracture in elderly patients treated conservatively: is fracture healing the goal? *Eur Spine J*; 28(5):1064-1071.
- Longo UG, Denaro L, Campi S, Maffulli N, Denaro V. (2010) Upper cervical spine injuries: indications and limits of the conservative management in Halo vest. A systematic review of efficacy and safety. *Injury*; 41(11):1127-35.

- Maak TG, Grauer JN. (2006) The contemporary treatment of odontoid injuries. *Spine (Phila Pa 1976)*; 31(11 Suppl):S53-60; discussion S61.
- Magerl F. (1986) Stable posterior fusion of the atlas and axis by transarticular screw fixation. In: Kehr P, Weidner A (Hg.) *Cervical spine I*. Berlin Heidelberg New York: Springer, 322–327.
- Maiman DJ, Larson SJ. (1982) Management of odontoid fractures. *Neurosurgery*; 11(4):471-6.
- Martin MD, Bruner HJ, Maiman DJ. (2010) Anatomic and biomechanical considerations of the craniovertebral junction. *Neurosurgery*; 66(3 Suppl):2-6.
- Masuhr KF, Masuhr F, Neumann M. (2013) *Neurologie*. 7. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Mattle H, Mumenthaler M. (2013) *Neurologie*. 13. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- McGuire RA Jr, Harkey HL. (1995) Modification of technique and results of atlantoaxial transfacet stabilization. *Orthopedics*; 18(10):1029-32.
- Menezes AH, Traynelis VC. (2008) Anatomy and biomechanics of normal craniovertebral junction (a) and biomechanics of stabilization (b). *Childs Nerv Syst*; 24(10):1091-100.
- Miller JA, Bowen A, Morisada MV, Margetis K, Lubelski D, Lieberman IH, Benzel EC, Mroz TE. (2015) Radiologic and clinical characteristics of vertebral fractures in multiple myeloma. *Spine J*; 15(10):2149-56.
- Molinari RW, Dahl J, Gruhn WL, Molinari WJ. (2013) Functional outcomes, morbidity, mortality, and fracture healing in 26 consecutive geriatric odontoid fracture patients treated with posterior fusion. *J Spinal Disord Tech*; 26(3):119-26.
- Molinari RW, Khera OA, Gruhn WL, McAssey RW. (2012) Rigid cervical collar treatment for geriatric type II odontoid fractures. *Eur Spine J*; 21(5):855-62.
- Morgenstern M, Friederichs J, Gärtner C, Bühren V, Gonschorek O. (2016) Imitation einer Densfraktur Typ Anderson II durch ein computertomographisches Bewegungsartefakt. *Unfallchirurg*; 119(5):450-3.
- Muche R, Rösch M, Flierl S, Alt B, Jacobi E, Gaus W. (2000) Entwicklung und Validierung eines Prognosemodells zur Vorhersage der Arbeitsfähigkeit nach Rehabilitation anhand routinemäßig erhobener Parameter. *Rehabilitation (Stuttg)*; 39(5):262-7.
- Müller EJ, Schwinnen I, Fischer K, Wick M, Muhr G. (2003) Non-rigid immobilisation of odontoid fractures. *Eur Spine J*; 12(5):522-5.
- Müller EJ, Wick M, Russe O, Muhr G. (1998) Traumatic pseudarthrosis of the dens axis. Aetiology, course and therapy. *Unfallchirurg*; 101: 750.
- Nalla S, Blanco-Perez E, Mata-Escolano F, Llido S, Sanchis-Gimeno JA. (2018) Unexpected Persistent Dentocentral Synchondrosis of C2. *World Neurosurg*; 111:26-27.
- Nemeth ZH, Difazio LT, Bilaniuk JW, Siegel BK, Durling-Grover R, Rolandelli RH, Adams JM. (2017) The Incidence of Severe Dysphagia after Odontoid Fracture. *Am Surg*; 83(1):e15-17.
- Netter FH. (2011) *Atlas der Anatomie*. 5. Auflage. München und Jena: Elsevier, Urban & Fischer.
- O'Brien WT Sr, Shen P, Lee P. (2015) The Dens: Normal Development, Developmental Variants and Anomalies, and Traumatic Injuries. *J Clin Imaging Sci*; 5:38.

- Özkan N, Wrede K, Ardeshiri A, Sariaslan Z, Stein KP, Dammann P, Müller O, Ringelstein A, Sure U, Sandalcioglu IE. (2015) Management of traumatic spinal injuries in children and young adults. *Childs Nerv Syst*; 31(7):1139-48.
- Oh CH, Ji GY, Yoon SH, Hyun D, Kim EY, Park H, Jang AR. (2015) Delayed Vertebral Artery Dissection after Posterior Cervical Fusion with Traumatic Cervical Instability: A Case Report. *Korean J Spine*; 12(2):79-83.
- Oliver M, Inaba K, Tang A, Branco BC, Barmparas G, Schnüriger B, Lustenberger T, Demetriades D. (2012) The changing epidemiology of spinal trauma: A 13-year review from a Level I trauma centre. *Injury*; 43(8):1296-1300.
- Osman A, Alageli NA, Short DJ, Masri WSE. (2017) Conservative Management of Odontoid Peg Fractures, long term follow up. *J Clin Orthop Trauma*; 8(2):103-106.
- Osti M, Philipp H, Meusburger B, Benedetto KP. (2011) Analysis of failure following anterior screw fixation of Type II odontoid fractures in geriatric patients. *Eur Spine J*; 20(11):1915-20.
- Pal D, Sell P, Grevitt M. (2011) Type II odontoid fractures in the elderly: an evidence-based narrative review of management. *Eur Spine J*; 20(2):195-204.
- Patel A, Zakaria R, Al-Mahfoudh R, Clark S, Barrett C, Sarsam Z, Pillay R, Pigott TD, Wilby MJ. (2015) Conservative management of type II and III odontoid fractures in the elderly at a regional spine centre: A prospective and retrospective cohort study. *Br J Neurosurg*; 29(2):249-53.
- Patterson JT, Theologis AA, Sing D, Tay B. (2017) Anterior Versus Posterior Approaches for Odontoid Fracture Stabilization in Patients Older Than 65 Years: 30-day Morbidity and Mortality in a National Database. *Clin Spine Surg*; 30(8):E1033-E1038.
- Pearson AM, Martin BI, Lindsey M, Mirza SK. (2016) C2 Vertebral Fractures in the Medicare Population: Incidence, Outcomes, and Costs. *J Bone Joint Surg Am*; 98(6):449-56.
- Pepin JW, Bourne RB, Hawkins RJ. (1985) Odontoid fractures, with special reference to the elderly patient. *Clin Orthop Relat Res*; (193):178-83.
- Perry A, Graffeo CS, Carlstrom LP, Chang W, Mallory GW, Puffer RC, Clarke MJ. (2018) Fusion, Failure, Fatality: Long-term Outcomes After Surgical Versus Nonoperative Management of Type II Odontoid Fracture in Octogenarians. *World Neurosurg*; 110:e484-e489.
- Pinter NK, Pfiffner TJ, Mechtler LL. (2016) Neuroimaging of spine tumors. *Handb Clin Neurol*; 136:689-706.
- Platzer P, Thalhammer G, Oberleitner G, Schuster R, Vécsei V, Gaebler C. (2007a) Surgical treatment of dens fractures in elderly patients. *J Bone Joint Surg Am*; 89(8):1716-22.
- Platzer P, Thalhammer G, Sarahrudi K, Kovar F, Vekszler G, Vécsei V, Gaebler C. (2007b) Nonoperative management of odontoid fractures using a halo thoracic vest. *Neurosurgery*; 61(3):522-9; discussion 529-30.
- Pola E, Pambianco V, Colangelo D, Formica VM, Autore G, Nasto LA. (2017) Teriparatide anabolic therapy as potential treatment of type II dens non-union fractures. *World J Orthop*; 8(1):82-86.
- Polin RS, Szabo T, Bogaev CA, Replogle RE, Jane JA. (1996) Nonoperative management of Types II and III odontoid fractures: the Philadelphia collar versus the halo vest. *Neurosurgery*; 38(3):450-6; discussion 456-7.

- Radovanovic I, Urquhart JC, Rasoulinejad P, Gurr KR, Siddiqi F, Bailey CS. (2017) Patterns of C-2 fracture in the elderly: comparison of etiology, treatment, and mortality among specific fracture types. *J Neurosurg Spine*; 27(5):494-500.
- Raudenbush B, Molinari R. (2015) Longer-Term Outcomes of Geriatric Odontoid Fracture Nonunion. *Geriatr Orthop Surg Rehabil*; 6(4):251-7.
- Rizivi SA, Fredo HL, Lied B, Nakstad PH, Ronning P, Helseth E. (2012) Surgical management of acute odontoid fractures: surgery-related complications and longterm outcomes in a consecutive series of 97 patients. *J Trauma Acute Care Surg*; 72:682-690.
- Robinson AL, Möller A, Robinson Y, Olerud C. (2017) C2 Fracture Subtypes, Incidence, and Treatment Allocation Change with Age: A Retrospective Cohort Study of 233 Consecutive Cases. *Biomed Res Int*; 2017:8321680.
- Robinson AL, Schmeiser G, Robinson Y, Olerud C. (2018) Surgical vs. non-surgical management of displaced type-2 odontoid fractures in patients aged 75 years and older: study protocol for a randomised controlled trial. *Trials*; 19(1):452.
- Robinson Y, Robinson AL, Olerud C. (2014) Systematic review on surgical and nonsurgical treatment of type II odontoid fractures in the elderly. *Biomed Res Int*; 2014:231948. doi: 10.1155.
- Robson KA. (2011) Os odontoideum: rare cervical lesion. *West J Emerg Med*; 12(4):520-2.
- Roth R, Wörsdörfer O. (1998) [Surgical therapy of dens fracture]. *Zentralbl Chir*; 123(8):914-8.
- Ryang YM, Török E, Janssen I, Reinke A, Buchmann N, Gempt J, Ringel F, Meyer B. (2016) Early Morbidity and Mortality in 50 Very Elderly Patients After Posterior Atlantoaxial Fusion for Traumatic Odontoid Fractures. *World Neurosurg*; 87:381-91.
- Ryken TC, Hadley MN, Aarabi B, Dhall SS, Gelb DE, Hurlbert RJ, Rozzelle CJ, Theodore N, Walters BC. (2013) Management of isolated fractures of the axis in adults. *Neurosurgery*; 72 Suppl 2:132-50.
- Sarode DP, Demetriades AK. (2018) Surgical versus nonsurgical management for type II odontoid fractures in the elderly population: a systematic review. *Spine J*; 18(10):1921-1933.
- Sawarkar DP, Singh PK, Siddique SA, Agrawal D, Satyarthee GD, Gupta DK, Sinha S, Kale SS, Sharma BS. (2015) Surgical management of odontoid fractures at level one trauma center: a single-center series of 142 cases. *Neurol India*; 63(1):40-8.
- Schiebler TH, Korf H-W. (2007) *Anatomie*. 10. Auflage. Heidelberg: Steinkopff.
- Schirmer M. (2005) *Neurochirurgie*. 10. Auflage. München und Jena: Urban & Fischer Verlag/Elsevier GmbH.
- Schmidt S, Hendricks V, Griebenow R, Riedel R. (2013) Demographic change and its impact on the health-care budget for heart failure inpatients in Germany during 1995-2025. *Herz*; 38(8):862-7.
- Schnake KJ, Schroeder GD, Vaccaro AR, Oner C. (2017) AOSpine Classification Systems (Subaxial, Thoracolumbar). *J Orthop Trauma*; 31 Suppl 4:S14-S23.
- Schnorpfeil F, Reuter W. (2010) *Neurologische Leitsymptome akut einsetzender Krankheitsbilder*. 3. Auflage. München und Jena: Elsevier.
- Schroeder GD, Kepler CK, Kurd MF, Paul JT, Rubenstein RN, Harrop JS, Brodke DS, Chapman JR, Vaccaro AR. (2015) A Systematic Review of the Treatment of Geriatric Type II Odontoid Fractures. *Neurosurgery*; 77 Suppl 4:6-14.

- Schünke M, Schulte E, Schumacher U, Voll M, Wesker K. (2014) Prometheus, Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem. 5. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Scott EW, Haid Jr RW, Peace D. (1990) Type I fractures of the odontoid process: implications for atlanto-occipital instability. *J Neurosurg*; 72(3):488-92.
- Seybold EA, Bayley JC. (1998) Functional outcome of surgically and conservatively managed dens fractures. *Spine (Phila Pa 1976)*; 23(17):1837-45; discussion 1845-6.
- Shears E, Armitstead CP. (2008) Surgical versus conservative management for odontoid fractures. *Cochrane Database Syst Rev*; (4):CD005078.
- Shiban E, Lange N, Rothlauf P, Jörger AK, Wagner A, Ryang YM, Lehmborg J, Meyer B. (2019) Inaccuracy of standard geriatric scores in nonagenarians following hospitalization for various spinal pathologies. *Neurosurg Rev*; doi: 10.1007/s10143-019-01122-3.
- Shousha M, Alhashash M, Allouch H, Boehm H. (2019) Surgical treatment of type II odontoid fractures in elderly patients: a comparison of anterior odontoid screw fixation and posterior atlantoaxial fusion using the Magerl-Gallie technique. *Eur Spine J*; doi: 10.1007/s00586-019-05946-x.
- Silberstein M, Tress BM, Hennessy O. (1992) Prevertebral swelling in cervical spine injury: identification of ligament injury with magnetic resonance imaging. *Clin Radiol*; 46(5):318-23.
- Sime D, Pitt V, Pattuwage L, Tee J, Liew S, Gruen R. (2014) Non-surgical interventions for the management of type 2 dens fractures: a systematic review. *ANZ J Surg*; 84(5):320-5.
- Singh V, Banerjee S, Onukaogu S, Singh P, Leitao J. (2012) Nonoperative treatment of displaced type II odontoid peg fractures with a Philadelphia collar. *Orthopedics*; 35(4):e538-42.
- Sitzer M, Steinmetz H. (2011) Lehrbuch Neurologie. München und Jena: Urban & Fischer Verlag/Elsevier GmbH.
- Stein G, Meyer C, Marlow L, Christ H, Müller LP, Isenberg J, Eysel P, Schiffer G, Faymonville C. (2017) [Type 2 dens fracture in the elderly and therapy-linked mortality: Conservative or operative treatment]. *Unfallchirurg*; 120(2):122-128.
- Steinberg J, Doblhammer-Reiter G. (2010) Demografische Bevölkerungsprognosen. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz*; 53(5): 393-403.
- St-Louis E, Iqbal S, Feldman LS, Sudarshan M, Deckelbaum DL, Razek TS, Khwaja K. (2015) Using the age-adjusted Charlson comorbidity index to predict outcomes in emergency general surgery. *J Trauma Acute Care Surg*; 78(2):318-23.
- Subach BR, Morone MA, Haid RW Jr, McLaughlin MR, Rodts GR, Comey CH. (1999) Management of acute odontoid fractures with single-screw anterior fixation. *Neurosurgery*; 45(4):812-9; discussion 819-20.
- Tadros A, Sharon M, Craig K, Krantz W. (2019) Characteristics and Management of Emergency Department Patients Presenting with C2 Cervical Spine Fractures. *Biomed Res Int*; 2019:4301051.
- Tashjian RZ, Majercik S, Biffi WL, Palumbo MA, Cioffi WG. (2006) Halo-vest immobilization increases early morbidity and mortality in elderly odontoid fractures. *J Trauma*; 60(1):199-203.
- Teague A, Lim KH, Wang-Gillam A. (2015) Advanced pancreatic adenocarcinoma: a review of current treatment strategies and developing therapies. *Ther Adv Med Oncol*; 7(2):68-84.

- Tetreault LA, Dettori JR, Wilson JR, Singh A, Nouri A, Fehlings MG, Brodt ED, Jacobs WB. (2013) Systematic review of magnetic resonance imaging characteristics that affect treatment decision making and predict clinical outcome in patients with cervical spondylotic myelopathy. *Spine (Phila Pa 1976)*; 38(22 Suppl 1):S89-110.
- Tian NF, Hu XQ, Wu LJ, Wu XL, Wu YS, Zhang XL, Wang XY, Chi YL, Mao FM. (2014) Pooled analysis of non-union, re-operation, infection, and approach related complications after anterior odontoid screw fixation. *PLoS One*; 9(7):e103065.
- Tomaszewski R, Wiktor Ł. (2015) Occipital Condyle Fractures in Adolescents. *Ortop Traumatol Rehabil*; 17(3):219-27.
- Torklus Dv, Gehle W. (1987) Die obere Halswirbelsäule: Regionale Morphologie, Pathologie u. Traumatologie - Prakt. Röntgenatlas u. Systematik. 3. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Trepel M. (2003) Neuroanatomie: Struktur und Funktion. 4. Auflage. München und Jena: Urban & Fischer Verlag/Elsevier GmbH.
- Triggs KJ, Ballock RT, Lee TQ, Woo SL, Garfin SR. (1989) The effect of angled insertion on halo pin fixation. *Spine (Phila Pa 1976)*; 14(8):781-3.
- Tsai MH, Hu CC. (2019) Teriparatide as nonoperative treatment for femoral shaft atrophic nonunion: A case report. *World J Clin Cases*; 7(18):2838-2842.
- Tscherne H, Blauth M. (2006) Tscherne Unfallchirurgie. Band Wirbelsäule; Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Vaccaro AR, Kepler CK, Kopjar B, Chapman J, Shaffrey C, Arnold P, Gokaslan Z, Brodke D, France J, Dekutoski M, Sasso R, Yoon ST, Bono C, Harrop J, Fehlings MG. (2013) Functional and quality-of-life outcomes in geriatric patients with type-II dens fracture. *J Bone Joint Surg Am*; 95(8):729-35.
- Van de Kelft E. (2019) Perspective on what Seems Simple to Manage: Odontoid Fractures. *World Neurosurg* X; 2:100008.
- Veeravagu A, Li A, Swinney C, Tian L, Moraff A, Azad TD, Cheng I, Alamin T, Hu SS, Anderson RL, Shuer L, Desai A, Park J, Olshen RA, Ratliff JK. (2017). Predicting complication risk in spine surgery: a prospective analysis of a novel risk assessment tool. *J Neurosurg Spine*; 27(1):81-91.
- Verla T, Adogwa O, Toche U, Farber SH, Petraglia F 3rd, Murphy KR, Thomas S, Fatemi P, Gottfried O, Bagley CA, Lad SP. (2016) Impact of Increasing Age on Outcomes of Spinal Fusion in Adult Idiopathic Scoliosis. *World Neurosurg*; 87:591-7.
- Wagner SC, Schroeder GD, Kepler CK, Schupper AJ, Kandziora F, Vialle EN, Oner C, Fehlings MG, Vaccaro AR. (2017) Controversies in the Management of Geriatric Odontoid Fractures. *J Orthop Trauma*; 31 Suppl 4:S44-S48.
- Wang H, Wang Q, Ma L, Yang D, Ding W. (2018). Predisposing Factors of Fracture Nonunion After Posterior C1 Lateral Mass Screws Combined with C2 Pedicle/Laminar Screw Fixation for Type II Odontoid Fracture. *World Neurosurg*; 109:e417-e425.
- Waqar M, Van-Popta D, Barone DG, Sarsam Z. (2017) External Immobilization of Odontoid Fractures: A Systematic Review to Compare the Halo and Hard Collar. *World Neurosurg*; 97:513-517.
- Wetzel FT, Dunsieith NW Jr, Kuhlengel KR, Paul EM, Lahey DM. (1995). The effectiveness of the cervical halo: open versus closed ring. A preliminary report. *Paraplegia*; 33(2):110-5.
- White AA 3rd, Panjabi MM. (1978) The clinical biomechanics of the occipitoatlantoaxial complex. *Orthop Clin North Am*; 9(4):867-78.

- White AP, Hashimoto R, Norvell DC, Vaccaro AR. (2010) Morbidity and mortality related to odontoid fracture surgery in the elderly population. *Spine (Phila Pa 1976)*; 35(9 Suppl):S146-57.
- Wick M, Müller EJ, Ekkernkamp A, Muhr G. (1998) [Os odontoideum. Etiology, clinical aspects, therapy]. *Unfallchirurg*; 101(2):100-4.
- Wirth CJ, Zichner L, Krämer J. (2004) *Orthopädie und Orthopädische Chirurgie – Wirbelsäule, Thorax*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Woods BI, Hohl JB, Braly B, Donaldson W 3rd, Kang J, Lee JY. (2014) Mortality in elderly patients following operative and nonoperative management of odontoid fractures. *J Spinal Disord Tech*; 27(6):321-6.
- Wronka KS, Sznerch N, Davies J. (2011) Dysphagia and airway compromise as a result of retropharyngeal haematoma following undiagnosed odontoid peg fracture: a case report. *Ann R Coll Surg Engl*; 93(6):e114-6.
- Yuan S, Wei B, Tian Y, Yan J, Xu W, Wang L, Liu X. (2018) The comparison of clinical outcome of fresh type II odontoid fracture treatment between anterior cannulated screws fixation and posterior instrumentation of C1-2 without fusion: a retrospective cohort study. *J Orthop Surg Res*; 13(1):3.
- Zhao H, Wang T, Wang Y, Yu Y, Wang X, Zhao Z, Yang H, Yan B, Wu X, Da W, Zhang Y. (2016) Comorbidity as an independent prognostic factor in elderly patients with peripheral T-cell lymphoma. *Oncotargets Ther*; 9:1795-9.

11 Publikationsverzeichnis

Teile der vorliegenden Arbeit gelangten bereits zur Veröffentlichung:

Conference Paper:

Schöller K, Müller T, Uhl E. (2016) Treatment failure after surgical and non-surgical management of odontoid fractures in the elderly, Conference/DGNC in Frankfurt, European Spine Journal 25:3823

Müller T, Uhl E, Schöller K. (2017) The relevance of the Charlson age comorbidity index in patients undergoing surgical and non-surgical treatment of odontoid fractures, 12. Jahrestagung der Deutschen Wirbelsäulengesellschaft in Stuttgart

Vorträge:

„Treatment failure after surgical and non-surgical management of odontoid fractures in the elderly“ von Karsten Schöller, Tilman Müller, Eberhard Uhl zur 67. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Neurochirurgie in Frankfurt am 14.06.2016

„Therapieversagen nach operativer und konservativer Behandlung von Densfrakturen bei älteren Patienten“ von Tilman Müller, Eberhard Uhl, Karsten Schöller zur Jahrestagung DGNC Sektion Wirbelsäule in Köln am 16./17.09.2016

„Therapieversagen nach operativer und konservativer Behandlung von Densfrakturen bei älteren Patienten“ von Karsten Schöller, Tilman Müller, Eberhard Uhl zum 11. Deutschen Wirbelsäulenkongress (DWG) in Hannover im Congress Center am 1. - 3. Dezember 2016

„Die Relevanz des Charlson Age Comorbidity Index bei Patienten mit operativ und konservativ behandelten Densfrakturen“ von Tilman Müller, Eberhard Uhl, Karsten Schöller zum 12. Deutschen Wirbelsäulenkongress (DWG), ICS Internationales Congresscenter in Stuttgart am 30.November - 2. Dezember 2017

Eigenständigkeitserklärung

„Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne unzulässige Hilfe oder Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Bei den von mir durchgeführten und in der Dissertation erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der „Satzung der Justus-Liebig-Universität Gießen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ niedergelegt sind, eingehalten sowie ethische, datenschutzrechtliche und tierschutzrechtliche Grundsätze befolgt. Ich versichere, dass Dritte von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen, oder habe diese nachstehend spezifiziert. Die vorgelegte Arbeit wurde weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde zum Zweck einer Promotion oder eines anderen Prüfungsverfahrens vorgelegt. Alles aus anderen Quellen und von anderen Personen übernommene Material, das in der Arbeit verwendet wurde oder auf das direkt Bezug genommen wird, wurde als solches kenntlich gemacht. Insbesondere wurden alle Personen genannt, die direkt und indirekt an der Entstehung der vorliegenden Arbeit beteiligt waren. Mit der Überprüfung meiner Arbeit durch eine Plagiatserkennungssoftware bzw. ein internetbasiertes Softwareprogramm erkläre ich mich einverstanden.“

Ort, Datum

Unterschrift

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt zunächst meinem Doktorvater Prof. Dr. med. Karsten Schöller, der meine Arbeit stets mit viel konstruktiver Anregungen und Verständnis unterstützt hat sowie dem Institut für Neurochirurgie des Universitätsklinikums Gießen unter der Leitung von Prof. Dr. med. Eberhard Uhl, welches diese Arbeit ermöglichte.

Gleichzeitig möchte ich mich hiermit auch bei meinen ehemaligen Kollegen der neurochirurgischen Klinik, Herrn Dr. med. Seong Wong Kim, Dr. med. Dirk Schulz sowie Frau Dr. med. vet. Nina Vogt bedanken, die immer ein offenes Ohr und konstruktive Hilfestellung boten.

Auch danke ich dem Institut für medizinische Informatik des Fachbereichs Medizin der Justus-Liebig-Universität Gießen für die statistische Betreuung.

In Bezug auf die zahlreichen Abbildungen gilt mein Dank insbesondere dem Georg Thieme Verlag KG und seinen zuvorkommenden Mitarbeitern sowie den Mitarbeitern des Elsevier Verlages. Im weiteren bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. Dr. Johannes T. Heverhagen dem derzeitigen Institutsdirektor und Chefarzt des Universitätsspital für diagnostische, interventionelle und pädiatrische Radiologie in Bern, dem Unternehmen IMAIOS, der Ulrich GmbH & Co. KG sowie dem Team der AOSpine International. Außerdem bedanke ich mich im speziellen ganz herzlich bei Herrn Dr. med. Ilhan Tastan aus der Abteilung der Neuroradiologie des Universitätsklinikums Gießen.

Abschließend bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. med. Michael Franz für seine wertvolle Hilfestellung, das offene Ohr sowie die Bestärkung und kontinuierliche Förderung meiner dialektischen Haltung.

**Der Lebenslauf wurde aus der elektronischen Fassung der
Dissertation entfernt**

**The curriculum vitae was removed from the electronical version of
the thesis**