

Notfall Rettungsmed 2013 · 16:291–304
 DOI 10.1007/s10049-013-1716-8
 Online publiziert: 25. Mai 2013
 © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013

S.W. Hauschild¹ · G. Nöldge-Schomburg¹ · J. Hoitz²

¹ Klinik und Poliklinik für Anästhesiologie und operative Intensivtherapie,
 Universitätsmedizin Rostock, Rostock

² Bundeswehrkrankenhaus Hamburg

Blutstillung mittels Tourniquet in der präklinischen Notfallmedizin

Der folgende Beitrag hat das Ziel, die Auswirkungen der Tourniquet-Anwendung auf den Organismus sowie deren Einfluss auf Mortalität und Morbidität anhand der aktuellen Literatur kritisch zu beleuchten. Ferner sollen moderne industriell gefertigte Tourniquets vorgestellt und ein Protokoll für die sichere Anwendung im deutschen Rettungsdienst angeboten werden.

Kasuistik

Der Rettungshubschrauber Christoph 29 wurde am 30.06.2012 um 13.10 Uhr zu einem Verkehrsunfall im Hamburger Stadtgebiet alarmiert. Das Meldebild der Rettungsleitstelle Hamburg lautete: „PKW über Frau gefahren, Patientin unter PKW“. Notarzt und Rettungsassistent des Hubschraubers trafen noch vor dem RTW um 13.20 Uhr an der Einsatzstelle ein. Bezüglich des Unfallhergangs berichteten die Einsatzkräfte, dass ein Autofahrer Vorwärts- und Rückwärtsgang verwechselt hatte, die Frau rückwärts angefahren, zwischen Pkw und einem Mauersockel eingekquetscht und nach Nachgeben des Mauersockels rechtsseitig überrollt hatte.

Beim ersten Blick auf die 46-jährige Patientin fiel sofort eine riesige Blutlache auf, ferner ein deformiertes und fehlgestelltes rechtes Bein. Durch einen Feuerwehrmann erfolgte die Anlage eines peripheren Venenwegs (18 G), während ein Ersthelfer ein von ihm unmittelbar nach dem Überrollvorgang angelegtes improvisiertes Tourniquet (Besenstiel und T-Shirt) mit der Hand fixierte (Abb. 1).

Eine schwere aktive Blutung war grob orientierend nicht mehr festzustellen. Die kaltschweißige Patientin war bei einem GCS von 11 nur noch bedingt ansprechbar und wies ein anämisches Hautkolorit auf. Ein Radialispuls war nicht palpabel, die pulsoxymetrisch bestimmte Sauerstoffsättigung betrug bei auskultatorisch vesikulärem Atemgeräusch beidseits unter Sauerstoffsufflation mit 6 l/O₂ 98%. Die EKG-Ableitung zeigte eine Sinustachykardie mit einer Frequenz von 125/min. Nach Anlage eines weiteren iv.-Zugangs (14 G) erhielt die Patientin intravenös insgesamt 50 mg S-Ketamin sowie 2 mg Midazolam. Ferner wurden 250 ml HyperHAES und 500 ml HAES 6% unter Druck infundiert.

Die erste körperliche Untersuchung nach Aufschneiden des rechten Hosenbeins zeigte eine mit kleinen Ästen und Blättern verschmutzte schwerste Weichteilverletzung, die von der Wade bis zum Gesäß reichte. Die Wadenmuskulatur war zerrissen, die Gefäße im dorsalen Kniebereich verletzt und die anteilig zerstörte Oberschenkelmuskulatur lag dorsal vollständig frei (Abb. 2). Das Bein war instabil und zeigte sichere Frakturzeichen im Bereich des rechten Kniegelenks, des distalen Femurs sowie des proximalen Unterschenkels rechts. Weitere Verletzungen wurden primär nicht festgestellt. Die Patientin wurde mittels Schaufeltrage auf eine Vakuummatratze umgelagert und in den RTW verbracht.

Nach Entkleidung der Patientin wurde im Rahmen der zweiten körperlichen Untersuchung zusätzlich zu den bisher diagnostizierten Verletzungen der Verdacht auf eine instabile Beckenfraktur ge-

stellt und eine Beckenschlinge (SAM Sling, SAM Medical Products) angelegt. Ferner fiel eine Sickerblutung im Bereich der gesamten Wunde auf, woraufhin das improvisierte Tourniquet durch ein industriell gefertigtes Tourniquet (C-A-T, North American Rescue) um 13.39 Uhr ersetzt wurde. Die großen Wundtaschen des Beins wurden mit H&H-Mullgaze austampontiert und die Kniekehle mit einem Quick-Clot Trauma Pad versorgt. Danach erfolgte ein zirkulärer Verband mit mehreren elastischen Emergency-Bandages. Aufgrund des anzunehmenden kritischen Sauerstoffangebots bei persistierend schwerem hämorrhagischem Schock wurde die Indikation zur Intubation und kontrollierten Beatmung gestellt. Im weiteren Verlauf wurde eine intermittierende Gabe von Noradrenalin-Boli notwendig, um akzeptable Perfusionsdrücke im Sinne einer permissiven Hypotension bei Verdacht auf eine instabile Beckenfraktur zu erreichen. Während des Transports wurden weitere 700 ml Kristalloid infundiert. Unter passivem Wärmeerhalt und nach entsprechender Voranmeldung wurde die Patientin bodengebunden in das nächstgelegene überregionale Traumazentrum transportiert, welches um 14.07 Uhr erreicht wurde.

Bei Übergabe der weiterhin hämodynamisch kompromittierten Patientin (RR ~70/40 mmHg, HF 110/min, S_aO₂ 100%, Temperatur tympanal 36,4°C) konnte kein Durchbluten der Verbände festgestellt werden. Die Verletzungen wurden dem Schockraumteam anhand von digitalen Fotos demonstriert. Die initiale BGA zeigte eine metabolische Azidose sowie einen Hb-relevanten Blutver-



Abb. 1 ◀ Medizinische Versorgung der verletzten 46-jährigen Patientin

lust: pO_2 431 mmHg, pCO_2 34 mmHg, pH-Wert 7,19, BE $-14,3$ mmol/l, HCO_3 13 mmol/l, Lactat 6,3 mmol/l, Hb 6,3 g/dl, Na 140 mmol/l, Kalium 4,6 mmol/l, Calcium 1,08 mmol/l. Um adäquate Perfusionsdrücke zu erreichen, wurde unter Transfusion von Erythrozytenkonzentraten eine kontinuierliche Noradrenalintherapie notwendig. Nach Abschluss der Schockraumdiagnostik erfolgte die umgehende operative Versorgung der Verletzungen. Das Tourniquet sowie die Verbände wurden im Schockraum nicht geöffnet und bis zur operativen Versorgung in OP belassen.

Tourniquets

Die Hämorrhagie stellt eine der häufigsten Todesursachen bei schwerem Trauma dar. Laut der Deutschen Gesellschaft für Unfallchirurgie (DGU) ist hierfür in 95,2% der Fälle ein stumpfes Trauma und in 4,8% ein penetrierendes Trauma verantwortlich. Die Inzidenz schwerer Extremitätenverletzungen wird mit 32,7% angegeben. Patienten mit manifestem Schock werden in 15,3% der Fälle am Unfallort an-

getroffen [26]. Bisher wurde dem präklinischen Management von lebensbedrohlichen kontrollierbaren Blutungen in der Notfallmedizin nur wenig Beachtung geschenkt und häufig auf eine kausale Therapie zu Gunsten des möglichst raschen Transports in die geeignete Zielklinik verzichtet. Obwohl der Einsatz von Tourniquets (franz.: Drehkreuz) zur Blutstillung mittlerweile auch in deutschen bzw. europäischen Leitlinien empfohlen wird [49, 56], hat sich diese effektive Maßnahme im Gegensatz zur rettungsdienstlichen Versorgung in den USA [71] im deutschen Rettungsdienst noch nicht durchgesetzt und wird nach wie vor kontrovers diskutiert bzw. nicht empfohlen [23].

Ein Grund für die konsequente Vernachlässigung dieser Thematik in Deutschland könnte die geringe Inzidenz an traumatologischen Notfällen sein. Ferner haben im letzten Jahrhundert schlecht konstruierte Tourniquets, Anwenderfehler, eine noch recht junge Gefäßchirurgie sowie eine häufig unzureichende Antibiotikatherapie zu schlechten Outcomes der mit Tourniquets versorgten Patienten geführt und dieses Device dadurch in Verruf ge-

bracht. Interessanterweise wird das Tourniquet innerklinisch seit vielen Jahrzehnten im Rahmen von chirurgischen und orthopädischen Operationen täglich standardisiert eingesetzt.

» Ein Tourniquet kann die einzig probate Methode zur Blutstillung sein

Die Kasuistik zeigt, dass im deutschen Rettungsdienst jederzeit mit lebensbedrohlichen Extremitätenblutungen, auch durch stumpfes Trauma bedingt, gerechnet werden muss und die Verwendung eines Tourniquets die einzig probate Methode zur Blutstillung sein kann. Das Tourniquet hat in dem beschriebenen Fall der Patientin unstrittig das Leben gerettet, da andere Maßnahmen bei diesem massiven Extremitätentrauma insuffizient gewesen wären. Typische Szenarien mit kriegsähnlichen Verletzungsmustern und Tourniquet-Indikation wären unter anderem bei terroristischen Sprengstoffanschlägen, Messerstich- und Schussverletzungen sowie bei Unfällen mit Maschinen zu erwarten.

Geschichte

Die Geschichte des Tourniquets reicht weit in die Antike zurück. Zur damaligen Zeit wurde das Tourniquet allerdings noch nicht zur Blutstillung, sondern zur venösen Abbindung bei Schlangenbissen (326 v. Chr.) eingesetzt. Jahrhunderte später muss das Tourniquet bereits zur Blutstillung Verwendung gefunden haben, da der griechische Arzt Galen (129–201 n. Chr.) dessen Anwendung aufgrund einer möglichen Blutungsverstärkung bei inadäquater Anlage in der Kritik stand. In den darauf folgenden Jahrhunderten wurde es sehr still um das Tourniquet, bis der deutsche Arzt Hans von Gersdorff 1517 in seinem „Feldbuch der Wundarznei“ über den Tourniquet-Einsatz bei Amputationen berichtete. Die technische Weiterentwicklung im Sinne des heutigen mechanischen Tourniquets erfolgte durch E.J. Morrel (1674) und den Namensgeber des Tourniquets J.L. Petit (1718). Johann Friedrich August von Eschmarch (1823–1908) entwickelte ein Tourniquet-Modell zur Blutstil-

lung in Form einer Gummi-Bandage, welche in ähnlicher Form später in den Kriegen 1869/70 an die Soldaten ausgegeben wurde.

Das erste pneumatische Tourniquet wurde 1904 durch Abwandlung einer Riva-Rocci-Blutdruckmanschette von dem amerikanischen Chirurgen Harvey Cushing entwickelt. Trotz dieser Weiterentwicklung wurden Tourniquets nur zurückhaltend während des Ersten Weltkriegs angewandt. Trotz einer weiten Verbreitung ebte auch während des Zweiten Weltkriegs die Kritik am Tourniquet nicht ab: So sprach der britische Chirurg Reginald Watson-Jones von einer „gefährlichen Waffe“, die Amerikaner Wolff und Adkins berichteten über die Ineffektivität des US-Army-Tourniquets auf dem italienischen Kriegsschauplatz [1].

Während dem Tourniquet auch in den folgenden Kriegen in Korea und Vietnam unzureichend Beachtung geschenkt wurde, brachte eine Studie aus dem Jahr 1984 den Durchbruch für die Weiterentwicklung der taktischen Verwundetenversorgung und damit auch für das Tourniquet. Bellamy untersuchte in seiner Studie die vermeidbaren Todesursachen auf dem Gefechtsfeld in Vietnam und kam zu dem Ergebnis, dass das Verbluten aus Extremitätenwunden mit 9% die vermeidbare Todesursache Nummer eins darstellte [15] und das von 277 obduzierten Gefallenen mit komprimierbaren Extremitätenblutungen 105 (38%) durch blutstillende Maßnahmen (z. B. Tourniquets) hätten gerettet werden können [46]. Vermutlich führten auch diese Ergebnisse dazu, dass die Israelische Armee 1987 Tourniquets für die taktische Verwundetenversorgung einführte [13]. Der US-Einsatz in Somalia führte zu der Bildung einer Arbeitsgruppe um den Ophthalmologen und ehemaligen Navy SEAL Frank Buttler, welche sich zum Ziel setzte, die taktische Verwundetenversorgung (TCCC – Tactical Combat Casualty Care) zu verbessern. In diesem Rahmen wurden 2004 für den Militäreinsatz im Irak (OIF – Operation Iraqi Freedom) alle auf dem Markt befindlichen Tourniquets getestet und aufgrund der Ergebnisse das Combat Application Tourniquet (C.A.T., North American Rescue) als Standard-Feld-Tourniquet für die US-Streitkräfte benannt [2, 53, 54]. Ab 2006

Notfall Rettungsmed 2013 · 16:291–304 DOI 10.1007/s10049-013-1716-8
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013

S.W. Hauschild · G. Nöldge-Schomburg · J. Hoitz
Blutstillung mittels Tourniquet in der präklinischen Notfallmedizin

Zusammenfassung

Hintergrund. Bisher galt der Einsatz von Tourniquets aufgrund der häufig beobachteten Nebenwirkungen und Komplikationen als obsolet und wurde, wenn überhaupt, nur als Ultima ratio bei lebensbedrohlichen Extremitätenblutungen nach dem Motto „life before limb“ eingesetzt. Gründe für die Nebenwirkungen und Komplikationen waren v. a. Anwendungsfehler sowie der Einsatz schlecht konstruierter Produkte.

Aktuelle Situation. Der Verlust einer Extremität aufgrund eines Tourniquet-Einsatzes stellt eine Rarität dar. Mittlerweile werfen die positiven Erfahrungen des Militärs bei den Konflikten im Irak und in Afghanistan ein neues Licht auf diese Form der Blutstillung. Bei einem protokollbasierten rationalen Einsatz bewährter und getesteter Tourniquets durch trainierte Anwender kann die Verwendung von Tourniquets bei einer Anlagedauer von bis zu 2 h als eine sichere, schnelle und v. a. lebensrettende Maßnahme eingestuft werden. Dies wird durch die aktuelle Datengrundlage belegt.

Schlussfolgerungen. Zukünftig sollten deshalb im zivilen Rettungsdienst industriell ge-

fertigte Tourniquets vorgehalten und SOP-basiert eingesetzt werden. Die wichtigste Maßnahme, um mögliche Komplikationen abzuwenden, ist die Schulung des medizinischen Personals in der korrekten Anwendung sowie die Durchführung eines regelmäßigen Trainings. Für Spezialeinheiten der Behörden (SEK/MEK, GSG9, etc.) ist es sinnvoll, in taktischer Einsatzmedizin ausgebildetes Personal innerhalb der Einheiten einzusetzen, welches in einer „Care-under-Fire-Situation“ eine massive Extremitätenblutung mittels Tourniquet kontrollieren kann, noch bevor der Patient an den Rettungsdienst übergeben und durch diesen weiterbehandelt wird. Speziell für die taktische Verwundetenversorgung wurden in Deutschland bereits Richtlinien durch die TREMA e. V. (Tactical Rescue & Emergency Medicine Association) ausgearbeitet.

Schlüsselwörter

Hämorrhagischer Schock · Hämostyptika · Polytrauma · Taktische Verwundetenversorgung · Tactical Combat Casualty Care

Hemostasis with a tourniquet in preclinical emergency medicine

Abstract

Background. Until recently the use of tourniquets was considered to be obsolete due to the known side effects and complications. Tourniquet application was seen as a last resort to stop life-threatening extremity bleeding by placing “life before limb”. In the past the main reasons for complications were application errors and the use of poorly designed products.

Present situation. The actual loss of a limb due to tourniquet use is a rarity and now the positive experiences of the military conflicts in Iraq and Afghanistan are throwing a new light on this method to “stop the bleeding”. The SOP-based application of modern trusted and tested tourniquets by trained users for a period up to 2 h is considered to be a fast, safe and life-saving procedure.

Conclusions. This evidence is reflected by the current data; therefore, the civilian emer-

gency services should be provided with commercially manufactured tourniquets. To prevent potential complications it is important that civilian medical personnel are regularly trained in the correct SOP-based use of tourniquets. Special police units should have personnel trained in tactical combat casualty care in the units who can control massive limb bleeding in a “care under fire” situation by tourniquet use before the civilian emergency medical services take over casualty care. In Germany the Tactical Rescue and Emergency Medicine Association (TREMA) has developed specific guidelines for tactical casualty care.

Keywords

Hemorrhagic shock · Hemostyptic · Multiple trauma · Tactical casualty care · Tactical combat casualty care

sollte jeder Soldat ein C-A-T als Teil der persönlichen Sanitätsausrüstung erhalten und in dessen Anwendung geschult werden. Dieses Prinzip hat sich bis zum heutigen Tag bewährt und wurde ebenfalls von

der Bundeswehr ab 2008 für Auslandseinsätze übernommen.

Seitdem sind zahlreiche internationale Studien und Erfahrungsberichte aus dem Irak und Afghanistan publiziert worden,



Abb. 2 ◀ Schwerste Extremitätenverletzung der Patientin

deren Ergebnisse unter anderem die evidenzbasierte präklinische Tourniquet-Anwendung untermauern und damit die Anwendung im modernen zivilen Rettungsdienst nahelegen.

Indikationen

Der Behandlung der Hämorrhagie kommt in der Präklinik eine herausragende Bedeutung zu, da mit vergleichsweise einfachen Maßnahmen das Outcome der Patienten maßgeblich verbessert werden kann. Hierbei liegt der Schwerpunkt in der schnellstmöglichen Blutstillung. Während sich im zivilen Umfeld der ABCDE-Algorithmus gemäß ATLS® bei der Versorgung von Traumapatienten durchgesetzt hat, arbeitet das Militär bereits seit Jahren nach dem <C>ABCDE-Algorithmus [76]. Das vorgeschobene <C> steht für die Identifizierung und Behandlung von komprimierbaren lebensbedrohlichen Blutungen („catastrophic haemorrhage“). Im Gegensatz zum zivilen ABCDE-Schema wird der modifizierte militärische Algorithmus der Forderung nach einem schnellstmöglichen „stopp the bleeding“ gerecht und sollte deshalb zukünftig auch in der zivilen Notfallmedizin Verwendung finden, zumal auch

die S3-Leitlinie „Polytrauma-/Schwerverletzten-Behandlung“ im Fall einer lebensbedrohlichen Blutung nach außen das Verlassen des ansonsten üblichen ABCDE-Schemas empfiehlt [56].

» Bisweilen ist ein sofortiger Tourniquet-Einsatz indiziert

Grundsätzlich sollte am Einsatzort stets versucht werden, die Blutstillung durch manuelle Kompression und Anlage eines Druckverbands unter Hochlagerung der Extremität zu erreichen. Sollte dies nicht gelingen, kann die Anlage eines Tourniquets erfolgen [50]. Allerdings gibt es Situationen, in denen ein sofortiger Tourniquet-Einsatz indiziert ist. Anhand der aktuellen Datenlage [7, 49, 55, 56] können folgende Indikationen genannt werden (▶ Tab. 1).

Wirkungsweise

Bei korrekter Anwendung komprimieren Tourniquets die Lumina der arteriellen und venösen Gefäße der entsprechenden Extremität durch zirkuläre Kompression von Haut, Fettgewebe und Muskula-

tur gegen den innen liegenden Knochen. Hierdurch sistiert der Blutfluss distal der Abbindung. Der Abbindedruck, der durch das Tourniquet aufgebracht werden muss, um die Arterie vollständig zu komprimieren, hängt von der Größe der Arterie, vom systolischen Blutdruck, vom Umfang der Extremität und von der Breite des Tourniquets ab [28].

Mögliche Komplikationen durch Tourniquet-Applikation und deren Pathophysiologie

Der Einsatz von Tourniquets birgt grundsätzlich Risiken (▶ Tab. 2). Diese variieren von unbedeutend und geringfügig bis hin zu kritisch und verhängnisvoll. Die Inzidenz der Komplikationen ist abhängig von der Beschaffenheit des Tourniquets (schmal vs. breit), der Abbindezeit, der Korrektheit der Anwendung sowie dem Vorhandensein von vaskulären Vorerkrankungen.

Schmerzen

Die Anwendung von Tourniquets ist für den Notfallpatienten schmerzhaft. Die Ausprägung des Schmerzes ist dabei abhängig vom Abbindedruck [31] und von der Tourniquet-Breite [2]. Je geringer der Druck und je breiter das Tourniquet, desto geringer ist die Schmerzausprägung. Worland et al. konnten in ihrer Arbeit zeigen, dass auch noch Tage bis Wochen nach Tourniquet-Anlage Schmerzen vorhanden sein können [31]. In einer Untersuchung an freiwilligen Probanden wurde ein Tourniquet am Oberarm mit einem Abbindedruck von 100 mmHg über dem systolischen Blutdruck ohne Gabe von Schmerzmitteln durchschnittlich nur 18 min, am Unterarm 25 min toleriert [19]. Orban et al. stellten fest, dass die orale Gabe von Acetylcystein vor Tourniquet-Anlage den postinterventionellen Analgetikabedarf senken kann [32]. Insofern können Tourniquets ohne adäquate Analgesie nicht uneingeschränkt eingesetzt werden, da die massiven Schmerzen zu einer inadäquaten Abbindung bzw. zu einer Abnahme des Tourniquets führen können [14]. Dementsprechend sollte stets eine adäquate Analgesie bei Tourniquet-Anlage erfolgen.

Tab. 1 Indikationen für die präklinische Tourniquet-Anwendung			
Indikationen für die präklinische Tourniquet-Anwendung	S3-Leitlinie Polytrauma [56]	European Guidelines for Management of bleeding following major trauma [49]	TCCC-Guidelines [55]
Amputationsverletzung (großer Gliedmaßen)		1C	X
Lebensgefährliche Extremitätenblutung	GoR 0	1C	
Unmöglichkeit der Blutstillung durch andere Maßnahmen (z. B. Druckverband)	GoR 0		
Unerreichbarkeit der Blutungsquelle (eingeklemmte Person)	GoR 0		
Multiple Blutungsquellen bei gleichzeitigem A-, B- oder C-Problem	GoR 0		
Mehrere Verletzte mit Extremitätenblutungen (MANV – Massenansturm von Verletzten)	GoR 0		
Taktische Verwundetenversorgung („Care under fire“) bzw. bei Eigengefährdung			X
GoR Grade of Recommendation, TCCC Tactical Combat Casualty Care.			

Tab. 2 Mögliche Komplikationen nach Tourniquet-Anwendung. (Nach [7])	
Lokal	Systemisch
<ul style="list-style-type: none"> – Schmerzen – Hautschädigung – Nervenschädigung – Gefäßschädigung – Muskelschädigung – Kompartmentsyndrom – Thrombembolien – Postischämischer Reperfusionsschaden 	<ul style="list-style-type: none"> – SIRS im Rahmen des postischämischen Reperfusionsschadens – Rhabdomyolyse mit metabolische Azidose und Hyperkaliämie – Fibrinolyse
SIRS Systemic-Inflammatory-Response-Syndrom.	

Hautschaden

Direkt unter dem Tourniquet können durch die mechanische Wirkung bedingt Hautdefekte wie Quetschungen, Blasen und Abrasionen entstehen. Sogar Drucknekrosen sind beschrieben. Das Ausmaß ist v. a. von der Beschaffenheit des Produkts und dem Abbindezeitpunkt abhängig.

Nervenschädigung

Auch Nervenschädigungen, die vermutlich eher durch den Druck als durch eine Ischämie bedingt sind, werden beschrieben. Horlocker et al. [25] stellten in ihrer Studie fest, dass bei Tourniquet-Anlagen am Oberschenkel mit Abbindezeiten über 2 h im Rahmen von Knie-TEP-Implantationen bei 7,7% der Patienten neurologische Ausfälle in Form von meist reversiblen Parästhesien, Sensibilitätsstörungen und motorischer Kraftminderung auftraten. Dabei korrelierten die neurologischen Ausfälle mit der totalen Tourniquet-Zeit, wobei

vorbestehende neuropathische Erkrankungen die Beschwerden zu verstärken schienen [25]. Lakstein et al. [13] gaben die Inzidenz von neurologischen Komplikationen nach präklinischem Tourniquet-Einsatz mit 5,5% an. Der Schaden im Sinne einer Demyelinisierung scheint allerdings auf den direkt unter dem Tourniquet liegenden Nervenanteil beschränkt zu sein [60].

Der Symptomenkomplex, der durch Nerven-, Muskel und Gefäßschädigung entsteht, wird als Tourniquet-Syndrom bezeichnet [21, 58].

Muskelschaden

Durch den Druck der Abbindung entsteht grundsätzlich eine Muskelschädigung direkt unter der Tourniquet-Auflagefläche. Das Ausmaß ist abhängig von der Abbindezeit sowie vom Abbindezeitpunkt. Pedowitz et al. wiesen nach, dass v. a. bei Abbindungen von mehr als 2 h und Abbindezeiten von mehr als 200 mmHg fokale und regionale Muskelfasernekrosen und -degenerationen

beobachtet werden können [29, 30]. Heppenstall et al. untersuchten die Auswirkungen in Bezug auf pathophysiologische Effekte auf die Muskulatur distal einer Tourniquet-Anwendung am Oberschenkel beim Hund. Er konnte zeigen, dass es ab einer Ischämiezeit von 1 h zu einer progressiven Hypoxie, Hyperkapnie und Azidose in der Muskulatur kommt, welche in Abhängigkeit von der Abbindezeit zunehmend längere Erholungszeit nach Öffnung des Tourniquets benötigt. Ab einer Tourniquet-Zeit von 2 h konnten zudem erhöhte Creatinkinase- und Serumlactatwerte nach der Öffnung des Tourniquets festgestellt werden [43]. Auch Rhabdomyolysen wurden beschrieben [68]. Ferner zeigten sich in der histologischen Untersuchung eine Muskelfaserdegeneration mit begleitendem Ödem aufgrund einer vermehrten kapillären Permeabilität sowie eine Infiltration der Muskulatur durch Entzündungszellen. Walters et al. [21, 57] stellten diesbezüglich fest, dass der Reperfusionsschaden in der Muskulatur abhängig von der Ischämiezeit und dem Typ der Muskelfasern ist.

Kompartmentsyndrom

Nach Entfernen des Tourniquets kommt es bedingt durch den postischämischen Reperfusionsschaden zur Hyperämie und zum Anschwellen der betroffenen Extremität mit einer Umfangsvermehrung bis zu 50%, welche mehrere Wochen anhalten kann [59]. Das Auftreten eines Kompartmentsyndroms wurde nach langen Tourniquet-Zeiten von mehr als 3 h und/oder hohen Abbindezeiten beschrieben [17, 58]. Die Inzidenz scheint auch vom erlittenen Ausmaß des Traumas abzuhängen.

Grundsätzlich kann durch die Ischämie der Extremität ein irreversibler Schaden entstehen, welcher eine Amputation erforderlich macht. Diese Komplikation ist allerdings erst bei Tourniquet-Zeiten von mehr als 6 h zu erwarten [59].

Thrombembolien

Schwere Lungenembolien nach Öffnung des Tourniquets sind beschrieben [69]. Ob dies durch die Anlage eines Tourniquets an sich oder aber durch das Trauma bzw. die Operation an den Extremitäten ausgelöst wird, bleibt unklar. Hirota et al. zeig-

Tab. 3 Anlageorte bei präklinischer Tourniquet-Applikation

Anlageorte bei präklinischer Tourniquet-Applikation

- Tourniquet-Anlage stets so distal wie möglich, proximal der stark blutenden Verletzung
- Das Verletzungsmuster bestimmt den Abstand zwischen Tourniquet und Wunde (Mindestabstand 5 cm)
- Keine Tourniquet-Anlage über Gelenken
- Keine Tourniquet-Anlage über Wundtaschen und/oder Fremdkörpern
- Bei Dunkelheit, MANV, Care under Fire und offenen Frakturen äußerst proximale Anlage
<i>MANV</i> Massenansturm von Verletzten.

ten diesbezüglich eine Korrelation zwischen der Tourniquet-Zeit und der Anzahl der pulmonalen Embolien, welche im Mittel 40–50 s nach Tourniquet-Öffnung mittels transösophagealer Echokardiographie im rechten Vorhof nachgewiesen werden konnten [39]. Allerdings handelte es sich um kleinste Embolien, welche keinerlei klinische Relevanz hatten. Möglicherweise liegt der Grund hierfür in einer vermehrten thrombolytischen Aktivität nach Tourniquet-Öffnung mit vermehrter Freisetzung von tPa, ATIII und Protein C [59]. Jarrett et al. [38] fanden bei orthopädischen Eingriffen unter Tourniquet-Einsatz am Oberschenkel eine nicht signifikant erhöhte Inzidenz der Lungenembolie von 13%. Angus et al. [40] konnten keinerlei Zusammenhang zwischen der Tourniquet-Anlage und dem Auftreten von tiefen Beinvenenthrombosen feststellen.

Venöse Stauung

Bei unzureichendem Abbindedruck kann die bestehende Blutung verstärkt werden. Verursacht wird diese Komplikation durch die kompressionsbedingte venöse Stauung bei nicht vorhandener Okklusion der arteriellen Gefäße. Die bereits bestehende arterielle Blutung bleibt somit bestehen und wird durch eine vermehrte venöse Blutung aggraviert, was mit einer Mortalitätssteigerung einhergeht [9].

Veränderungen im Säure-Basen-Haushalt

Die Öffnung eines Tourniquets kann mit einer passageren entidalen CO₂-Erhöhung von bis zu 18 mmHg (2,4 kPa) einhergehen, welche sich innerhalb von 10–13 min wieder normalisiert. Die CO₂-Erhöhung ist bei Abbindungen an der unteren Extremität stärker ausgeprägt. Bedingt ist dieses Phänomen durch das An-

fluten von CO₂-reichem venösem Blut aus den Ischämiebezirken sowie einem Anstieg des HZV nach Lösen des Tourniquets. Typischerweise reagieren spontan atmende Patienten mit einer Steigerung des Atemminutenvolumens. Ferner kann der Sauerstoffverbrauch um bis zu 80% ansteigen. Ebenso kann ein Anstieg des Serumlactats und -kaliums beobachtet werden. Durch all diese Veränderungen kann der pH-Wert innerhalb von 4 min absinken. Eine Normalisierung erfolgt innerhalb von 10–30 min [58].

Reperfusionssyndrom

Auch systemische Nebenwirkungen sind bekannt. Durch die abbindungsbedingte lokale Ischämie kommt es im Rahmen der Reperfusion der betroffenen Extremität zu dem sog. postischämischen Reperfusionsschaden mit Hyperämie, Zellschwellung und Muskelfarzierung. Als Hauptmechanismen werden in der Literatur eine verminderte mitochondriale Aktivität sowie eine erhöhte Superoxidproduktion angeführt [66]. Die reaktiven Sauerstoffintermediate (ROI) überfordern hierbei die Entgiftungskapazität der Zellen durch körpereigene Enzyme (Superoxid-dismutasen, Glutathionperoxidase, Katalase) und nichtenzymatische Radikalfänger (Ascorbinsäure, Glutathion, Harnsäure, Melatonin) [61]. Durch Lipidperoxidation bewirken die Radikale eine Veränderung der Zellmembran, welche von einer Schädigung mit erhöhter Permeabilität bis hin zu einer Lyse der Zelle führen kann. Bereits innerhalb von 15 min nach Abnahme des Tourniquets kommt es bedingt durch eine Freisetzung von Zytokinen (TNF- α , IL1 β , IL-10) zudem zu einem Systemic-Inflammatory-Response-Syndrom (SIRS; [36]). Je nach Ausprägung des SIRS kann es zu weiteren Organdysfunktionen im Sinne eines MODS kom-

men. Alle toxischen Ereignisse für die Zelle während einer Ischämie- und anschließenden Reoxygenierungsphase werden unter dem Begriff „postischämischer Reperfusionsschaden“ subsummiert.

Sichere Anwendung in der Praxis

Die Anwendung eines Tourniquets weist ebenso wie alle anderen medizinischen Therapieformen spezifische Nebenwirkungen auf. Die positiven Erfahrungen mit dieser Methode der Blutstillung auf den Kriegsschauplätzen der letzten Jahre sollen nicht darüber hinwegtäuschen, dass ein undifferenzierter vorschneller Einsatz mit schweren Komplikationen behaftet sein kann. Die sichere Anwendung im Rettungsdienst sollte daher protokollbasiert durch darin ausgebildete Rettungssistenten und Notärzte erfolgen.

Anlageorte

Entgegen der immer wiederkehrenden Behauptung, eine suffiziente Blutstillung mittels Tourniquet am Unterarm und Unterschenkel wäre aufgrund der Anatomie (Gefäße verlaufen zwischen zwei Knochen) nicht möglich, beweist die aktuelle Datenlage das Gegenteil: Swan et al. [50] konnten zeigen, dass durch eine Tourniquet-Anlage am proximalen Unterschenkel bzw. Unterarm eine suffiziente Okklusion der arteriellen Gefäße (A. radialis bzw. A. poplitea) erzielt werden kann. King et al. [52] untersuchten 5 verschiedene Tourniquet-Systeme ausschließlich am Unterschenkel und wiesen nach, dass in Abhängigkeit vom verwendeten Tourniquet-System in bis zu 100% eine arterielle Okklusion der Aa. tibialis anterior et posterior erreicht werden kann. Die Erfahrungen aus Militäreinsätzen bestätigen die o. g. Ergebnisse und somit die suffiziente Wirkung von Tourniquets am Unterschenkel [3, 8, 9]. Die Anlage am Unterschenkel sollte jedoch nicht in Höhe des Fibulaköpfchens erfolgen, sondern in Wadenmitte, um eine Schädigung des N. peroneus zu vermeiden.

Odinsson u. Finsen untersuchten die Unterschiede zwischen der Abbindung am Unter- und Oberarm. Sie stellten fest, dass auch die Anlage des Tourniquets am Unterarm in 100% ein blutleeres OP-Feld bewirken konnte [71].

Einige Autoren empfehlen die Anlage des Tourniquets grundsätzlich ca. 5–8 cm proximal der Verletzung, um möglichst wenig unverletztes Gewebe temporär von der arteriellen Perfusion auszuschließen und somit das Risiko einer ischämiebedingten Komplikation zu reduzieren [14, 50, 55, 56]. Allerdings findet sich in der aktuellen Literatur keine Grundlage für diese spezielle Empfehlung. Vielmehr birgt dieser unflexible Abstand einige Gefahren: In unübersichtlichen Lagen (MANV, Dunkelheit, taktische Verwundetenversorgung) ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass Verletzungen übersehen werden und somit bei einer zu weit distal gelegenen Abbindung keine effektive Blutstillung erreicht wird. Bei stark blutenden offenen Frakturen der Röhrenknochen bestünde die Gefahr, dass die den Knochen versorgenden Arterien (Aa. nutriciae) weiterhin perfundiert werden und damit ebenfalls kein Blutungsstopp erzielt wird. Im Falle eines in einer Wundtasche liegenden scharfkantigen Fremdkörpers würde eine Abbindung 5 cm proximal der Wunde mit einer erheblichen Gefahr einer zusätzlichen Tourniquet-bedingten Gewebeschädigung einhergehen. Insofern halten die Autoren es nicht für sinnvoll, einen fixen Abstand zwischen Tourniquet und Wunde zu empfehlen. Natürlich ist es sinnvoll, die Tourniquet-Anlage so distal wie möglich mit einem Mindestabstand von ca. 5 cm vorzunehmen, allerdings sollte der genaue Abstand in Abhängigkeit von Verletzungsmuster und Einsatzsituation festgelegt werden.

» Gelenke und der distale Oberschenkel stellen Problemzonen für eine effektive Tourniquet-Anlage dar

Gelenke sowie der distale Oberschenkel stellen Problemzonen für eine effektive Tourniquet-Anlage dar. In diesen Regionen werden die Arterien durch die umgebenden anatomischen Strukturen relativ gut vor Kompression geschützt [24]. Tourniquets sollten möglichst direkt auf der Haut angelegt werden, um ein Verutschen bzw. eine spontane Lockerung zu verhindern [50], auch wenn hierdurch Hautläsionen verursacht werden können.

In Zusammenschau der aktuellen Datenlage empfehlen die Autoren in Hinblick auf eine effektive Blutungskontrolle und mögliche Nebenwirkungen die in **Tab. 3** genannten Anlageorte für den SOP-basierten Tourniquet-Einsatz:

Tourniquet-Design

Um bei hoher Effektivität möglichst viele Nebenwirkungen der Tourniquet-Anwendung zu vermeiden, sollte ein Device eingesetzt werden, welches möglichst breit ist bzw. eine Mindestbreite von mehr als 3,8 cm aufweist [10, 28, 43]. Ideal erscheinen diesbezüglich pneumatische Tourniquets mit einer Breite von mehr als 12 cm, die ihren Druck gleichmäßig auf das darunter liegende Gewebe verteilen. Schmale Tourniquets sind v. a. an kräftigen Oberschenkeln häufig ineffektiv [20]. Allerdings kann es im Falle einer traumatischen Amputation mit sehr kurzen Stümpfen Probleme bei der Anlage breiter Tourniquets geben.

Das Tourniquet sollte aus weichem Stoff gefertigt sein und runde bzw. nicht scharfkantige Ecken aufweisen. Blutdruckmanschetten sind für eine Abbindung deshalb nicht zu empfehlen, da sie meistens zu kurz für Extremitäten mit großem Umfang sind und der Klett-Schließmechanismus dazu neigt, bei hohen Drücken aufzugehen.

Erfahrungen aus dem Einsatz in Afghanistan haben gezeigt, dass unter Exposition von Sonnenstrahlung, Hitze und Staub die Gefahr einer Materialermüdung besteht und dadurch die Tourniquets brechen oder ineffektiv sein können [4, 9]. Deshalb sollten Tourniquets stets geschützt mitgeführt werden oder aber regelmäßig ausgetauscht werden. Hierbei darf der schnelle Zugriff allerdings nicht eingeschränkt werden.

Weitere erwünschte Eigenschaften sind Robustheit, Wasserdichtigkeit, Rutschfestigkeit auf nasser Haut, Hitze- und Kältestabilität, geringes Gewicht und kleine Packmaße sowie sofortige Einsatzbereitschaft. Das Tourniquet sollte zudem einfach, schnell und sicher in der Anlage sein und vom Anwender akzeptiert werden.

Moderne industriell gefertigte Tourniquets für den präklinischen Einsatz

Mittlerweile sind in Deutschland mehrere Tourniquets erhältlich. Einen Überblick gibt **Abb. 3**:

Klinische Erfahrungen mit den unterschiedlichen Tourniquet-Modellen

Im Jahr 2004 führte das United States Army Institute of Research (USAISR) eine Studie bezüglich der Effektivität von Tourniquets durch [2]. An 8 Probanden wurden insgesamt 9 Tourniquets am Oberschenkel getestet. Die Effektivität wurde anhand einer dopplersonographischen Flussmessung an der A. poplitea bestimmt. Von den getesteten Devices waren lediglich 3 Tourniquets zu 100% effektiv: Das C-A-T, das SOFTT und das EMT. Der evaluierte Anlageschmerz war beim EMT aufgrund des pneumatischen Systems und der Manschettenbreite am geringsten, gefolgt vom C-A-T bei den mechanischen Tourniquets. Da das C-A-T bezüglich der Packmaße kleiner und leichter ist, wurde dieses System vom USAISR als Battlefield-Tourniquet empfohlen, das EMT für den Einsatz in höherwertigeren medizinischen Versorgungseinrichtungen.

Ähnliche Ergebnisse erbrachte eine Untersuchung im Combat Support Hospital in Bagdad im Jahr 2006 [9]: Die Effektivität des EMT betrug 92%, die des C-A-T 79% und die des SOFTT 66%. Im Vergleich hierzu waren improvisierte Tourniquets nur in 25% effektiv. Die Gründe für ein Tourniquet-Versagen waren inadäquates Tourniquetdesign (zu schmal), Materialversagen (Abbrechen des Knebels bei C-A-T, Leckage bei EMT) sowie inkorrekte Anwendungen (falscher Anlageort, venöse Stauung bei unzureichendem Zudrehen).

» Die Ergebnisse zeigen, dass nur industriell gefertigte und erprobte Tourniquets eingesetzt werden sollten.

Die Anwendung eines behelfsmäßig gebauten Tourniquets (z. B. aus Dreieckstuch und Besenstiel) ist aufgrund der Ge-

					
Name	C-A-T Combat Application Tourniquet	SOFTT-W Special Operation Forces Tactical Tourniquet	EMT Emergency & Military Tourniquet	E-MAT Emergency Tourniquet	NATO- Tourniquet
Wirk- mechanismus	mechanisch	mechanisch	pneumatisch	mechanisch	mechanisch
Herstellung/ Vertrieb	North American Rescue, USA	Tactical Medical Solutions, USA	Delfi Medical Innovations, USA	Pyng Medical, Kanada	Extreme Outfitters, USA
Breite	3.8cm	3.7cm	8.8cm	3.4-8.9cm	3,7cm
Packmaße LxBxH	16.5x6.1x3.8cm	17.4x5.1x8.4cm	12.7x6.9x6.4cm	16x20x6.5cm	14x5.1x3.8cm
Gewicht	59g	160g	220g	116g	101g
CE- Kennzeichnung	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein

Abb. 3 ▲ Übersicht über die Eigenschaften aktueller kommerzieller Tourniquets (nach Herstellerangaben)

fahr einer insuffizienten Funktion abzulehnen. Auf diese improvisierte Tourniquet-Form sollte nur im Sinne einer Ultima ratio zurückgegriffen werden.

Tourniquet-Drücke

Um einen möglichen Tourniquet-bedingten Weichteilschaden zu minimieren, sollten möglichst breite Tourniquets und ein möglichst geringer Abbindedruck eingesetzt werden [37]. Pedowitz et al. konnten zeigen, dass bei Abbindungen mit Drücken von über 200 mmHg mit einer Anlagedauer von über 2 h direkt unterhalb des Tourniquets Muskelnekrosen nachweisbar sind. Bei niedrigeren Tourniquet-Drücken war der Schaden geringer ausgeprägt bzw. nicht nachweisbar [30]. Eine weitere wichtige Variable ist der Umfang der Extremität: Je größer der Umfang ist, desto größer wird auch der notwendige Abbindedruck sein, um den arteriellen Blutfluss in der betroffenen Extremität zu stoppen [27]. Für eine suffiziente Okklusion der arteriellen Gefäße ist bei normgewichtigen Patienten normalerweise ein Gewebedruck von 70–100 mmHg über dem systolischen Blutdruck notwen-

dig [27]. Bei adipösen Patienten können deutliche höhere Drücke notwendig werden. Wie hoch der entsprechende Tourniquet-Druck sein muss, ist auch von der Breite des Tourniquets abhängig [28]: Je schmaler ein Tourniquet ist, desto höher muss der Abbindedruck sein und vice versa. Dementsprechend sind breite Tourniquets effektiver als schmale bei einer gleichzeitig verminderten Gefahr einer Druckschädigung des darunter liegenden Gewebes [37]. Ab Tourniquet-Breiten von ≥ 18 cm scheint der notwendige Kompressionsdruck unabhängig vom Extremitätenumfang zu sein [28]. Für eine suffiziente Abbindung sind Kompressionsdrücke über 350 mmHg nur in Ausnahmefällen notwendig [27].

Maximale Anlagedauer von Tourniquets

Die maximale zulässige Anlagedauer von Tourniquets wird nach wie vor kontrovers diskutiert. Aus Tierstudien weiß man, dass bereits Minuten nach erfolgter Abbindung Veränderungen bezüglich der Muskel- und Nervenphysiologie zu beobachten sind. Eine ischämische Schädigung

im eigentlichen Sinne, gemessen anhand der Lactatwerte und der Creatinkinase der Muskulatur, scheint allerdings erst ab einer Tourniquet-Zeit von 2 h einzutreten [41, 43]. Bei der Betrachtung der v. a. tierexperimentellen Studien ist die Erkenntnis wichtig, dass es speziesabhängige Unterschiede bezüglich der Ischämiezeiten gibt [50].

Die meisten chirurgischen Guidelines empfehlen für den elektiven operativen Einsatz von Tourniquets eine maximale Anlagedauer von 60–90 min. 120 min werden als absolute Maximaldauer angesehen [36]. Patienten im hohen Alter, mit vaskulären Erkrankungen oder schwerem Trauma der Extremität scheinen mit einem höheren Risiko für Komplikationen behaftet zu sein. Nervenverletzungen wurden in diesen Fällen schon nach 30 min beobachtet, Muskelschädigungen nach 60 min, eine manifeste Muskelnekrose allerdings erst nach 3 h [41].

Die aktuellen militärischen Erfahrungen zeigen, dass die präklinische Anlage von Tourniquets bei kurzen Tourniquet-Zeiten (bis 2 h), als sicher bezeichnet werden kann [3, 13]. Chambers et al. [42] stellten fest, dass bei 11 von 13 Patienten (85%),

bei denen aufgrund einer arteriellen Gefäßverletzung Tourniquets mit einer medianen Anlagedauer von 122 min (30 bis 276 min) angelegt worden waren, postoperativ keine ischämiebedingten Komplikationen auftraten.

Um bei längeren Tourniquet-Zeiten eine Muskelischämie abzuwenden, besteht grundsätzlich die Möglichkeit, dies durch eine kurzfristige Lösung der Abbindung und Reperfusion der Extremität zu erreichen. Bezüglich der Dauer der Reperfusionen konnten Graham et al. [37] in ihrer Untersuchung zeigen, dass diese mindestens 30 min betragen muss. Eine andere Studie zeigte, dass nach einer einstündigen Abbindung eine Reperfusionzeit von 10 min benötigt wird, um den Ausgangs-pO₂ in der Muskulatur zu erreichen. Bei einer zweistündigen Abbindung betrug die notwendige Reperfusionzeit 12–15 min. Da jedes einzelne Reperusionsintervall mit einem sehr hohen Blutungsrisiko einhergeht, kann diese Maßnahme nicht für die Praxis empfohlen werden.

» Die Anlagedauer eines Tourniquets sollte so kurz wie möglich gehalten werden

Grundsätzlich sollte die Anlagedauer eines Tourniquets so kurz wie möglich gehalten werden und die Abbindung durch eine andere weniger invasive blutstillende Maßnahme ersetzt werden. Diese Umwandlung der Blutstillungsmethode wird auch als Tourniquet-Konversion bezeichnet. Allerdings sollte diese Maßnahme nur bei hämodynamisch stabilen Patienten ab einer Transportzeit von mehr als 30 min erwogen werden. Einige Autoren empfehlen eine Konversion sogar erst bei Transportzeiten von mehr als 1 h [14, 56]. Hierbei müssen jedoch stets die Kontraindikationen berücksichtigt werden (▣ Abb. 5).

Dokumentation

Der Zeitpunkt der Anlage muss zwingend dokumentiert werden. Es empfiehlt sich, sowohl direkt auf oder neben dem Tourniquet den Zeitpunkt der Anlage zu dokumentieren, als auch mit einem Fettstift auf

der Stirn des Patienten. Auf diese Weise ist das Übersehen eines angelegten Tourniquets nahezu unmöglich.

Ferner sollte die Dokumentation auf dem Rettungsdienstprotokoll bzw. beim Militär auf der Verwundetenkarte erfolgen. Um zusätzlich das Risiko des Übersehens zu minimieren, sollte eine abgebundene Extremität nicht bedeckt werden.

Ausbildung, Training und protokollbasierte Anwendung

Obwohl die meisten aktuellen Tourniquets sehr einfach in der Anwendung sind, ist die Schulung des medizinischen Personals, unabhängig vom Ausbildungsstand, unabdingbar. Nach der Ersteinweisung sollte mindestens einmal jährlich ein erneutes Training erfolgen, welches sich mit allen Modalitäten der Tourniquet-Applikation auseinandersetzt: Indikationen, Kontraindikationen, möglichen Fehlern bei der Anwendung, Tourniquet-Konversion sowie alternativen Methoden der Blutstillung in Theorie und Praxis [7, 44]. Der Tourniquet-Einsatz sollte protokollbasiert erfolgen, um die Nebenwirkungen so gering wie möglich zu halten. Mögliche Algorithmen für die Tourniquet-Anlage und -Konversion sind in ▣ Abb. 4 und 5 dargestellt.

Erfahrungen aus militärischen Einsätzen

Das Verbluten aus Extremitätenwunden stellt nach wie vor mit 9–10% [22, 46] die führende vermeidbare Todesursache auf dem Gefechtsfeld dar. Aufgrund des Oberkörperschutzes durch ballistische Schutzwesten beträgt der Anteil penetrierender Extremitätenverletzungen bei Verwundeten 53% [63]. Bis zu 33% der Blutungen sind tourniquierbar [47].

Im Rahmen der taktischen Verwundetenversorgung ist das Tourniquet ein probates Device zur Blutstillung [3, 55], durch dessen Einsatz Morbidität und Mortalität gesenkt werden können [9, 12, 48]. Insbesondere die folgenden zwei Arbeiten setzen sich maßgeblich mit dem Einfluss der Tourniquet-Anwendung auf Morbidität und Mortalität auseinander:

Beekley et al. [3] analysierten retrospektiv die im Jahr 2004 im Combat Sup-

port Hospital in Bagdad aufgenommenen Patienten mit schwerem Extremitäten-trauma und/oder angelegtem Tourniquet [3]. Von den 3444 Patienten erfüllten 165 die Einschlusskriterien. Insgesamt wurden davon 67 Patienten mit einem Tourniquet versorgt. Aufgrund der Verletzungen wurde eine chirurgische Gefäßrekonstruktion bei 29,9% der Tourniquet-Gruppe und bei 52,5% der Non-Tourniquet-Gruppe notwendig. In der Tourniquet-Gruppe wurde bei 83% eine adäquate Blutungskontrolle erreicht, in der Non-Tourniquet-Gruppe waren es lediglich 60%. Die sekundären Amputationsraten beliefen sich auf 6% in der Tourniquet-Gruppe und auf 9% in der Non-Tourniquet-Gruppe, wobei die Operationsindikation in keinem Fall aufgrund einer Tourniquet-assoziierten Komplikation gestellt wurde. Die Mortalität war in beiden Gruppen ähnlich: 4,4% vs. 4,1%. Weiterhin stellten die Autoren fest, dass 4 von 7 verstorbenen Patienten durch die präklinische Anlage eines Tourniquets hätten gerettet werden können. Zusammenfassend konnte bei den mit Tourniquets versorgten Patienten eine bessere Blutungskontrolle ohne Tourniquet-induzierte Schäden festgestellt werden.

In einer Zusammenfassung zweier retrospektiven Studien [6] an insgesamt 499 Patienten mit 862 Tourniquet-Anlagen, die in 69% bzw. 75% Explosionsverletzungen erlitten hatten, zeigten Kragh et al., dass die Überlebensrate bei präklinischer Anlage mit 89% signifikant höher lag als bei Patienten, die erst im Krankenhaus mit Tourniquets versorgt wurden (76%). Bei Tourniquet-Anlage vor Manifestation eines hämorrhagischen Schocks betrug die Überlebensrate 96%, bei Abbindung im Schock nur noch 4%. Die Autoren sahen insgesamt eine deutliche Mortalitätssenkung durch einen frühzeitigen Tourniquet-Einsatz. Folgende multifaktoriell bedingte Morbiditäten konnten festgestellt werden: Amputationen (35%), Fasziotomien (23%), Thrombembolien (3%), Muskelnekrosen (1,5%), Nervenschädigungen (1,4%) und akutes Nierenversagen (1%). Keine der permanenten Schädigungen war alleine durch die Tourniquet-Versorgung bedingt [8].

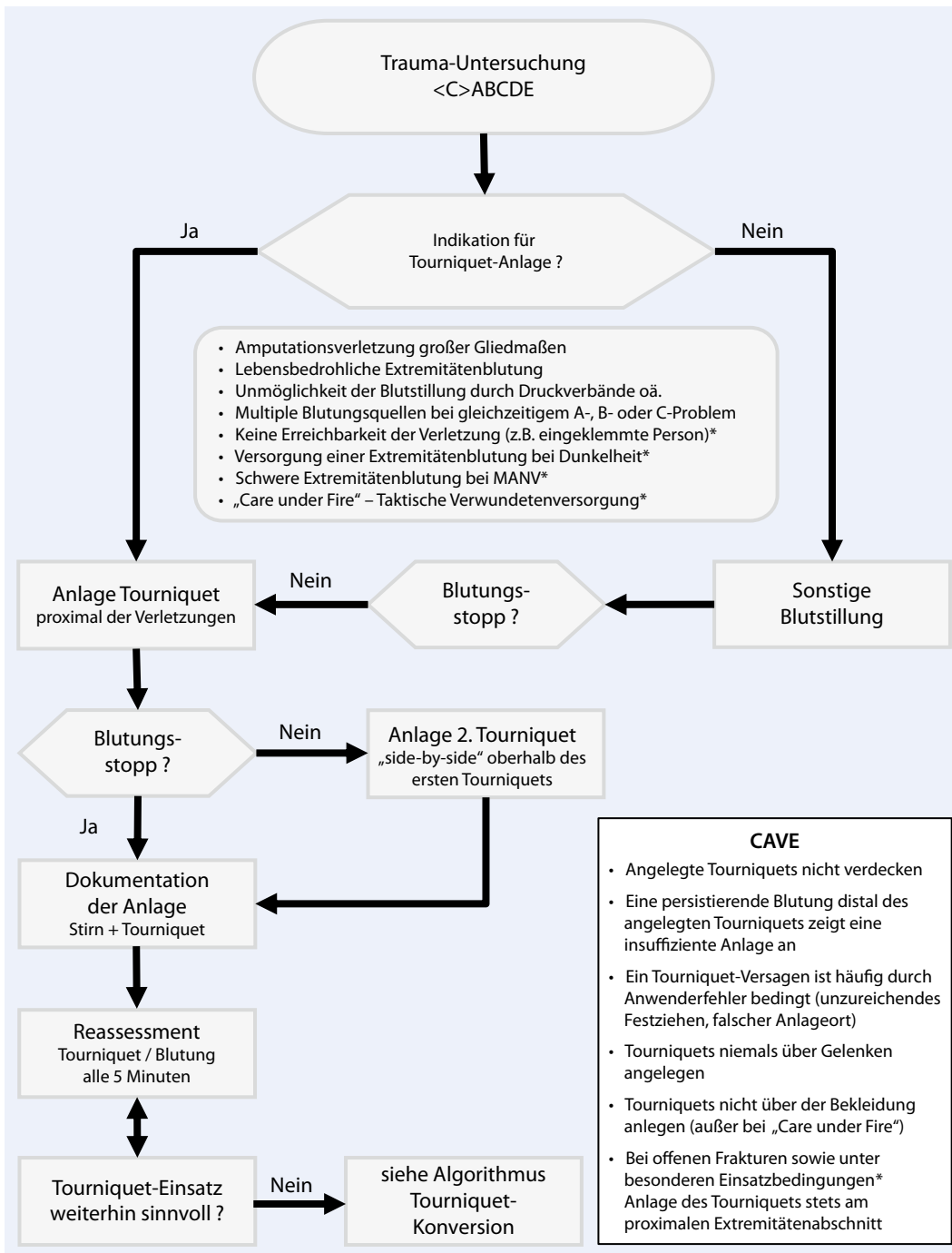


Abb. 4 ◀ Algorithmus für die präklinische Tourniquet-Anlage

Erfahrungen aus dem zivilen Rettungsdienst

Obwohl die meisten Erfahrungen aus militärischen Einsätzen stammen, gibt es mittlerweile auch einige wenige Erfahrungsberichte aus dem angloamerikanischen Rettungsdienst:

Kalish et al. [5] analysierten retrospektiv alle in den Jahren 1999 bis 2006 eingelieferten Patienten mit penetrieren-

dem Extremitätentrauma im Boston Medical Center. Insgesamt wurden 11 Patienten vom Gesamtkollektiv präklinisch mit Tourniquets versorgt. Für die Verletzungsmuster waren in 55% Schussverletzungen, in 27% Messerstichverletzungen und in 18% sonstige Traumen verantwortlich. Bei einer durchschnittlichen Tourniquet-Zeit von 75±38 min (37–167 min) konnte bei keinem der Patienten im weiteren Verlauf eine Tourniquet-bedingte neurologische oder postischämische Stö-

rung diagnostiziert werden. Die Autoren schlussfolgerten, dass präklinisch durch Tourniquets eine suffiziente Blutungskontrolle erzielt werden kann, ohne dass mit neurovaskulären Komplikationen gerechnet werden muss.

Dorlac et al. kamen im Rahmen einer retrospektiven Kohortenstudie zu ähnlichen Ergebnissen. An zwei Level-I-Trauma-Zentren in Houston, Texas, wurden aus über 75.000 Notfallpatienten insgesamt 14 Patienten identifiziert, die auf-

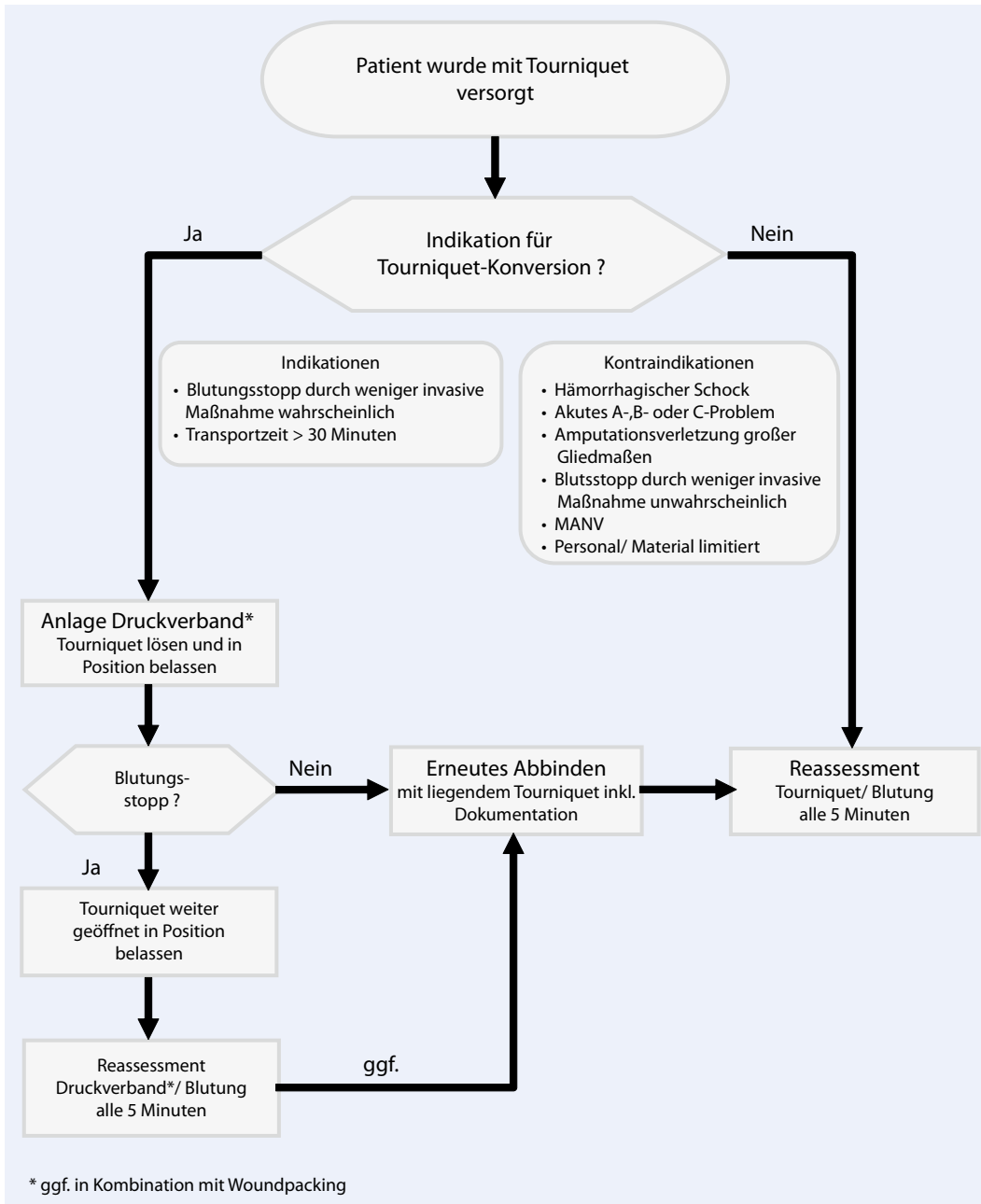


Abb. 5 ◀ Algorithmus für die präklinische Tourniquet-Konversion

grund einer Hämorrhagie bei isoliertem Extremitätentrauma reanimationspflichtig eingeliefert worden waren [45]. In 50% der Fälle handelte es sich um Schussverletzungen, in 71% lagen venöse und arterielle Blutungen vor. In 86% der Fälle konnten durch den Rettungsdienst am Einsatzort noch Vitalparameter erhoben werden. In 64% aller Fälle wurde Mullgaze zur Blutstillung eingesetzt, in keinem der Fälle ein Tourniquet. Die Autoren kamen zu dem Schluss, dass 57% der Patienten durch die Anlage eines Tourniquets hätten gerettet werden können.

Sonstige Methoden der Blutstillung

Druckverbände

Grundsätzlich stellt die Anlage eines Druckverbands unter Kompression der Wunde und Hochlagerung der Extremität die Basistherapie bei starken Extremitätenblutungen dar. Als Verbandstoffe kommen hierfür Mull- und elastische Binden sowie moderne Schnellverbände (z. B. Emergency Bandage, First Care Inc.) in Frage. Bei einer unzureichenden Effek-

tivität besteht die Möglichkeit, einen zweiten Druckverband anzulegen. Die Funktionsweise beruht auf einer Kompression der verletzten, meist venösen Gefäße und Kapillaren. Durch die Verminderung des Blutflusses entsteht ein Clot, welcher zur Blutstillung führt. Die Erfahrungen zeigen, dass durch trainierte Anwender mittelstarke bis starke Blutungen erfolgreich gestoppt werden können, während massive arterielle Blutungen durch diese Maßnahme häufig nicht zu beherrschen sind [64]. Ein weiterer Nachteil von Druckverbänden ist, dass deren Anlage einige Zeit

Tab. 4 Empfehlungen für den praktischen Tourniquet-Einsatz

Empfehlungen für den präklinischen Tourniquet-Einsatz
– Tourniquet-Anlage nur an entkleideten Extremitäten (Erfassen aller Wunden, Risikominimierung bezüglich Lockerung und Verrutschen des Tourniquets)
– Frühzeitige Anlage vor Einsetzen des hämorrhagischen Schocks
– Ziel der Tourniquet-Anlage ist der Blutungsstopp
– Zeitpunkt der Anlage dokumentieren (auf Tourniquet, Stirn des Patienten und Rettungsdienstprotokoll)
– Nur industriell gefertigte und getestete Produkte einsetzen, Benutzung von improvisierten Tourniquets nur im Notfall
– Pneumatische Tourniquets bieten mehr Sicherheit in Bezug auf Nebenwirkungen (Cave: Lufttransport in großer Höhe)
– Eine Tourniquet-Anlage bedarf einer adäquaten Analgesie
– Einweisung, Training und SOP-basierter Einsatz von Tourniquets sind essenziell
– Bei Ineffektivität Anlage eines zweiten Tourniquets direkt neben dem ersten („side by side“)
– Angelegte Tourniquets nicht verdecken
– Eine lokale Hypothermie der abgebandenen Extremität vermindert den Reperfusionsschaden
– Eine Tourniquet-Konversion nur bei stabilen Patienten ab einer Transportzeiten >30 min erwägen

in Anspruch nimmt und meistens ein Zuarbeiter benötigt wird. Ferner ist es sehr schwierig, Druckverbände an Amputationsstümpfen anzubringen. Das Anlegen eines Druckverbands am eigenen Körper ist im Gegensatz zu modernen Tourniquets häufig nicht durchführbar.

Stark resorbierende Verbandstoffe und Hämostyptika

Nicht jede Blutung kann durch Druckverbände oder Tourniquets gestoppt werden. Die einzige erfolversprechende Maßnahme bei massiven Blutungen im Axel-, Leisten- und Halsbereich ist das sog. „Woundpacking“. Hierunter versteht man das Austampfen der Wundhöhle mit einer nichtelastischen Mullgaze (z. B. Kerlix™, Fa. Kendall; [23]), welche sich auch als saugfähige Wundaufgabe verwenden lässt. Der Wirkungsmechanismus besteht in einem Aufsaugen von Blut durch das schwammartige Mullgeflecht mit nachfolgender Hämostase und Gerinnungsaktivierung. Auch wenn das Woundpacking auf den ersten Blick einfach erscheint, gehört diese Form der Blutstillung zu den anspruchsvolleren Verfahren. Kerlix-Gaze wird in verschiedenen Studien zur Messung der Effektivität von Hämostyptika als Referenzprodukt vergleichend herangezogen [23].

Um einen noch besseren blutstillenden Effekt beim Packing zu erzielen, wurden in den letzten Jahren verschiedene Hämostyptika entwickelt.

» Besonders wirkungsvoll bei der Blutstillung mittels Woundpacking sind Gaze-basierte Hämostyptika

In letzter Zeit haben sich die Gaze-basierten Produkte durchgesetzt. Die Wirkung wird durch die Tamponade und Kompression der blutenden Gefäße sowie durch den direkten Kontakt der aufgetragenen hämostyptischen Substanz am Ort der Gefäßverletzung erzielt. Zwei Substanzen sind zur Zeit marktführend: Kaolin (auf Quick Clot Gauze® bzw. Quick Clot Combat Gauze®, Z-Medica Corp.) und Chitosan (Celox Gauze®, Trauma Gauze® von Medtrade Products Ltd. sowie Hem-Con Gauze® von HemCon Medical Technologies Inc.). Kaolin ist ein hydratisiertes Aluminiumsilikat, das die Aktivierung der intrinsischen Gerinnungskaskade beschleunigt. Chitosan hingegen ist ein natürliches Polyaminosaccharid, welches aus den Chitinpanzern von Krustentieren gewonnen wird. Das positiv geladene Chitosan zieht negativ geladene Erythrozyten an und generiert über ein Crosslinking einen Clot. Eine kürzlich publizierte Studie konnte eine vergleichbare Effektivität der aktuellen kaolin- und chitosanbasierten Produkte nachweisen [74].

Voraussetzung für die Wirksamkeit von (hämostyptischen) Gaze-Produkten ist grundsätzlich der direkte Kontakt zum

blutenden Gefäß und eine anschließende fünfminütige Kompression der Wunde. Im Gegensatz zum Tourniquet kann dieses Verfahren bei mehreren Wunden oder aber bei schmalen und tiefen Wundkanälen zum Scheitern verurteilt sein.

Empfehlungen für den zivilen Rettungsdienst

Tourniquets stellen eine sinnvolle Ergänzung der Medizinprodukte im Bereich der zivilen Traumaversorgung dar. Um dem Personal die Angst vor der Tourniquet-Applikation zu nehmen und Anwendungsfehler zu vermeiden, sollten die Anwender geschult werden und der Einsatz unbedingt SOP-basiert erfolgen. Ferner sollten alle Rettungsmittel (auch Rettungswagen) ausschließlich mit industriell gefertigten Tourniquets ausgestattet werden. Die aktuellen Empfehlungen für den präklinischen Tourniquet-Einsatz sind in **Tab. 4** zusammengefasst.

Einsatz bei MANV

Spätestens seit den Anschlägen in London und Madrid ist deutlich geworden, dass auch in Deutschland jederzeit mit terroristischen Anschlägen gerechnet werden muss. Aufgrund der hohen Wahrscheinlichkeit eines Sprengstoffanschlags ist ein Massenansturm von Verletzten (MANV) mit kriegsähnlichen Verletzungsmustern und einem großen Prozentsatz an penetrierendem Trauma und Amputationsverletzungen wahrscheinlich [73]. Der Einsatz von Tourniquets sollte im Falle eines MANV bereits während der Sichtung, spätestens aber in der frühen Versorgungsphase erfolgen, da diese Maßnahme eine schnelle, rationale und probate Methode darstellt, um eine lebensbedrohliche Extremitätenblutung zu stoppen. Andere Methoden (Abdrücken einer Blutung, Anlage von Druckverbänden) sind in solchen Situationen zu zeit-, personal- und materialaufwendig. Im Ausnahmefall könnten sogar Laienhelfer vor Ort innerhalb kürzester Zeit in diese simple Maßnahme eingewiesen werden und sie selbstständig durchführen. Sollte ein schneller Abtransport in ein geeignetes Zielkrankenhaus nicht erfolgen können, bestünde zu einem späteren Zeitpunkt die Mög-

lichkeit, die Abbindung durch ein weniger invasives Blutstillungsverfahren zu ersetzen. Jeder Patient mit liegendem Tourniquet sollte mindestens in die Sichtungskategorie T2 (gelb) eingeordnet werden, um die Tourniquet-Zeit durch eine höhere Transportpriorität zu verkürzen.

Fazit für die Praxis

Um eine lebensbedrohliche Blutung schnellstmöglich zu erkennen und zu behandeln, sollte die Traumaversorgung grundsätzlich nach dem <C>ABCDE-Algorithmus [17, 23, 50] erfolgen. Das medizinische Personal muss in der Indikationsstellung und Handhabung von Tourniquets geschult und trainiert sein, um Komplikationen des Tourniquet-Einsatzes zu vermeiden. Die Abbindung sollte frühzeitig vor Eintritt eines hämorrhagischen Schocks erfolgen, um ein Benefit bezüglich des Überlebens zu erzielen [8, 48]. Für den MANV sollte der Tourniquet-Einsatz dringend erwogen werden [23]. Pneumatischen Tourniquets (z. B. EMT, Delfi Medical Innovations) mit möglichst breiter Manschette bieten im Vergleich zu den mechanischen Modellen Vorteile, allerdings muss beim Lufttransport stets an die Gefahr der Volumenzunahme mit konsekutiver Druckerhöhung innerhalb der Manschette aufgrund des abnehmenden Luftdrucks gedacht werden. Die Produktwahl kann aber auch von anderen Faktoren abhängig sein (Gewicht, Packmaß und Robustheit bei Einsatz in der taktischen Einsatzmedizin). Das Tourniquet sollte an dickeren Extremitätenabschnitten proximal der blutenden Verletzung eingesetzt werden, um den Gewebe- und Nervenschaden zu minimieren. Unter besonderen Umständen (▣ Tab. 4) sollte äußerst proximal abgebunden werden. Ferner sollte jeweils nur der für eine suffiziente Blutstillung notwendige Abbindedruck appliziert werden [29]. Im Falle einer Ineffektivität kann ein zweites Tourniquet unmittelbar neben dem ersten angelegt werden [9], nachdem der Sitz des ersten Tourniquets überprüft wurde. Grundsätzlich sollte versucht werden, Tourniquets durch weniger invasive blutstillende Maßnahmen zu ersetzen. Allerdings müssen hierbei die Kontraindikationen für eine Konver-

sion berücksichtigt werden (▣ Abb. 5). Ist eine Konversion nicht möglich, kann eine Tourniquet-Zeit von maximal 2 h als sicher angesehen werden [49]. Reperfusionphasen können aufgrund der Gefahr des weiteren Blutverlusts mit einhergehender Mortalitätserhöhung nicht empfohlen werden. Eine lokal induzierte Hypothermie der betroffenen Extremität (z. B. durch Cold Packs) kann den Ischämieschaden von Muskulatur [33, 34] und Nerven [47] reduzieren. Dieser protektive Effekt wurde bereits ab einer Temperaturreduktion um 2–3°C nachgewiesen. Zwecks sofortiger Erkennbarkeit sollte das Tourniquet für die nachbehandelnden Kollegen nicht verdeckt werden [49].

Korrespondenzadresse



Dr. S.W. Hauschild
Klinik und Poliklinik für
Anästhesiologie und operative
Intensivtherapie,
Universitätsmedizin Rostock
Schillingallee 35,
18057 Rostock
sven.hauschild@uni-rostock.de

Compliance with Ethics Guidelines

Conflict of interest. S.W. Hauschild, G. Nöldge-Schomburg and J. Hoitz declare that they have no conflict of interest.

This article does not contain any studies with human or animal subjects.

Literatur

1. Kragh JF Jr, Swan KG, Mabry RL et al (2011) Historical review of emergency tourniquet use to stop bleeding. *Am J Surg* 203(2):242–252
2. Tourniquet Recommendations from USAISR 28 July 2004, <http://www.delfimedical.com/8-usaISR-tourniquet-recomendation.pdf?SiteID=d1d7441a-c53c-473f-a3f8-3b6b92c9c516&V=0>
3. Beekley AC, Sebesta JA, Blackburn LH et al (2008) Prehospital tourniquet use in Operation Iraqi Freedom: effect on hemorrhage control. *J Trauma* 64(2):S28–S37
4. Childers R, Tolentino JC, Leasiolagi J et al (2011) Tourniquets exposed to the Afghanistan combat environment have decreased efficacy and increased breakage compared to unexposed tourniquets. *Mil Med* 176(12):1400–1403
5. Kalish J, Burke P, Feldman J et al (2008) The return of tourniquets: original research evaluates the effectiveness of prehospital tourniquets for civilian penetrating extremity injuries. *JEMS* 33(8):44–54

6. Kragh JF Jr, Littrel ML, Jones JA et al (2011) Battle casualty survival with emergency tourniquet use to stop limb bleeding. *J Emerg Med* 41(6):590–597
7. Doyle GS, Taillac PP (2008) Tourniquets: a review of current use with proposals for expanded prehospital use. *Prehosp Emerg Care* 12:241–256
8. Kragh JF Jr, O'Neill ML, Walters TJ et al (2011) Minor morbidity with emergency tourniquet use to stop bleeding in severe limb trauma: research, history, and reconciling advocates and abolitionists. *Mil Med* 176(7):817–823
9. Kragh JF Jr, Walters TJ, Baer DG (2008) Practical use of emergency tourniquets to stop bleeding in major limb trauma. *J Trauma* 64(2 Suppl):S38–S49
10. Kragh JF Jr, O'Neill ML, Walters TJ (2011) The military emergency tourniquet program's lessons learned with devices and designs. *Mil Med* 176(10):1144–1152
11. Brodie S, Hodgetts TJ, Ollerton J et al (2007) Tourniquet use in combat trauma: UK military experience. *J R Army Med Corps* 153(4):310–313
12. Kragh JF Jr (2010) Use of tourniquets and their effects on limb function in the modern combat environment. *Foot Ankle Clin* 15(1):23–40
13. Lakstein D, Blumenfeld A, Sokolov T et al (2003) Tourniquets for hemorrhage control on the battlefield: a 4-year accumulated experience. *J Trauma* 54(Suppl 5):S221–S225
14. Lee C, Porter KM, Hodgetts TJ (2007) Tourniquet use in the civilian prehospital setting. *Emerg Med J* 24(8):584–587
15. Champion HR, Bellamy RF, Roberts CP et al (2003) A profile of combat injury. *J Trauma* 54(Suppl 5):S13–S19
16. Majno G (1991) The healing hand: man and wound in the ancient world. Commonwealth Fund Publications
17. Parker PJ, Clasper J (2007) The military tourniquet. *J R Army Med Corps* 153(1):10–15
18. Richey SL (2007) Tourniquets for the control of traumatic hemorrhage: a review of the literature. *World J Emerg Surg* 2:28
19. Maury AC, Roy WS (2002) A prospective, randomized, controlled trial of forearm versus upper arm tourniquet tolerance. *J Hand Surg Br* 27(4):359–360
20. Taylor DM, Vater GM, Parker PJ (2011) An evaluation of two tourniquet systems for the control of prehospital lower limb hemorrhage. *J Trauma* 71:591–595
21. Walters TJ, Wenke JC, Baer DA (2004) Research on tourniquet related injury for combat casualty care. <ftp://ftp.rta.nato.int/Fulltext/RTO/MP/RTO-MP-HFM-109///MP-HFM-109-P33.pdf>
22. Lechner R, Achatz G, Hauer T et al (2010) Verletzungsmuster und –ursachen in modernen Kriegen. *Unfallchirurg* 113:106–113
23. Fischer C, Josse F, Helm M (2010) „Stop the bleeding“! Neue Aspekte der Blutstillung aus dem zivilen und militärischen Bereich. *Notfall Rettungsmed* 13:384–392
24. Fludger S, Bell A (2009) Tourniquet application in a rural Queensland HEMS environment. *Air Med J* 28(6):291–293
25. Horlocker TT, Hebl JR, Gali B et al (2006) Anesthetic, patient, and surgical risk factors for neurologic complications after prolonged total tourniquet time during total knee arthroplasty. *Anesth Analg* 102(3):950–955
26. Deutsche Gesellschaft für Unfallchirurgie (DGU) (2012) Jahresbericht 2012. http://www.traumaregister.de/images/stories/downloads/jahresberichte/tr-dgu-jahresbericht_2012.pdf
27. Shaw JA, Murray DG (1982) The relationship between tourniquet pressure and underlying soft-tissue pressure in the thigh. *J Bone Joint Surg Am* 64(8):1148–1152

28. Crenshaw AG, Hargens AR, Gershuni DH et al (1988) Wide tourniquet cuffs more effective at lower inflation pressures. *Acta Orthop Scand* 59(4):447–451
29. Pedowitz RA, Gershuni DH, Schmidt AH et al (1991) Muscle injury induced beneath and distal to a pneumatic tourniquet: a quantitative study of effects of tourniquet pressure and duration. *J Hand Surg* 16A:610–621
30. Pedowitz RA, Fridén J, Thornell L-E (1992) Skeletal muscle injury induced by a pneumatic tourniquet: an enzyme- and immuno-histochemical study in rabbits. *J Surg Res* 52:243–250
31. Worland RL, Arredondo J, Angles F et al (1997) Thigh pain following tourniquet application in simultaneous bilateral total knee replacement. *J Arthroplasty* 12(8):848–852
32. Orban JC, Levrant J, Gindre S et al (2006) Effects of acetylcysteine and ischaemic preconditioning on muscular function and postoperative pain after orthopaedic surgery using a pneumatic tourniquet. *Eur J Anaesthesiol* 23(12):1025–1030
33. Swanson AB, Livengood LC, Sattel AB (1991) Local hypothermia to prolong safe tourniquet time. *Clin Orthop* 264:200–208
34. Irving GA, Noakes TD (1985) The protective role of local hypothermia in tourniquet-induced ischemia of muscle. *J Bone Joint Surg* 67B:297–301
35. Husum H, Gilbert M, Wisborg T et al (2004) Prehospital tourniquets: there should be no controversy. *J Trauma* 56(1):214–215
36. Wakai A, Wang JH, Winter DC et al (2001) Tourniquet-induced systemic inflammatory response in extremity surgery. *J Trauma* 51:922–926
37. Graham B, Breault MJ, McEwen JA et al (1993) Occlusion of arterial flow in the extremities at subsystolic pressures through the use of wide tourniquet cuffs. *Clin Orthop* 286:257–261
38. Jarrett PM, Ritchie IK, Albadran L et al (2004) Do thigh tourniquets contribute to the formation of intraoperative venous emboli? *Acta Orthop Belg* 70(3):253–259
39. Hirota K, Hashimoto H, Kabara S et al (2001) The relationship between pneumatic tourniquet time and the amount of pulmonary emboli in patients undergoing knee arthroscopic surgeries. *Anesth Analg* 93(3):776–780
40. Angus PD, Nakielny R, Goodrum DT (1983) The pneumatic tourniquet and deep venous thrombosis. *J Bone Joint Surg Br* 65(3):336–339
41. Patterson S, Klenerman L (1979) The effect of pneumatic tourniquets on the ultrastructure of skeletal muscle. *J Bone Joint Surg Br* 61-B:178–183
42. Chambers LW, Green DJ, Sample K et al (2006) Tactical surgical intervention with temporary shunting of peripheral vascular trauma sustained during Operation Iraqi Freedom: one unit's Experience. *J Trauma* 61(4):824–830
43. Heppenstall RB, Balderston R, Goodwin C (1979) Pathophysiologic effects distal to a tourniquet in the dog. *J Trauma* 19(4):234–238
44. Walters TJ, Mabry RL (2005) Issues related to the use of tourniquets on the battlefield. *Mil Med* 170(9):770–775
45. Dorlac WC, DeBaake ME, Holcomb JB et al (2005) Mortality from isolated civilian penetrating extremity injury. *J Trauma* 59(1):217–222
46. Bellamy RF (1984) The causes of death in conventional land warfare: implications for combat casualty care research. *Mil Med* 149(2):55–62
47. Kelly C, Creagh T, Grace PA et al (1992) Regional hypothermia protects against tourniquet neuropathy. *Eur J Vasc Surg* 6:288–292
48. Kragh JF, Walters TJ, Baer DG et al (2009) Survival with emergency tourniquet use to stop bleeding in major limb trauma. *Ann Surg* 249(1):1–7
49. Rossaint R, Bouillon B, Cerny V et al (2010) Management of bleeding following major trauma: an updated European guideline. *Crit Care* 14:R52
50. Swan KG Jr, Wright DS, Barbaggioanni SS et al (2009) Tourniquets revisited. *J Trauma* 66(3):672–675
51. Ficke JR, Pollak AN (2007) Extremity war injuries: development of clinical treatment principles. *J Am Acad Orthop Surg* 15(10):590–5
52. King RB, Philips D, Blitz S et al (2006) Evaluation of possible tourniquet systems for use in the Canadian forces. *J Trauma* 60:1061–1071
53. Walters TJ, Wenke JC, Kauvar DS et al (2005) Effectiveness of self-applied tourniquets in human volunteers. *Prehosp Emerg Care* 9(4):416–422
54. Walters TJ, Wenke JC, Greydanus DJ et al (2005) Laboratory evaluation of battlefield tourniquets in human volunteers. <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a441140.pdf>
55. (o A) (o J) Tactical Combat Casualty Guidelines, 17 September 2012. http://www.health.mil/Education_And_Training/TCCC.aspx
56. Deutsche Gesellschaft für Unfallchirurgie (DGU) (2011) S3-Leitlinie „Polytrauma/Schwerverletzten-Behandlung“. <http://www.awmf.org/leitlinien/detail/ll/012-019.html>
57. Walters TJ, Kragh JF, Baer DG (2008) Influence of fiber-type composition on recovery from tourniquet-induced skeletal muscle ischemia-reperfusion injury. *Appl Physiol Nutr Metab* 33(2):272–281
58. Kam P, Kavanagh R, Yoong F et al (2001) The arterial tourniquet: pathophysiological consequences and anaesthetic implications. *Anaesthesia* 56(6):534–545
59. Konrad G, Markmiller M, Lenich A et al (2005) Tourniquets may increase postoperative swelling and pain after internal fixation of ankle fractures. *Clin Orthop Relat Res* 433:189–194
60. Ochoa J, Danta G, Fowler TJ et al (1971) Nature of the nerve lesion caused by a pneumatic tourniquet. *Nature* 233:265–266
61. Brömme HJ, Loertzer H, Akcetin Z (2002) Der postischämische Reperfusionsschaden – biochemische und methodische Grundlagen. *Urologe* 41:159–163
62. Owens BD, Kragh JF, Wenke JC (2008) Combat wounds in Operation Iraqi Freedom and Operation Enduring Freedom. *J Trauma* 64(2):295–299
63. Owens BD, Kragh JF Jr, Macaitis J et al (2007) Characterization of extremity wounds in Operation Iraqi Freedom and Operation Enduring Freedom. *J Orthop Trauma* 21(4):254–257
64. Naimer SA, Tanami M, Malichi A et al (2006) Control auf traumatic wound bleeding by compression with a compact elastic adhesive dressing. *Mil Med* 171(7):644–647
65. Pillgram-Larsen J, Mellesmo S (1992) Not a tourniquet, but compressive dressing. Experience from 68 traumatic amputations after injuries from mines. <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a444895.pdf>
66. Tran TP, Tu H, Pipinos II et al (2011) Tourniquet-induced acute ischemia-reperfusion injury in mouse skeletal muscles: involvement of superoxide. *Eur J Pharmacol* 650:328–334
67. Eltzschig H, Eckle T (2011) Ischemia and reperfusion – from mechanism to translation. *Nat Med* 17(11):1391–1401
68. Lee YG, Park W, Kim SH (2010) A case of rhabdomyolysis with use of a pneumatic tourniquet during arthroscopic knee surgery. *Korean J Intern Med* 25:105–109
69. Estebe JP, Davies JM, Richebe P (2011) The pneumatic tourniquet: mechanical, ischaemia-reperfusion und systemic effects. *Eur J Anaesthesiol* 28:404–411
70. Finsen V, Kasseth AM (1997) Tourniquets in forefoot surgery. *J Bone Joint Surg* 79-B:99–101
71. Odinson A, Finsen V (2001) The position of the tourniquet on the upper limb. *J Bone Joint Surg* 84-B:202–204
72. Arunakul R, Niempoo S (2011) Clinical experience in forearm tourniquet use. *J Med Assoc Thai* 94(Suppl 7):62–65
73. Hauschild S, Voß P, Witz S (2006) Präklinisches Management bei Explosions-Verletzungen. *Notfall Rettungsmed* 9(5):453–472
74. Rall JM, Cox JM, Songer A et al (2012) Comparison of novel hemostatic gauzes to Quickclot Combat Gauze in a standardized Swine Model of uncontrolled hemorrhage. *Naval Medical Research Unit San Antonio, Technical Report # TR-2012-22*
75. Tactical Rescue & Emergency Medicine Association e.V. (TREMA) (o J) Richtlinien für TCCC 1.1. <http://www.tremaonline.info/TREMA%20e.V.%20Guidelines%20TCCC%201.1.pdf>
76. Hodgetts TJ, Mahoney PF, Russel MQ et al (2006) ABC to <C>ABC: redefining the military trauma paradigm. *Emerg Med J* 23(10):745–746