

**Diplomarbeit**

**Hochinvasive Maßnahmen in der Notfallmedizin-  
Therapieoptionen nicht-komprimierbarer Blutungen des  
Körperstammes**

eingereicht von

**Julian Jesinger**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor der gesamten Heilkunde**

**(Dr. med. univ.)**

an der

**Medizinischen Universität Graz**

ausgeführt an der

**Universitätsklinik für Anästhesiologie und Intensivmedizin  
Klinische Abteilung für Anästhesiologie und Intensivmedizin 1**

unter der Anleitung von

Univ. OA Priv.-Doz. Dr.med.univ. Dr.scient.med. Paul Zajic, DESA

Univ. FA Dr.med.univ. Dr.scient.med. Gabriel Honnef

Graz am 08.05.2025

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe, andere als die angegebenen Quellen nicht verwendet habe und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Des Weiteren erkläre ich hiermit, dass, sofern bei der Erstellung dieser Arbeit Künstliche Intelligenz (KI) Werkzeuge zur Generierung und/oder Korrektur bestimmter Textpassagen verwendet wurden, dieser Einsatz unter Einhaltung ethischer Grundsätze, akademischer Integrität und den Vorgaben meiner Universität erfolgte, sowie in Folge dies transparent gemacht und in angemessener Weise gekennzeichnet wurde

Graz, am 08.05.2025

Julian Jesinger eh.

## **Danksagungen**

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Diplomarbeit unterstützt haben und ohne deren Hilfe und Rückhalt das alles nicht möglich gewesen wäre.

Mein besonderer Dank geht an meinen Betreuer Univ. FA Dr.med.univ. Dr.scient.med. Gabriel Honnef und an Univ. OA Priv.-Doz. Dr.med.univ. Dr.scient.med. DESA Paul Zajic, die mich mit wertvollen Tipps, ehrlichem Feedback und viel Geduld begleitet haben. Zusätzlich möchte ich mich bei der Klinischen Abteilung für Anästhesiologie und Intensivmedizin der Universitätsklinik LKH Graz für die fachliche Expertise und Betreuung bedanken.

Ein großes Dankeschön auch an meine Familie und Freund\*innen, die mich über mein gesamtes Studium begleitet und unterstützt haben und die mir in Zeiten von Stress und Unsicherheit zur Seite gestanden sind.

# Zusammenfassung

## Einleitung

Der prähospitaler Einsatz von Thorakotomie und REBOA ist seit 2021 Bestandteil der ERC-Guidelines und findet auch immer öfter Verwendung in der Versorgung von Traumapatient\*innen. Diese Arbeit schafft einen Überblick über die aktuelle Studienlage und vergleicht die beiden Verfahren im Hinblick auf deren Mortalität, die Komplikationsraten und die Durchführbarkeit.

## Methoden

Es wurde unter Einhaltung der PRISMA- Richtlinien eine systematische Suche in der PubMed Datenbank durchgeführt. Für die Suche wurden folgende Schlagwörter und die dazugehörigen MeSH-Terms verwendet: (Resuscitative Endovascular Balloon Occlusion of the Aorta OR REBOA OR intra-aortic balloon occlusion catheter OR Balloon Occlusion) AND (resuscitative thoracotomy OR thoracotomy OR aortic cross clamping OR RT). Der Fokus wurde auf Studien gelegt, die nach Erscheinen der ERC-Guideline veröffentlicht wurden. So konnten insgesamt sechs Studien in die Analyse inkludiert werden.

## Ergebnisse

In vier von sechs Studien zeigt sich eine signifikant niedrigere Sterblichkeit bei Anwendung von REBOA im Vergleich zur Thorakotomie und auch in den zwei anderen Studien schnitt REBOA besser ab, jedoch ließ sich kein signifikanter Unterschied feststellen.

Yamamoto et al. (REBOA 96,5% vs. RT 99,3%,  $p=0,01$ ) ; Cralley et al (REBOA 71,2% vs. RT 95,2%,  $p<0,001$ ); Khalid et al. (REBOA 75% vs. RT 98%,  $p=0,030$ ); Koh et al. (REBOA 88% vs. RT 93%,  $p=0,767$ ); Granieri et al. (REBOA 59,7% vs. RT 72,8%,  $p=0,416$ ); Brenner et al. (REBOA 60,5% vs. RT 91,7%,  $p<0,001$ ).

Die Komplikationen und Nebenwirkungen wurden bei vier Studien inkludiert, allerdings konnte bei keiner ein signifikanter Unterschied im Vergleich der beiden Verfahren festgestellt werden. Es zeigten sich aber Unterschiede im Hinblick auf die Nebenwirkungen zwischen den Verfahren. Bei REBOA traten vermehrt periphere und bei RT traten vermehrt systemische Nebenwirkungen auf.

## **Schlussfolgerungen**

Die Anwendung von REBOA stellt eine vielversprechende Ergänzung zu den bestehenden Maßnahmen zur Kontrolle von Blutungen im präklinischen Bereich dar. Eine niedrigere Sterblichkeitsrate im Vergleich zur Thorakotomie konnte in vielen Studien gezeigt werden, was für eine verstärkte Integration und Nutzung von REBOA in einem hochspezialisierten Rettungssystem mit den entsprechenden Ressourcen spricht.

# Abstract

## Background

The prehospital use of thoracotomy and REBOA has been part of the ERC guidelines since 2021 and is also increasingly being used in the care of trauma patients. This paper provides an overview of the current study situation and compares the two procedures with regard to their mortality, complication rates and feasibility.

## Methods

A systematic search of the PubMed database was performed in accordance with the PRISMA guidelines. The following keywords and the corresponding MeSH terms were used for the search: (resuscitative endovascular balloon occlusion of the aorta OR REBOA OR intra-aortic balloon occlusion catheter OR balloon occlusion) AND (resuscitative thoracotomy OR thoracotomy OR aortic cross clamping OR RT). The focus was placed on studies that were published after the ERC guideline had appeared. A total of six studies were included in the analysis.

## Results

Four of the six studies showed a significantly lower mortality rate with REBOA compared to thoracotomy, and REBOA also performed better in the other two studies, but no significant difference was found.

Yamamoto et al. (REBOA 96,5% vs. RT 99,3%,  $p=0,01$ ) ; Cralley et al (REBOA 71,2% vs. RT 95,2%,  $p<0,001$ ); Khalid et al. (REBOA 75% vs. RT 98%,  $p=0,030$ ); Koh et al. (REBOA 88% vs. RT 93%,  $p=0,767$ ); Granieri et al. (REBOA 59,7% vs. RT 72,8%,  $p=0,416$ ); Brenner et al. (REBOA 60,5% vs. RT 91,7%,  $p<0,001$ ).

Complications and side effects were included in four studies, but no significant difference was found between the two procedures in any of them. However, there were differences in terms of side effects between the procedures. REBOA had more peripheral side effects and RT had more systemic side effects.

## **Conclusions**

The use of REBOA is a promising addition to existing measures to control bleeding in the pre-hospital setting. A lower mortality rate compared to thoracotomy has been shown in many studies, which argues for increased integration and use of REBOA in a highly specialized rescue system with the appropriate resources.

# Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und deren Erklärung.....	1
Abbildungsverzeichnis .....	2
Einleitung .....	3
Was sind invasive Maßnahmen? .....	4
Was sind hochinvasive Maßnahmen?.....	5
Perikardiozentese.....	5
Clamshell-Thorakotomie .....	6
Resuscitative endovascular balloon occlusion of the Aorta (REBOA).....	9
Indikation.....	9
Kontraindikationen .....	10
Durchführung .....	11
Nebenwirkungen und Komplikationen.....	17
Zielsetzung und Forschungsfragen .....	19
Material und Methoden .....	21
Suchstrategie.....	21
Ergebnisse.....	23
Resuscitative endovascular balloon occlusion of the aorta and traumatic out-of-hospital cardiac arrest: A nationwide study (36).....	23
Zone 1 Endovascular Balloon Occlusion of the Aorta vs Resuscitative Thoracotomy for Patient Resuscitation After Severe Hemorrhagic Shock (37).....	24
Resuscitative Endovascular Balloon Occlusion of Aorta Versus Aortic Cross-Clamping by Thoracotomy for Noncompressible Torso Hemorrhage: A Meta-Analysis (38) .....	26
Resuscitative endovascular balloon occlusion of the aorta and resuscitative thoracotomy are associated with similar outcomes in traumatic cardiac arrest (39)...	27
Impact of resuscitative endovascular balloon occlusion of the aorta (REBOA) in traumatic abdominal and pelvic exsanguination: a systematic review and meta-analysis (40).....	28

Balloon Rises Above: REBOA at Zone 1 May Be Superior to Resuscitative	
Thoracotomy (41).....	30
Primäres Ziel .....	32
Sekundäres Ziel .....	33
Tertiäres Ziel.....	33
Diskussion .....	34
Schlussfolgerung .....	37
Literaturverzeichnis .....	38

## Abkürzungen und deren Erklärung

REBOA	Resuscitative endovascular balloon occlusion of the Aorta
NCTH	Non-compressible torso hemorrhage
RT	Resuscitative Thorakotomie
AO	Aortenokklusion
ROSC	Return of spontaneous circulation
TEE	Transösophageale Echokardiographie
ERC	European Resuscitation Council
CPR	Kardiopulmonale Reanimation
ISS	Injury Severity Score
AAST	American Association for the Surgery of Trauma
PMS	Propensity-Score-Matching
IPTW	Inverse probability of treatment weighting
GCS	Glasgow Coma Scale
RCT	randomisierte kontrollierte Studie
BP	Blutdruck (blood pressure)
CI	Confidence Interval
OR	Odds Ratio
RR	Risk Ratio
BMI	Body Mass Index
TBI	Traumatic Brain Injury

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Clamshell Inzision (19).....	7
Abb. 2: Auswahl verschiedener Okklusionskatheter zur „resuscitative endovascular balloon occlusion of the aorta“ (REBOA) (26).....	12
Abb. 3: Aorten-Zonen bei REBOA (6) .....	13
Abb. 4 European Resuscitation Council Guidelines 2021: Traumatischer Kreislaufstillstand Algorithmus (15) .....	20
Abb. 5: PRISMA Flow-Chart.....	22
Abb. 6: Tabelle mit Nebenwirkungen (37).....	25
Abb. 7: Tabelle mit Nebenwirkungen bei REBOA und RT mit Vergleich von penetrierenden und stumpfen Verletzungen (41) .....	31
Abb. 8: Mortalität aller Studien im Vergleich.....	32

## Einleitung

Der hämorrhagische Schock stellt bei Traumata ein hohes Letalitätsrisiko dar. Während die Kontrolle von Blutungen der Extremitäten durch externen Druck mittels Druckverbands, Tourniquets etc. gut beherrschbar ist, stellen Verletzungen des Thorax, des Abdomens und des Beckens eine große Herausforderung in der Blutungskontrolle dar.

Blutungen und der hämorrhagische Schock sind für 30 bis 40 % der Tode durch Traumata verantwortlich. Speziell in der ersten Stunde nach dem Unfall ist die Sterblichkeit durch Blutverlust mit 80% die führende Todesursache. (1,2)

Aktuell wird nur der Beckengurt großflächig und effektiv zur Behandlung von Beckenverletzungen eingesetzt. Weitere invasivere Versorgungsmöglichkeiten wären der Einsatz von REBOA (resective endovascular balloon occlusion of the aorta) oder die Durchführung einer Clamshell-Thorakotomie zur internen Kompression der Aorta. Die Verfahren stellen auch eine Behandlungsmöglichkeit für sogenannte NCTH (non-compressible torso hemorrhage) und Verletzungen des Abdomens dar.

In den letzten Jahrzehnten bzw. Jahren wurde in mehreren Arbeiten über die erfolgreiche Verwendung eines Ballonkatheters berichtet, der durch einen endovaskulären Verschluss der Aorta zur raschen Reduktion des Blutverlustes führt, das Risiko eines hypovolämischen Schocks senkt und durch Erhöhung der Nachlast eine Verbesserung der Versorgung von Herz und Gehirn sicherstellt. (3)

Während das Abklemmen der Aorta bei vaskulären Operationen mittlerweile zu einem etablierten Verfahren zählt, stellt sich die Frage, ob die Verwendung von REBOA im präklinischen Setting zur Versorgung von Notfallpatient\*innen als eine sinnvolle Versorgungsmaßnahme angesehen werden kann. International war „London HEMS“ führend bei der Einführung und Testung von REBOA im präklinischen Bereich. Mittlerweile wird diese Methode auch in anderen größeren Ballungszentren von Notärzt\*innen angewendet.

Es gibt sowohl Studien, die einen Überlebensvorteil zeigen, als auch Studien, die ein schlechteres Outcome durch etwaige Komplikationen nachweisen.(4–8)

Die folgende Arbeit soll den aktuellen Stand und Studienlage von REBOA bei der Akutversorgung von Patient\*innen zusammenfassen und einen Einsatz der Maßnahme im präklinischen Setting kritisch hinterfragen.

## **Was sind invasive Maßnahmen?**

Die Notfallmedizin entwickelt sich stetig weiter und wird tendenziell immer invasiver. Durch besseres und handlicheres Material wird eine spezialisierte Versorgung von Verletzten möglich. Techniken wie die Thoraxdrainage, die intraossäre Punktion und die Notfallkoniotomie stellen invasive, aber lebensrettende Sofortmaßnahmen in der Erstversorgung dar. (9)

Thoraxdrainagen repräsentieren bei einem Spannungspneumothorax im Speziellen, aber auch bei Hämatothorax und Pneumothorax bei Verschlechterung der Atemfunktion die Methode der ersten Wahl und sind mittlerweile etablierte Maßnahmen in der Notfallversorgung. Sie sollten mit einer Minithorakotomie erfolgen. Nach einem Hautschnitt sollte ausschließlich stumpf mit Schere oder Finger mit drehender Bewegung bis zur gelungenen Entlastung präpariert werden. Nach der erfolgreichen Entlastung kann durch Unterstützung des Fingers das Einbringen einer Drainage erfolgen, die anschließend durch eine Naht fixiert wird. Durch eine Thoraxflasche oder einen Sauger sollte ein Unterdruck erzeugt werden, wodurch eine vollständige Versorgung erreicht wäre. (10–12)

Der intraossäre Zugang kommt als Methode zweiter Wahl zur Anwendung, wenn ein peripher-venöser Gefäßzugang nicht möglich ist und kann speziell bei Kindern wie auch bei Erwachsenen eine schnellere Versorgung sicherstellen. Am häufigsten erfolgt die Punktion der proximalen Tibia unterhalb der Tuberositas. Für die Durchführung können manuelle, halbautomatische und automatische Systeme verwendet werden. (12,13)

Die Koniotomie findet ihre Anwendung, wenn andere Beatmungsformen, wie zum Beispiel eine endotracheale Intubation, als Methode erster Wahl nicht möglich bzw. fehlgeschlagen sind. Sie gewährleistet als „Ultima Ratio“ die Ventilation und Oxygenierung von Patient\*innen beim Versagen anderer Beatmungsmethoden. Die Anlage erfolgt zwischen Schild- und Ringknorpel und kann entweder durch ein Punktionsverfahren oder durch eine chirurgische Präparation durchgeführt werden. (12,14)

Als invasive Techniken haben sich Thoraxdrainagen, der intraossäre Zugang und die Koniotomie mittlerweile etabliert und sind in einer qualitativ hochwertigen Versorgung ein fester Bestandteil von nationalen und internationalen Leitlinien. (15)

## **Was sind hochinvasive Maßnahmen?**

Hochinvasive Techniken wie REBOA, Clamshell-Thorakotomie und Perikardiozentese finden in den letzten Jahren vermehrt Einzug in Empfehlungen und Leitlinien. Diese Techniken sind hoch spezialisiert und erfordern ein hohes Maß an Erfahrung und Training des gesamten Notfallteams. (16)

### **Perikardiozentese**

Die Perikardiozentese wird zur Behandlung eines Perikardergusses bzw. einer Perikardtamponade angewandt. Bei einer Perikardtamponade handelt es sich um eine Flüssigkeitsansammlung im Herzbeutel, die zu einer Restriktion des Herzens führt und in einem geringeren Auswurf resultiert.

Chronisch seröse Ergüsse können unter Umständen bis zu ein Liter Flüssigkeit enthalten, während bei einem akuten Ereignis bereits 50 ml zu einem Kreislaufversagen führen können. (17)

Eine akute Perikardtamponade präsentiert sich mit den als Beck-Triade bekannten Symptomen: Hypotonie, abgeschwächte Herzgeräusche und ein erhöhter Jugularvenenpuls. Unter anderem ist meist ein Pulsus Paradoxus, eine Abnahme der Pulsamplitude unter Inspiration, zu beobachten. Zur Bestätigung der Verdachtsdiagnose und Ausschluss einer Rechtsherzbelastung aufgrund anderer Ursachen ist allerdings eine Echokardiographie notwendig. (17)

Zur Entlastung von Perikardtamponaden kommen zwei präklinische Verfahren zur Anwendung. Zum einen die sonographisch gezielte Punktion und zum anderen die offene Entlastung durch eine Thorakotomie. Die Punktion bei einer Perikardiozentese stellt dabei die weit weniger invasive Maßnahme dar. Jedoch besteht der Nachteil, dass bei blutigen

Tamponaden eine suffiziente Entlassung durch Verstopfen der Kanüle durch koaguliertes Blut droht. Nichtsdestotrotz kann sie durch eine temporäre Entlastung die Zeit bis zur endgültigen Versorgung überbrücken. (16,18)

## **Clamshell-Thorakotomie**

Die Clamshell-Thorakotomie ist die notfallmäßige Eröffnung des Brustkorbs zur Stillung intrathorakaler Blutungen, Behandlung einer Perikardtamponade, offenen Herzdruckmassage oder zur Abklemmung der Aorta zur Kontrolle von nicht-komprimierbaren Blutungen des Körperstammes (NCTH). Die Clamshell-Thorakotomie ermöglicht durch einen großen und zentralen Schnitt am Oberkörper eine gute Übersicht über die intrathorakalen Organe und bietet dadurch ein weiteres Spektrum an Interventionsmöglichkeiten als zum Beispiel eine links-anterolaterale Thorakotomie. (18)

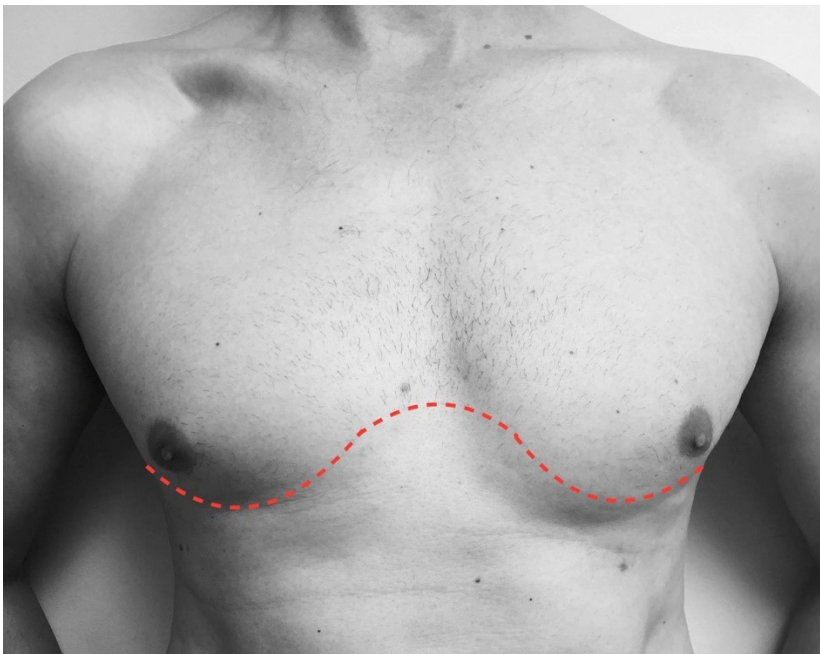
Die Indikationen zur Durchführung stellen fast ausschließlich penetrierende Verletzungen des Thorax wie Schuss- oder Stichverletzungen. Durch die hohe Invasivität ist die Indikation restriktiv zu stellen. Mögliche Indikationen sind Herz-Kreislauf-Stillstand unter 15 Minuten nach einer penetrierenden Verletzung, nicht kontrollierbare intrathorakale Blutungen mit Blutverlust von über 1,5 Liter bei Anlage einer Thoraxdrainage oder beobachteter Herz-Kreislauf-Stillstand nach stumpfem Trauma und einer Reanimationszeit unter 10 Minuten. (15,16)

Die meisten Daten beziehen sich auf Fallberichte oder Fallserien und geben Überlebensraten von 7 bis 15% an. Am besten ist hierbei das Outcome bei Behandlung einer Perikardtamponade mit Überlebensraten bis zu 31%. Am schlechtesten ist die Überlebensrate bei der Stillung von abdominellen Blutungen, die mit 1-2% beschrieben wird. (16,18)

## **Durchführung**

Der Eingriff sollte bei Indikation schnellstmöglich erfolgen und ist auch von Nicht-Chirurg\*innen durchführbar. Durch das enge Zeitfenster muss auch eine prähospitalen Versorgung möglich sein, bei der eine einfache Technik unerlässlich ist. Bei der

Durchführung liegt der\*die Patient\*in in Rückenposition und sollte intubiert wie auch ventilert sein sowie einen Gefäßzugang haben. Andernfalls sollten diese Maßnahmen von anderen Teammitgliedern parallel erfolgen, um die Thorakotomie nicht zu verzögern. Während der Durchführung der Thorakotomie wird die Ventilation eingestellt und erst bei der Reanimation mit der Herzdruckmassage wieder aufgenommen. Begonnen wird mit einer bilateralen Thorakotomie im vierten Intercostalraum wie bei einer konventionellen Thoraxdrainage. Im Anschluss werden die beiden Thorakotomien mit einem Schnitt verbunden (**Abb.1**) und unter Schutz der Lunge wird mit einer Kleiderschere oder Ähnlichem durch die Pleura und die Interkostalmuskeln geschnitten, bis das Sternum erreicht ist.



*Abb. 1: Clamshell Inzision (19)*

Teilweise lässt sich das Sternum auch mit der Schere schneiden, andernfalls sollte eine Gigli-Säge verwendet werden. Nun werden die Inzisionen bilateral bis in die posteriore Axillarlinie verlängert, um eine vollständige Eröffnung des Thorax zu ermöglichen. Somit kann der Brustkorb mit einem Spreizer oder durch Zug von Helfer\*innen eröffnet werden. (19,20)

Nun kann die Aorta manuell bis zur Stillung der thorakalen oder abdominellen Blutungen so weit distal wie möglich, um ein Sistieren der Blutung zu erreichen und einen hypovolämischen Schock zu verhindern, abgedrückt werden. Dadurch kommt es zu einem

Druckanstieg in der proximalen Aorta und die Durchblutung von Gehirn, Herz und Lunge ist verbessert.

Bei den anderen Indikationen der Clamshell-Thorakotomie, wie dem Perikarderguss und der offenen Herzdruckmassage, wird die RT fortgeführt. Der durch das Aufspreizen des Brustkorbs nun sichtbare Herzbeutel sollte beidseitig mit scharfen Klemmen gefasst werden und durch einen großen Mittellinienschnitt eröffnet werden. Der Schnitt sollte zum Schutz des N. Phrenicus, der in der lateralen Wand liegt, vertikal erfolgen. Das Blut und eventuelle Blutklumpen werden manuell ausgeräumt und das Herz auf sichtbare Verletzungen untersucht. Hierbei kann bei kleineren Defekten unter 1 cm manueller Druck genügen, andernfalls können Katheter oder nicht resorbierbare Nähte zur Blutstillung verwendet werden. (19,20)

Durch die Stimulation beginnt das Herz eventuell mit adäquatem Auswurf spontan zu schlagen oder eine interne Herzdruckmassage ist notwendig. Die Ausführung kann einhändig oder, sofern möglich, beidhändig erfolgen, was zu einer Optimierung des Resultats führt. Das Herz sollte dabei horizontal in einer möglichst anatomisch korrekten Position gehalten werden, um einen möglichst guten Blutfluss in den zu- und abführenden Gefäßen zu erreichen. Die Massagebewegung sollte vom Apex nach oben erfolgen und es sollten ca. 80 Kompressionen pro Minute sein. Zusätzlich kann eine Assistenz die Aorta descendens gegen die Wirbelsäule hin abdrücken, um den Blutdruck in der proximalen Aorta zu erhöhen und eine bessere Durchblutung von Gehirn und Herz zu erreichen. Wenn notwendig sollte eine Defibrillation erfolgen. Im prähospitalen Setting ist eine konventionelle externe Defibrillation besser durchführbar. Dazu wird der Spreizer entfernt und die Defibrillation kann mit den gewöhnlichen Pads erfolgen. (18–20)

Verläuft die Reanimation erfolgreich und ein ROSC (return of spontaneous circulation) gelingt, muss eine adäquate Analgosedierung erfolgen. Es sollte ein Anästhetikum mit minimaler kardialer Depression zum Einsatz kommen, wobei Ketamin häufig das Mittel der Wahl ist. Durch den wiederhergestellten Kreislauf ist auch mit Blutungen, vor allem der interthorakalen Gefäße, zu rechnen, welche mit Klemmen versorgt werden können. Sobald der Kreislauf wiederhergestellt ist, sollte der\*die Patient\*in so schnell wie möglich in einem Operationssaal versorgt werden.(16,19,20)

## **Resuscitative endovascular balloon occlusion of the Aorta (REBOA)**

Das Abklemmen bzw. die Okklusion der Aorta folgt bei REBOA dem gleichen Prinzip wie bei der Clamshell-Thorakotomie. Es kommt distal zur Reduktion bzw. zum Sistieren des Blutflusses. REBOA stellt durch den Katheter allerdings eine weitaus weniger invasive Maßnahme dar. (16)

Die Idee von REBOA ist nicht neu. Die erste Beschreibung des Verfahrens geht auf Chris Willams Hughes, einen amerikanischen Militärarzt, zurück, der es 1954 im Rahmen des Korea-Krieges beschrieb und es bei drei verwundeten Soldat\*innen anwendete. Alle Patient\*innen starben trotz des Einsatzes von REBOA an den schweren Verletzungen, doch laut Hughes könnte durch eine frühere Applikation ein besseres Outcome erzielt werden.(21) Das Verfahren geriet danach weitgehend in Vergessenheit, doch durch die kontinuierliche Weiterentwicklung von endovaskulären Operationsverfahren der Aorta erlangte es im operativen Bereich erneute Aufmerksamkeit. Durch die Weiterentwicklung von Kathetern und besseren Diagnosemöglichkeiten wie tragbaren Ultraschallgeräten zur Identifizierung von freier Flüssigkeit im Bauchraum stellt sich die Frage, ob eine präklinische Anwendung zur Blutungskontrolle von Becken- und Bauchtraumata sinnvoll ist.(16,22,23)

### **Indikation**

Da es sich beim Einsatz von REBOA um eine hochinvasive Maßnahme handelt, sollte die Indikation restriktiv gestellt werden, um eine Anlage bei Patient\*innen, die nicht davon profitieren, zu verhindern. Die Anlage erfordert grundsätzlich ein hohes Maß an Erfahrung, um eine adäquate Abwägung der Vor- und Nachteile zu gewährleisten und somit ein optimales Ergebnis für Patient\*innen zu erzielen.

Bei den Indikationen gibt es zwei Gruppen: zum einen Trauma-Patient\*innen und zum anderen Nicht-Trauma-Patient\*innen mit Blutungen.

Bei nicht-traumatischen Blutungen wird REBOA bei der Versorgung von abdominellen Aorten-Aneurysmen-Rupturen (AAA), oberen gastrointestinalen Blutungen, gynäkologisch-/geburtshilflichen Blutungen und postoperativen Blutungen eingesetzt. Bei

den nicht-traumatischen Blutungen zeigt der\*die Patient\*in oft nur eine einzelne Blutungsquelle, während im Unterscheid zu den traumatischen Blutungen, im Speziellen bei stumpfen Traumata, es oft multiple Blutungsquellen gibt. (24)

Bei traumatischen Verletzungen gelten als physiologische Indikationen: refraktärer hämorrhagischer Schock, systolischer Blutdruck unter 90 mmHg trotz Flüssigkeitsgabe und „Advanced-Trauma-Life-Support“ Klasse IV. Obwohl die Evidenzbasis zur Implementierung von REBOA bei Traumapatient\*innen noch limitiert ist, besteht unter Expert\*innen Konsens darüber, dass REBOA bei akuten subdiaphragmatischen Blutungen eine weite Verbreitung erfahren hat und Traumapatient\*innen von dem Einsatz profitieren sollten.

Eine weitere Möglichkeit der Indikationsklassifizierung ist eine Einteilung abhängig von der Höhe der Okklusion. Bei der Zone I Okklusion ergeben sich dadurch die Indikationen: hämorrhagischer Schock, subdiaphragmatisches Trauma, nicht-traumatische Blutungen, bestehende Erkrankungen (z.B. Ruptur eines abdominalen Aortenaneurysmas usw.) und postoperative Blutungen. In Zone II darf aufgrund der Gefäßversorgung der Bauchorgane keine Blockade stattfinden, um eine Minderperfusion zu verhindern. Die Indikationen für den Einsatz von Zone III REBOA umfassen: hämorrhagischer Schock, Beckenfrakturen, Verletzungen der unteren Extremitäten sowie nachgeburtliche Blutungen. (25)

## **Kontraindikationen**

Eine Kontraindikation von REBOA ergibt sich durch die Funktionsweise und die anatomische Limitierung des Verfahrens. Der Verschluss der Aorta führt zum Sistieren des distalen Blutflusses, wodurch die Möglichkeit, Blutungen, die über der Zone I liegen, zu stoppen, ausgeschlossen ist. Im Gegenteil, eine Okklusion würde in diesem Fall zu einem stärkeren Bluten führen. Dies gilt auch für Blutungen durch penetrierende Verletzungen im Bereich des Thorax und Mediastinums. Hier wäre wenn möglich eine Clamshell-Thorakotomie zur Identifizierung der Blutungsquelle und Klemmung der Aorta zu präferieren. (25)

Weitere Kontraindikationen stellen bekannte Gefäßerkrankungen der Aorta wie Aneurysmen oder Aortenektasie dar. Auch Gefäßprothesen und Stents im Bereich der

Punktions- oder Okklusionsstelle sind als Ausschlusskriterien zu betrachten. Zusätzlich ist im Falle eines schweren Schädel-Hirn-Traumas (SHT) eine kritische Hinterfragung der Anlage erforderlich, da eine Okklusion zu einem höheren Blutdruck und dadurch potenziell zu einer Hyperperfusion führen kann, die wiederum einen erhöhten intrakraniellen Druck nach sich ziehen kann. (26)

## **Durchführung**

Die Durchführung von REBOA kann zum besseren Verständnis und zur Übersicht in mehrere Schritte unterteilt werden: Kanülierung und Auswahl des Ballons; Positionierung des Ballons in der Aorta; Okklusionsphase und Fixierung des Katheters; Deflation und Entfernung des Ballons und der Schleuse.

### ***Kanülierung und Auswahl des Ballons***

Vor dem Beginn müssen alle benötigten Materialien vorhanden und kompatibel sein. Es werden ein Chirurgisches-Set (Skalpell, Nähten, Tupfern, Lochtüchern etc.), „introducer“, Schleuse, Seldinger-Drähte und Okklusionskatheter benötigt. Als erster Schritt erfolgt die Kanülierung der Arteria Femoralis Communis. Sie kann entweder durch Palpation, Ultraschall oder durch chirurgische Darstellung („cut down“) gesucht und mit einer geeigneten Nadel unter möglichst sterilen Bedingungen punktiert werden. Dies kann mit oder ohne eine zuvor angelegte Beckenschlinge erfolgen. Wenn möglich sollte eine bereits angelegte Schlinge belassen werden. Eine weitere Option wäre eine Kanülierung über eine bereits liegende arterielle Blutdruckmessung. Speziell im präklinischen Setting stellt dies eine praktikable Lösung dar, denn so kann zuerst eine arterielle Blutdruckmessung zur Überwachung von Patient\*innen angelegt werden und bei Verschlechterung des Zustands der Katheter gelegt werden, ohne dass eine neue Punktion notwendig ist. Wichtig ist dabei die Kompatibilität der verwendeten Systeme und zu überprüfen, ob die Verwendung eines Führungsdrahts zum Einbringen des Schleusensystems in die Kanüle möglich ist. Gewöhnliche 18-G Nadeln sind für einen 0.035-inch Seldinger-Draht durchgängig, der dadurch eingebracht werden kann. Über den Draht kann nun die Schleuse platziert werden. Je nach Art der Durchführung muss die Einstichstelle eventuell mit einem Hautschnitt

vergrößert werden. Die Schleusengröße wird in French (Fr) (1Fr = 0.333mm) angegeben.  
(26,27)

Name	Hersteller	Minimale Schleusengröße	Ballondurchmesser	Ballonvolumen	Länge	Kennzeichen
ER-REBOA	PrytimeMedical Devices (Boerne, Texas, USA)	7F	32mm	5–24 ml	72cm	Proximaler Anschluss zur invasiven Blutdruckmessung
						Weiche, speziell geformte Spitze
						Kein Führungsdraht nötig/möglich
						Längen- sowie Röntgenmarkierung
						Verfügbar in EU, Schweiz
Rescue Balloon Occlusion Catheter	Tokai Medical Products (Kasugai, Aichi, Japan)	7F	40mm	-	100cm	Längen- sowie Röntgenmarkierung
						Weiche Spitze
						Lieferung mit speziellem Führungsdraht, um den Ballon besser in Position zu halten (0,025“)
						Marktführer in Japan
						In Deutschland, Österreich, Schweiz verfügbar, CE-Zulassung folgt
Coda	COOK Medical (Limerick, Irland)	14F	46mm	60ml	120cm	Standardspitze
Coda-LP	COOK Medical (Limerick, Ireland)	12F	32mm	30ml	100cm	Standardspitze
RELIANT Stent Graft Balloon Catheter	Medtronic (Santa Rosa, Kalifornien, USA)	12F	10-46mm	3-60ml	100cm	Standardspitze
						Führungsdraht 0,038“ oder dünner
						Neben REBOA weitere Zulassungen
Fogarty Occlusion Catheter	Edwards Lifesciences (Irvine, Kalifornien, USA)	8F	45mm	-	80cm	Variable Produkte erhältlich
						Zulassung in EU, Schweiz
Q50 PLUS Stent Graft Balloon Catheter	Qx Médical (Montreal, Quebec, Kanada)	12F	10-50mm	-	65cm & 100cm	In USA, Kanada und Europa verfügbar
						In USA, Kanada und Europa verfügbar Ursprünglich nicht zur Anwendung im Rahmen REBOA, sondern EVAR/TEVAR etc. konzipiert
						Führungsdraht 0,038“ oder 0,035“
ResQ™ Occlusion Balloon Catheter	Qx Médical (Montreal, Quebec, Kanada)	11F	10-38mm	-	67cm	Nur in USA verfügbar

Abb. 2: Auswahl verschiedener Okklusionskatheter zur „resuscitative endovascular balloon occlusion of the aorta“ (REBOA) (26)

Bei der Auswahl des Okklusionskatheters gibt es verschiedene Modelle und Hersteller (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**2). Der Ballon, der in der Aorta aufgeblasen wird, muss sowohl weich und nachgiebig sein als auch genügend Durchmesser haben, um eine Okklusion zu gewährleisten. Es ist entscheidend, dass steife oder nicht nachgiebige Ballons in diesem Szenario vermieden werden, da ihr Aufblasen innerhalb der

Aorta ein höheres Risiko für Schäden der Gefäßwand mit sich bringt, einschließlich Dissektion und Ruptur.

Es sollte bedacht werden, dass nicht alle Systeme über die Möglichkeit der invasiven Blutdruckmessung verfügen. Falls ein Katheter ohne Blutdruckmessung verwendet wird, sollte nach Abschließen der REBOA-Anlage eine Neuanlage der invasiven Blutdruckmessung auf der kontralateralen Seite erfolgen. Alle Katheter und Systeme müssen vor der Einführung mit steriler Kochsalzlösung gespült werden, um das Risiko einer Luftembolie zu verringern. (26,27)

### ***Positionierung des Ballons in der Aorta***

Bei der Platzierung des Okklusionskatheters wird die Aorta in drei verschiedene Zonen unterteilt (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**3). Zone I umfasst den Abschnitt distal des Abgangs von der linken Arteria subclavia bis zum Truncus coeliacus. Zone II ist der paraviscerale Bereich zwischen dem Truncus coeliacus und den Nierenarterien. Zone III ist der infrarenale Bereich der Aorta und reicht bis zur Aortenbifurkation.

Je nach Ort der Blutung sollte der Katheter in der darüberliegenden Zone platziert werden. Okklusionen dürfen allerdings nur in Zone I und III erfolgen, da in Zone II durch Okklusion des Truncus coeliacus und der Arteria mesenterica superior ein erhöhtes Risiko einer Dislokation und durch Unterversorgung eine Ischämie der Bauchorgane besteht. Bei einem Schockzustand

und/oder drohendem Kreislaufkollaps sollte die Okklusion in Zone I erfolgen, um die Durchblutung von Herz, Lunge und Gehirn sicherzustellen. In diesem Fall wird ein längerer Katheter mit einem größeren Ballon benötigt, um den Ballon entgegen der Blutströmung in der Aorta zu halten. Zone III Okklusionen werden ebenso bei Schockzuständen und

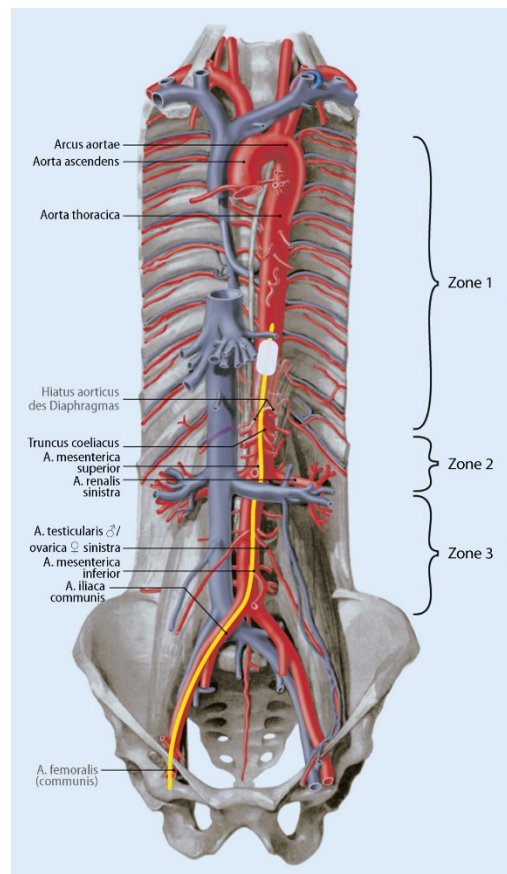


Abb. 3: Aorten-Zonen bei REBOA (6)

drohendem Kreislaufkollaps angewandt, wenn speziell diese aus einer Beckenverletzung oder einer Oberschenkelblutung im Hüftbereich resultieren. Hier können ein Ballon mit geringerem Durchmesser und eine kürzere Schleuse verwendet werden, da der Ballon durch die Aortenbifurkation entgegen des Blutstroms in Position gehalten wird.(27)

Vor dem Einführen sollte die ungefähre Einführtiefe abgeschätzt werden. Hierbei kann sich anhand anatomischer Landmarken geholfen werden. So entspricht die Einführtiefe einer Zone I Okklusion ca. dem Abstand von der Punktionsstelle bis zur Mitte des Sternums des\*der Patient\*in. Bei Zone III kann der Abstand von der Punktionsstelle bis zum Bauchnabel als Anhaltspunkt zur Hilfe genommen werden. Bei einer Zone III Okklusion empfiehlt sich allerdings, vor allem im präklinischen Bereich, wenn eine Überprüfung der Lage schwierig ist, ein Einschwemmen des Ballons in die Aortenbifurkation.

Die Einführtiefe variiert je nach Körpergröße und Katheterhersteller. Bei Zone III liegt die Spannweite zwischen 21 und 31 cm und bei Zone I zwischen 43 und 48cm. (28)

Die Überprüfung, ob der Ballon in der richtigen Zone auf entsprechender Höhe liegt, ist obligat durchzuführen. Im besten Fall sollte dies bei einem Zone I Verschluss durch eine transösophageale Echokardiographie erfolgen oder falls dies nicht möglich ist, durch ein Thorax-Röntgen, wo der Ballon auf der Höhe der Brustwirbelkörper 4 -11 zu sehen sein sollte. Bei einer Zone III Okklusion kann die Lage durch ein Abdomen-Röntgen überprüft werden, wo sich der Ballon unterhalb des Lendenwirbelkörpers 2 befinden sollte. Bei guten Schallbedingung kann ein Zone III Katheter auch mit einer Abdomen-Sonographie überprüft werden, was speziell in einer prähospitalen Situation eventuell als einzig durchführbare bildgebende Methode bleibt. Sollte keine Bildgebung durchführbar sein, sollte der Katheter je nach Hersteller ca. 50cm eingeführt werden, der Ballon dann geblockt werden und vom Blutfluss nach distal bis in die Aortenbifurkation wandern, um dort einen Verschluss zu erzeugen. Beim Eintreffen im Krankenhaus sollte dann spätestens im Rahmen des Trauma-CTs die Lage überprüft werden.(26)

Zusätzlich kann bei der Positionierung des Ballons das sogenannte „Downgrading“ angewandt werden. Dies beschreibt die Verlagerung eines Zone I Katheters nach einer initialen Stabilisierung und einer nachfolgenden Bildgebung in die Zone III. Dadurch wird die Ischämiezeit der oberen Organe minimiert und eine gezieltere Blutungskontrolle ermöglicht. Ein weiterer Vorteil des „Downgrading“ besteht auch darin, dass die hämodynamischen Komplikationen nach einer Zone I Okklusion reduziert werden. (29,30)

## ***Okklusionsphase und Fixierung des Katheters***

Zum Blocken des Ballons werden je nach Hersteller und nach Zone der Positionierung verschiedene Volumina benötigt (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Es wird eine Mischung aus NaCl 0,9% und Röntgenkontrastmittel verwendet, damit eine spätere Lagekontrolle einfacher durchführbar ist. In Zone I beträgt der physiologische Durchmesser der Aorta ca. 1,8-2,5cm und in Zone III 1,3-1,8 cm. Dementsprechend muss das Inflationsvolumen der Lage des Katheters angepasst werden. Eine zu starke Inflation muss auf jeden Fall vermieden werden, um Verletzungen der Aorta wie Aneurysmen bzw. im Extremfall einer Ruptur vorzubeugen. Bis zur Fixierung muss der Katheter händisch oder durch Klemmen gehalten werden. Bei Zone I empfiehlt sich, wie oben beschrieben, die Verwendung einer längeren Schleuse, um zu verhindern, dass der Ballon nach distal wandert. Nach abgeschlossener Positionierung sollte sowohl der Katheter als auch die Schleuse mit Nähten gesichert werden und weiterhin manuell überwacht werden.

Mit dem Blocken des Ballons sollte auch eine Überwachung des Blutdrucks etabliert sein, entweder mit einem Kombinationssystem, bei dem eine Blutdruckmessung im Katheter vorhanden ist, oder andernfalls durch eine invasive Blutdruckmessung an den Extremitäten. In diesem Fall wäre der linke Arm bevorzugt auszuwählen, da so bei einer Zone I Okklusion ausgeschlossen werden kann, dass der Katheter zu weit proximal liegt und eine Versorgung von Gehirn und Herz sichergestellt ist. Zusätzlich muss die Herzfunktion monitorisiert werden. Am besten wäre eine Überwachung der Inflation durch eine TEE. Durch die Okklusion und den damit verbundenen Druckanstieg in der Aorta kann es zu einer kardialen Dekompensation und einer damit verbundenen Myokardischämie kommen. Durch ein langsames Blocken kann der Effekt abgeschwächt werden. (31)

Der Zeitpunkt der Okklusion der Aorta sollte notiert werden, denn selbst wenn der\*die Patient\*in durch REBOA stabilisiert werden kann, stellt das Verfahren keine endgültige Lösung für die Versorgung dar. Es ist lediglich eine Überbrückung, bis der\*die Patient\*in operativ versorgt werden kann. Dabei spielt Zeit eine entscheidende Rolle, denn speziell bei einem Zone I Verschluss ist bei einem Überschreiten von 45 Minuten mit einem letalen Ausgang zu rechnen. (5) Bei einer Zone III Okklusion oder intermittierender Deflation kann der Zeitraum etwas verlängert werden, trotzdem sollte eine chirurgische Blutstillung so schnell wie möglich erfolgen. (23)

## ***Deflation und Entfernung des Ballons sowie der Schleuse***

Bei der Deflation des Ballons muss vorsichtig vorgegangen werden, da sie mehrere Risiken birgt. Durch die Reperfusion ist mit einer Hypotension, einem signifikanten Abfall der Vorlast, Wiederauftreten von Blutungen und je nach Dauer der Blockade mit einem Reperfusionssyndrom zu rechnen. Daher sollte eine Deflation nur in einem kontrollierten Setting, nach Absprache mit dem Team und milliliterweise unter konstanter Beobachtung der hämodynamischen Reaktion von Patient\*innen erfolgen. Das Reperfusionssyndrom entsteht durch das Einschwemmen von Blutmetaboliten, die sich durch die Minderperfusion gebildet haben und ist je nach Dauer und Ausdehnung des Verschlusses unterschiedlich stark ausgeprägt. Es ist mit einer Hyperkaliämie und einer metabolischen Azidose und den damit verbundenen Nebenwirkungen zu rechnen. In Anbetracht dessen sollte eine Volumentherapie sowie die Verabreichung von Noradrenalin, Natriumbicarbonat und Glucose-Insulin-Infusion, um den oben genannten Auswirkungen des Reperfusionssyndroms spezifisch entgegenzuwirken, vorbeugend erfolgen.(32)

Zur Überwachung von Patient\*innen während dieser vulnerablen Phase muss, falls nicht vorhanden, eine alternative invasive Blutdruckmessung etabliert werden und eine engmaschige Blutgasanalyse zur Beobachtung des Säure-Basen- und Elektrolythaushalts durchgeführt werden.

Aufgrund des erhöhten Blutungsrisikos nach der Deflation kann unter Umständen auch eine erneute Blockade nötig sein. Daher ist eine kritische Reevaluierung von Patient\*innen vor dem Entfernen des Ballons und speziell der Schleuse notwendig.

Die Entfernung ist je nach eingesetzter Schleusengröße unterschiedlich. So sind bei größeren Schleusen (12-14F) ein offener gefäßchirurgischer Eingriff sowie eine Übernähung notwendig. Bei kleineren Schleusen ist meist eine manuelle Kompression von ca. 30 Minuten ausreichend.(33) Ein zusätzlicher Vorteil von kleineren 7 F Schleusen ist, dass sie ohne zusätzlich auftretende Komplikationen bis zu 25 Stunden in situ belassen werden können, was ein sichereres Management der Nachüberwachung von Patient\*innen ermöglicht. (33)

Nach dem vollständigen Entfernen sollte die Perfusion der betroffenen Extremität geprüft werden und distal der Punktionsstelle sollten die Hautfarbe, Fußpulse,

Rekapillarierungszeit und das Auftreten eines Kompartiment-Syndroms in regelmäßigen Abständen kontrolliert werden. (26)

## **Nebenwirkungen und Komplikationen**

Da es sich um eine hochinvasive Maßnahme handelt, gibt es auch schwerwiegende Nebenwirkungen. Die Komplikationen können einerseits mit der Durchführung von REBOA direkt in Zusammenhang gebracht werden, andererseits stellen diese physiologisch systemische Auswirkungen aufgrund des Verschlusses der Aorta dar. Des Weiteren kann es zu Schwierigkeiten bei der Anlage eines adäquaten Gefäßzugangs kommen, was zum Misslingen der REBOA-Anlage oder zu einer Fehlfunktion, bei der fälschlicherweise die Vene anstelle der Arterie verwendet wird, führen kann.

Die verfahrensbedingten Komplikationen sind vor allem vaskulären Ursprungs. Durch das Blocken des Ballons besteht das Risiko einer Aortenruptur oder Bildung eines Aneurysmas. Im Rahmen der Einführung des Katheters kann es zu Verletzungen der Gefäße kommen oder zu einer Fehlanlage in einem von der Aorta abgehenden Gefäß. Dies kann zur Ruptur des Gefäßes führen und schwerwiegende Organschäden bis hin zum Tod nach sich ziehen. Ein weiterer potenzieller Risikofaktor, insbesondere im Hinblick auf den Verlust von Extremitäten, besteht durch den Zugang in die Arteria femoralis. Aufgrund der Möglichkeit einer Verletzung dieser Arterie und der Minderperfusion aufgrund des Katheters ist hier besondere Vorsicht geboten. Zusätzlich kann es durch den Einsatz von REBOA zu Embolien und Thrombosen kommen. (26,34)

Die systemischen Komplikationen sind auf die physiologischen Effekte, die aufgrund der Ischämie ausgelöst werden, erklärbar. Durch die Ischämie distal des Verschlusses kommt es zu einer Erhöhung der Zytokinkonzentration sowie einer Akkumulation von Stoffwechselmetaboliten, welche eine Entzündungsreaktion auslösen. Nach der Deflation des Ballons kann die Verteilung der Zytokine im Kreislaufsystem zu einer systemischen Entzündungsreaktion führen, welche wiederum Wiederbelebungsmaßnahmen und das Fortschreiten zum akuten Atemnotsyndrom (ARDS) nach sich ziehen kann. Die Hypoxie führt außerdem zu einer Aktivierung des anaeroben Stoffwechsels der Zellen, wodurch der

Laktatspiegel stark ansteigt. Diese Effekte resultieren in einer Hypothermie, Azidose und Koagulopathie, wobei die Ausprägung direkt proportional zur Dauer und Höhe der Okklusion ist. Speziell bei einer Zone I Blockade kann es somit zum akuten Nierenversagen, Leberversagen, zu mesenterialer Ischämie, spinaler Ischämie und Multiorganversagen kommen.(23,26)

Proximal des Verschlusses kommt es zu einem Druckanstieg, wodurch eine erhöhte kardiale Nachlast entsteht. Dies kann im Extremfall Lungen- und Hirnödeme zur Folge haben.

## Zielsetzung und Forschungsfragen

Ziel der Diplomarbeit ist, den aktuellen Wissensstand von REBOA im Vergleich zur Thorakotomie durch eine systematische Suche auszuarbeiten. REBOA und Thorakotomie (manuelle Aortenkompression) finden sich seit 2021 im Algorithmus der ERC-Guidelines für Traumatischen Kreislaufstillstand und Peri-Arrest (**Abb. 44**). Dort werden die Maßnahmen als fünfter Punkt bei der Behandlung von reversiblen Ursachen genannt.(15)

Es werden nur Studien berücksichtigt, die die Thorakotomie Indikation zur Abklemmung der Aorta zur Kontrolle von NCTH stellen, und nicht die anderen Indikationen der Thorakotomie wie die Behandlung einer Perikardtamponade oder zur Durchführung einer offenen Herzdruckmassage. (18)

Der Fokus der Arbeit richtet sich auf Studien, die nach dem Aufnehmen von REBOA und Thorakotomie in die ERC-Guidelines 2021 veröffentlicht wurden.

### Forschungsfragen

Im Speziellen werden folgende Forschungsfragen in dem systematischen Review bearbeitet:

1. Vergleich zwischen REBOA und Thorakotomie: **Besteht ein Unterschied in der Mortalität?**
2. Vergleich zwischen REBOA und Thorakotomie: **Treten bei einem der Verfahren mehr Komplikationen auf?**
3. Vergleich zwischen REBOA und Thorakotomie: **Wie praktikabel ist die Durchführbarkeit der einzelnen Verfahren?**

## TRAUMATISCHER KREISLAUFSTILLSTAND PERI-ARREST

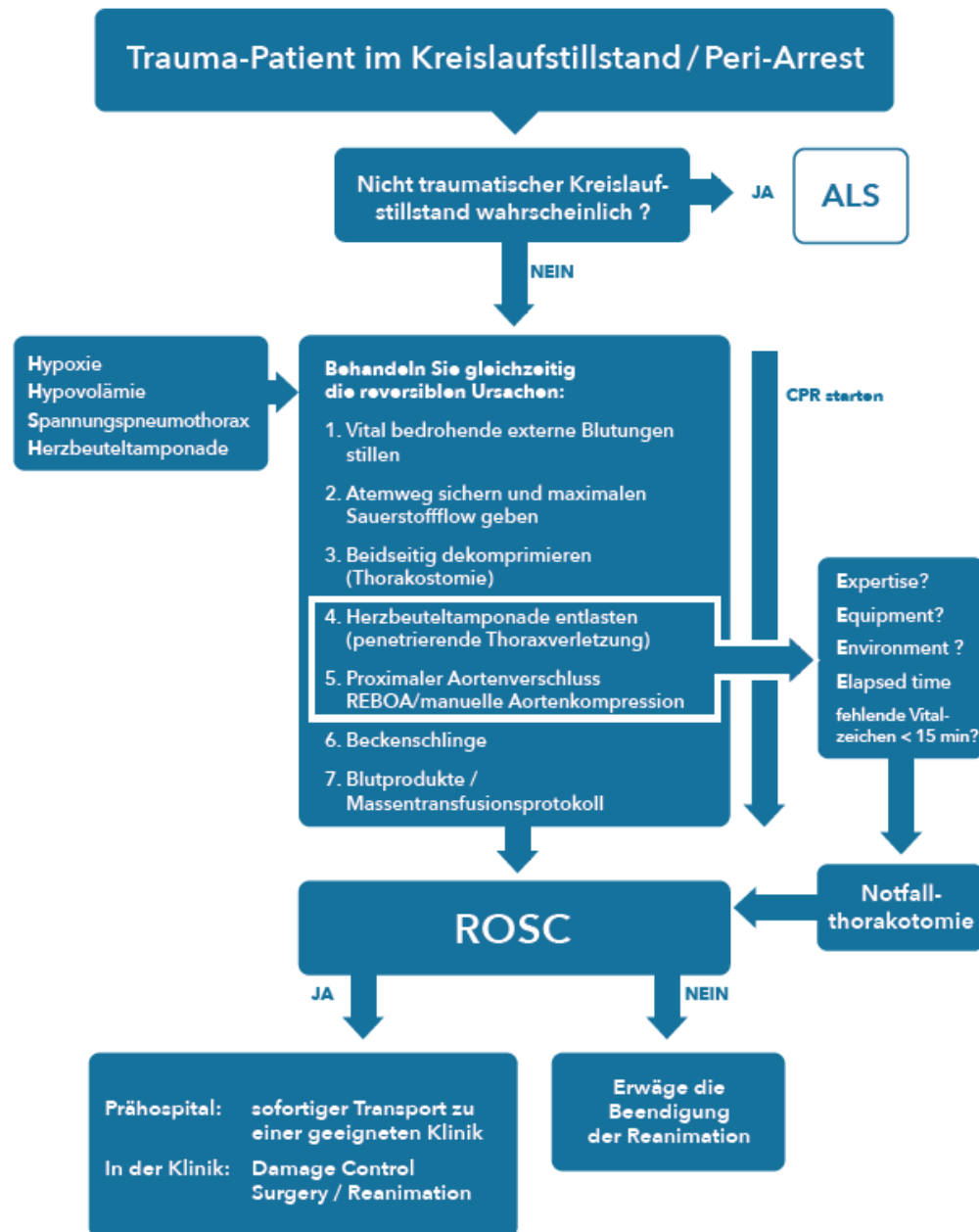


Abb. 4 European Resuscitation Council Guidelines 2021: Traumatischer Kreislaufstillstand Algorithmus (15)

## **Material und Methoden**

Die Arbeit wurde unter Berücksichtigung der PRISMA 2020 Richtlinien zur Erstellung eines systematischen Reviews verfasst. (35)

### **Suchstrategie**

Es wurde am 12.06.2024 eine systematische Suche in der PubMed Datenbank durchgeführt. Für die Suche wurden folgende Schlagwörter und die dazugehörigen MeSH-Terms verwendet: (Resuscitative Endovascular Balloon Occlusion of the Aorta OR REBOA OR intra-aortic balloon occlusion catheter OR Balloon Occlusion) AND (resuscitative thoracotomy OR thoracotomy OR aortic cross clamping OR RT).

### ***Suchergebnisse***

Bei der Suche wurden insgesamt 587 Artikel gefunden. Da sich die Arbeit auf Ergebnisse nach Veröffentlichung der ERC-Guidelines 2021 fokussiert, wurden alle Artikel, die vor 2020 veröffentlicht wurden, aussortiert. Nach Filterung der Artikel von 2020 und neuer verblieb eine Anzahl von 120 Artikeln. Bei den 120 verbleibenden Artikeln wurde die Überschrift und der Abstract nach Relevanz überprüft. Nach der ersten Sichtung schränkte sich die Sammlung auf ein Korpus von 18 Artikeln, deren Volltext evaluiert wurde, ein.

Es wurden sowohl prospektive als auch retrospektive Studien miteinbezogen. Die Suche richtete sich spezifisch auf den Vergleich zwischen REBOA und Thorakotomie zur proximalen Aortenokklusion.

Bei der Volltextsichtung wurden 12 Artikel ausgeschlossen. Fünf waren abweichend vom Themenbereich, vier gingen nicht spezifisch auf den Vergleich von REBOA und RT ein und drei verwendeten denselben Datensatz für die Auswertung. In den systematischen Review wurden somit sechs Artikel (36–41) eingeschlossen. Der detaillierte Suchverlauf ist in einem PRISMA Flow-Chart ersichtlich. (Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.)

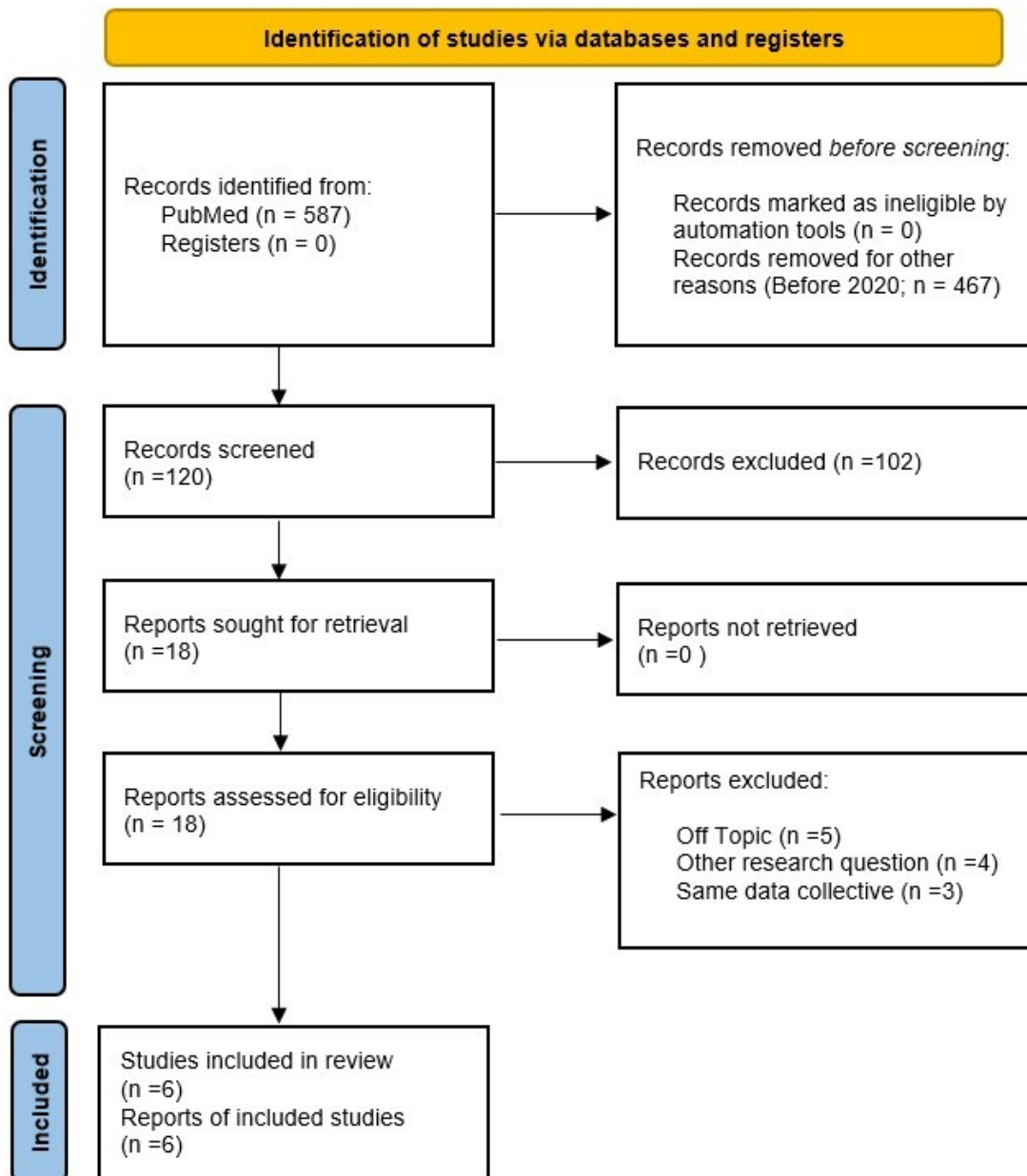


Abb. 5: PRISMA Flow-Chart

## Ergebnisse

### **Resuscitative endovascular balloon occlusion of the aorta and traumatic out-of-hospital cardiac arrest: A nationwide study (36)**

Hierbei handelt es sich um eine retrospektive Kohortenstudie mit Daten der japanischen Trauma Datenbank (JTDB). Die Datenbank umfasst Fälle aus mehr als 200 Krankenhäusern und im Zeitraum von 2004-2019. In die Analyse konnten 1483 Patient\*innen eingeschlossen werden. Es erfolgte je nach Behandlung eine Unterteilung in zwei Subgruppen mit 144 Patient\*innen in der REBOA Gruppe und 1339 Patient\*innen in der RT-Gruppe. Zusätzlich wurde eine Auswertung mit der Inversionsmethode durchgeführt. Für die Gewichtung wurden folgende Parameter berücksichtigt: Injury Severity Score, Verletzungsmechanismus, Alter, Geschlecht, Lebenszeichen bei Eintreffen und eine Exklusion von REBOA Anlagen, wo in weiterer Folge eine Thorakotomie zur operativen Kontrolle der Blutungsquelle durchgeführt wurde.

Die Überlebensrate der REBOA Gruppe war signifikant höher als die der RT-Gruppe (3.5% vs. 0.7%; [odds ratio (OR), 4.78; confidence interval (CI), (1.61–14.19)];  $p=0.01$ ) und die Inversionsmethode bestätigte die Resultate (3.0 % vs. 0.8%; [OR, 3.73; CI, 1.90–7.32];  $p < 0.001$ ).

Limitierungen der Studie sind die fehlenden Informationen über die Okklusionshöhe und die Dauer der Okklusion. Zusätzlich enthielt die Studie keine Informationen über Komplikationen, Nebenwirkungen und die postprozeduralen Reaktionen sowie keine Angaben über die Erfolgsrate bei der Durchführung.

## **Zone 1 Endovascular Balloon Occlusion of the Aorta vs Resuscitative Thoracotomy for Patient Resuscitation After Severe Hemorrhagic Shock (37)**

Die multizentrisch beobachtende, vergleichende Wirksamkeitsstudie verwendet Daten aus dem AORTA-Register der American Association for the Surgery of Trauma (AAST). Sie vergleicht die Aortenkompression durch eine RT mit der Anwendung von REBOA in Zone I. Die verarbeiteten Daten stammen aus dem Zeitraum von Oktober 2013 bis September 2021. Es wurden 991 Patient\*innen in die Analyse eingebunden, wovon 306 mit REBOA Zone I behandelt wurden und 685 mit einer Thorakotomie. Die Mortalität von Patient\*innen mit RT (95.2%) war signifikant höher als die von REBOA Patient\*innen (71.2%;  $p < 0.001$ ). Allerdings zeigte sich auch, dass Patient\*innen mit RT oft schwere Verletzungen und stärkere physiologische Entgleisungen erlitten. Deshalb wurde ein Propensity-Score-Matching (PSM) durchgeführt, unter Beachtung von:

Krankenhaus, Alter, Geschlecht, Injury Severity Score (ISS), Verletzungsmechanismen, Traumatic Brain Injury (TBI), schwerer Brustkorbverletzung, schwerer Bauchverletzung, schwerer Beckenverletzung, schwerer Extremitätenverletzung, prähospitaler CPR, systolischem Blutdruck bei der Aufnahme, GCS bei der Aufnahme, CPR beim Eintreffen, CPR während der AO, anfänglichem BP (blood pressure) bei der AO von 60 mmHg oder weniger, anfänglichem GCS bei der AO und dem\*der durchführenden Arzt\*Ärztin.

Durch das PSM wurden 112 Patient\*innenpaare gefunden. REBOA Zone I wies auch bei der PSM-Auswertung eine signifikant niedrigere Mortalitätsrate als RT (78.6% vs. 92.9%;  $p = 0.02$ ) auf.

Bei den aufgelisteten Nebenwirkungen (

**Abb. 6)** der PSM-Analyse ließ sich kein signifikanter Unterschied zwischen REBOA und RT feststellen.

Komplikationen Nr. (%)	Median Total (n=112)	REBOA Zone I (n = 56)	Resuscitative Thorakotomie (n = 56)	P Wert
Akute Nierenverletzung	11 (9,8)	6 (10,7)	5 (8,9)	0,75
Akute Lungenverletzung	7 (6,3)	3 (5,4)	4 (7,1)	0,70
Lungenentzündung	6 (5,4)	3 (5,4)	3 (5,4)	<0,99
Sepsis	4 (3,6)	3 (5,4)	1 (1,8)	0,31
Schlaganfall	2 (1,8)	0	2 (3,6)	0,15
Multiorganversagen	2 (1,8)	1 (1,8)	1 (1,8)	<0,99
Spinale Ischämie mit Neurodefizit	0	0	0	
Ischämie der Extremitäten	1 (0,9)	1 (1,8)	0	0,32
Amputation	0	0	0	

Abb. 6: Tabelle mit Nebenwirkungen (37)

## **Resuscitative Endovascular Balloon Occlusion of Aorta Versus Aortic Cross-Clamping by Thoracotomy for Noncompressible Torso Hemorrhage: A Meta-Analysis (38)**

Die Studie ist ein Updated-Systematic-Review mit Meta-Analyse. Dafür wurde im April 2021 eine Suche in PubMed, Embase und MEDLINE durchgeführt und insgesamt acht Studien gefunden, die analysiert und für die Meta-Analyse verwendet wurden. So wurden insgesamt 3241 Patient\*innen inkludiert, wovon bei 1179 ein REBOA gelegt wurde und bei 2062 eine RT durchgeführt wurde.

Die Mortalität wurde in drei Untergruppen aufgeteilt und verglichen. In allen Gruppen war die Mortalität bei Patient\*innen mit REBOA signifikant niedriger als bei Patient\*innen mit Thorakotomie.

1. Mortalität in der Notaufnahme: REBOA: 27,4% vs. RT: 55,1 %; [Risk Ratio (RR) 0.63; CI (0.45, 0.87)] p=0,006.,
2. Mortalität vor Entlassung aus dem Krankenhaus - REBOA: 74,7% vs. RT: 97,2%; [RR 0.86; CI (0.75, 0.98)] p=0,03.
3. Mortalität im Krankenhaus: REBOA: 63,2% vs. RT: 86,9%; [RR 0.80; CI (0.68, 0.95)] p=0,009.

In zwei Studien wurden die Komplikationen bei REBOA und RT untersucht. Von insgesamt 129 REBOA-Patient\*innen entwickelten 6 eine distale Embolie und eine Person erlitt eine Ischämie der Extremitäten. Es waren zwei Angioplastien und eine Amputation erforderlich. Nach einer RT entwickelten vier von 270 Patient\*innen einen retardierenden Hämatothorax. Laut Autor\*innen der Studie ist das Risiko solcher Komplikationen gering und in den meisten Fällen ist eine Rettung der Gliedmaßen durch eine schnelle operative Intervention sehr wahrscheinlich. Somit ist nicht zu erwarten, dass sich die Lebensqualität von Patient\*innen durch die Durchführung von REBOA oder RT verschlechtert.

## **Resuscitative endovascular balloon occlusion of the aorta and resuscitative thoracotomy are associated with similar outcomes in traumatic cardiac arrest (39)**

Diese Studie ist eine prospektive Beobachtungsstudie mit Daten aus sechs US-Level-1 Traumazentren von Mai 2017 bis Juni 2018. Sie fokussierte sich im Speziellen auf Fälle von Patient\*innen, die vor oder während der Blutungskontrolle einen Herz-Kreislaufstillstand erlitten. 72 Patient\*innen wurden eingeschlossen, wovon 26 mit REBOA und 46 mit RT behandelt wurden. Die Krankenhausmortalität betrug bei REBOA 88% und bei RT 93% mit p-Wert von 0,767, womit kein signifikanter Unterschied in der Mortalität zwischen REBOA und RT festgestellt werden konnte.

Patient\*innen, die mittels REBOA versorgt wurden, waren älter, hatten einen höheren Body Mass Index (BMI) und hatten eher kein penetrierendes Trauma erlitten. Auch nach einer bereinigten Analyse blieb die Mortalität zwischen den beiden Gruppen gleichbleibend und es konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. (RR, 0.89; 95%; CI: 0.71–1.12;  $p = 0.304$ ).

Die Studie beinhaltet auch Information über die Komplikation und Probleme bei der Durchführung der Verfahren. Bei sechs Patient\*innen konnte keine Okklusion mittels REBOA erreicht werden. Bei vier Patient\*innen konnte kein arterieller Zugang etabliert werden, bei einer Person rupturierte der REBOA Ballon und ein\*eine Patient\*in verstarb, bevor eine erfolgreiche Anlage durchgeführt werden konnte. Andere Komplikationen wurden in der Studie nicht angeführt.

Die Studie inkludiert die Dauer der verschiedenen Prozedere, wobei REBOA mit einer längeren AO-Zeit assoziiert wurde (REBOA: 7 Minuten vs. RT: 4 Minuten;  $p=0.001$ ). Zusätzlich wurde analysiert, wie viele Bluttransfusionen für Patient\*innen benötigt wurden, wobei ein höherer Bedarf bei REBOA Patient\*innen festgestellt wurde. (4,5 vs. 2,5 Transfusionen;  $p=0,032$ )

## **Impact of resuscitative endovascular balloon occlusion of the aorta (REBOA) in traumatic abdominal and pelvic exsanguination: a systematic review and meta-analysis (40)**

Es handelt sich um einen Systematik-Review mit einer Meta-Analyse. Es wurde im März 2021 in den Datenbanken von PubMed, Scopus und Web of Science gesucht. Insgesamt wurden acht Studien mit einem Gesamtpatient\*innenkollektiv von 3215 Patient\*innen inkludiert. Die Studie betrachtete 24-Stunden-Mortalität als primäres Ziel und hämodynamische Verbesserungen nach dem Eingriff als sekundäres Ziel.

Fünf der acht Studien führten eine 24-Stunden-Mortalität an. Die Ergebnisse der Meta-Analyse der Studien zeigten, dass Patient\*innen, bei denen eine AO durch REBOA erreicht wurde, ein verringertes, wenn auch nicht signifikantes 24-Stunden-Sterberisiko hatten im Vergleich zur Thorakotomie (RR 0.71; 95% CI 0.31–1.63; I<sup>2</sup>: 90.1%; p = 0.416). Die gesamte 24-Stunden-Mortalität aller Studien betrug mit REBOA 23,5% (95% CI 0.15–0.35).

Alle Studien inkludierten die Krankenhausmortalität, wo sich in der Meta-Analyse ebenfalls ein reduziertes, allerdings auch nicht signifikantes Sterberisiko für Patient\*innen mit AO durch REBOA im Vergleich zur RT zeigte (RR 0.90; 95% CI 0.70–1.16; I<sup>2</sup>: 93.5%; p = 0.42). Die gesamte Krankenhausmortalität betrug mit REBOA 58.3% (95% CI 0.47–0.69).

Zusätzlich wurde eine Sensitivitätsanalyse mittels der Leave-One-Out-Methode durchgeführt. Die Leave-One-Out-Methode stellt ein Kreuzvalidierungsverfahren dar, bei dem immer eine andere Studie ausgeklammert und nicht in die Berechnung miteinbezogen wird, um zu überprüfen, wie sich jede einzelne Studie auf das Gesamtergebnis auswirkt. Dadurch konnte bei der 24-Stunden-Mortalität ein signifikanter Überlebensvorteil für Patient\*innen in der REBOA-Gruppe festgestellt werden (RR 0,46; 95% CI 0,27-0,79; I<sup>2</sup>: 55%; p = 0,005).

Bei der Krankenhausmortalität wurde die GOSH-Plot-Analyse für die Sensitivitätsanalyse angewandt. Bei der GOSH-Plot-Analyse wird durch die Visualisierung aller Teildatensätze überprüft, ob eine Heterogenität der Studienergebnisse zu erkennen ist, um potenzielle Einflussfaktoren auf die Gesamtwirkung zu identifizieren. (42)

Dadurch wurden zwei Studien, die die Heterogenität erhöhten, ausgeschlossen. Nach deren Ausschluss konnten keine Unterschiede in der Sterblichkeit zwischen REBOA- und

Kontrollpatient\*innen mit RT festgestellt werden (RR: 0.99; 95% CI: 0.75–1.32; I<sup>2</sup>:73%; p = 0.98). Nach der Sensitivitätsanalyse betrug die gesamte Krankenhausmortalität von REBOA-Patient\*innen 62,7 % (95% CI 0.52–0.72).

In den Studien wurden auch Komplikationsraten analysiert. Bei akuten Nierenverletzungen betrug die Komplikationsrate bei REBOA 10% und bei der Kontrollgruppe 6%. Bei distalen Embolien, lokalen Wundhämatomen und Extremitätenischämien war die Komplikationsrate bei REBOA mit 4,5% vs. 1% auch erhöht.

Dafür zeigte REBOA bei systemischen Komplikationen (akute Nierenverletzung, Sepsis, lokale Wundinfektion, Ischämie der unteren Gliedmaßen, venöse Thromboembolie und Kompartmentsyndrom der Extremitäten) mit 31,3% eine niedrigere Komplikationsrate als die Vergleichsgruppe mit 48%.

## **Balloon Rises Above: REBOA at Zone 1 May Be Superior to Resuscitative Thoracotomy (41)**

Im Rahmen dieser Studie wurde die Datenbank „Aorta Occlusion for Resuscitation in Trauma and Acute Care Surgery“ zwischen 2013 und 2021 ausgewertet. Es wurde eine Unterscheidung hinsichtlich der Behandlung stumpfer und penetrierender Traumata gemacht. Es wurden insgesamt 2134 Patient\*innen ausgewertet, wovon 531 Patient\*innen mit REBOA (408 stumpf, 123 penetrierend) und 1603 Patient\*innen mit RT (595 stumpf, 1008 penetrierend) behandelt wurden.

Die Sterblichkeit lag insgesamt bei 85,9% und im Vergleich schnitt REBOA deutlich besser ab als RT (60,5% vs. 91,7%  $p < 0,001$ ). Auch bei dem Vergleich von penetrierenden und stumpfen Verletzungen zeigte sich REBOA signifikant besser als RT (stumpf 69,9% vs. 94,1%; penetrierend 47,2% vs. 92,4%;  $p < 0,001$ ). Bei Entlassung wiesen die GCS und die Glasgow-Outcomes-Scale-Extended-Scores bei REBOA-Patient\*innen signifikant höhere Werte auf (GCS: REBOA 8 vs. RT 4,  $p < 0,001$ ; GCS-Extended 2 vs. 1,  $p < 0,001$ ).

Zusätzlich wurde eine „inverse probability of treatment weighting“ (IPTW)-Schätzung durchgeführt. Dafür wurden das Alter, die Vitalwerte bei der Aufnahme, der GCS, der systolische BP bei der AO, CRP während der AO, die Bluttransfusionen und der ISS als Merkmale herangezogen.

Bei der Analyse war REBOA mit einer signifikant höheren Überlebenswahrscheinlichkeit als RT, bei stumpfen Traumata (OR 4.7; 95% CI 1.9 - 11.7;  $p < 0.01$ ) und bei penetrierenden Traumata (OR 4.9; 95% CI 1.7 - 14;  $p < 0.01$ ) sowie den anderen Verletzungsspektren, assoziiert.

Außerdem zeigte sich bei der Analyse der AO Zeiten, dass die Krankenhausmortalität nach 90 Minuten Okklusion signifikant höher war als bei 30 Minuten Okklusionszeit, bei stumpfen Verletzungen (OR 4.6; 95% CI 1.5 - 15) und bei penetrierenden Verletzungen (OR 5.4; 95% CI 1.1 - 25).

Die Studie beinhaltet außerdem eine ausführliche Auflistung der Nebenwirkungen, mit einer Unterscheidung von systemischen und verfahrensinduzierten Nebenwirkungen im Vergleich mit dem Verletzungsmuster und der Behandlung (**Abb. 7**).

Im Rahmen von REBOA-Behandlungen wurde bei Patient\*innen häufiger eine distal-arterielle Embolie bzw. Ischämie an den Extremitäten diagnostiziert als bei der RT. Ansonsten konnten keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Amputationsraten sowie systemischer Komplikationen zwischen den beiden Kohorten festgestellt werden.

Ergebnisse	Stumpfes Trauma (N = 1,003; 47.0%)			Penetrierendes Trauma (N = 1,131; 53.0%)		
	Zone I n=408	RT n=595	p-Wert	Zone I n=123	RT n=1008	p-Wert
<b>Komplikationen beim Zugang</b>						
Distale Embolie	11 (5,5)	0	0,021	6 (7,8)	0	0,001
Extremitäten Ischämie	9 (4,5)	0	0,061	4 (5,2)	2 (1,3)	0,093
Notwenige Amputationen	2 (1,0)	0	0,48	1 (1,3)	0	0,329
<b>Systemische Komplikationen</b>						
Akute Nierenverletzung	58 (23,2)	56 (27,9)	0,968	29 (37,7)	44(28,0)	0,135
Lungenentzündung	35 (14,0)	35 (17,4)	0,553	10 (13,0)	28 (17,8)	0,345
Akutes Lungenversagen	37 (14,8)	36 (17,9)	0,827	8 (10,4)	23 (14,6)	0,366
Multiorganversagen	12 (4,8)	25 (12,4)	0,314	6 (7,8)	26 (16,6)	0,072
Sepsis oder septischer Schock	21 (8,4)	22 (10,9)	0,832	22 (28,6)	15 (9,6)	<0,001
Akute Nierenverletzung (Dialysepflichtig)	22 (8,8)	22 (10,9)	0,923	12 (15,6)	18 (11,5)	0,173
Bakteriämie	20 (8,0)	21 (10,4)	0,184	11 (14,3)	12 (7,6)	0,109
Schlaganfall	1 (0,4)	6 (3,0)	0,222	0	7 (4,5)	0,059
Lähmungen	35 (14,0)	35 (17,4)	0,723	2 (2,6)	5 (3,2)	0,581
Herzinfarkt	9 (3,6)	1 (0,5)	0,224	1 (1,3)	3 (1,9)	0,6

Abb. 7: Tabelle mit Nebenwirkungen bei REBOA und RT mit Vergleich von penetrierenden und stumpfen Verletzungen (41)

## Primäres Ziel

Im Hinblick auf die Mortalität schneidet REBOA in Vergleich mit RT in allen Studien besser ab (**Abb. 8**). In vier von sechs Studien zeigt sich eine signifikant niedrigere Sterblichkeit bei Anwendung von REBOA (36–38,41). Auch in den zwei anderen Studien (39,40) schneidet REBOA besser ab, jedoch ließ sich kein signifikanter Unterschied feststellen.

Die niedrigste Mortalität von REBOA wurde bei Granieri et al. (40) mit 59,7% angegeben und die höchste bei Yamamoto et al. (36) mit 96,5%. Die Mortalität von RT lag in allen Studien bis auf bei Granieri et al.(40) bei über 90%. Die Schwankung lag zwischen dem niedrigsten Wert bei Granieri et al. mit 72,8% und dem höchsten Wert mit 99,3% bei Yamamoto et al. (36).

Hervorzuheben ist, dass in keiner der Studien eine signifikante Unterlegenheit des REBOA gegenüber der RT festgestellt werden konnte. Dieses Resultat lässt sich ebenfalls in Studien beobachten, in denen Fälle mit ähnlichem ISS-Score verglichen wurden. Auch in den Studien, in denen speziell die REBOA in ZONE I und RT verglichen wurden, zeigte sich ein Benefit für die Patient\*innen, die mit REBOA behandelt wurden. (37,41)

<b>Studien:</b>	<b>Patient*innen gesamt</b>	<b>Mortalität: REBOA</b>	<b>Mortalität: RT</b>	<b>Signifikanz p-Wert</b>
Yamamoto et al. 2020 (36)	n=1483	96,5%	99,3%	p=0,01
Cralley et al. 2023 (37)	n=991	71,2%	95,2%	p<0,001
Khalid et al. 2022 (38)	n=3241	74,7%	97,2%	p=0,030
Koh et al. 2023 (39)	n=72	88%	93%	p=0,767
Granieri et al. 2022 (40)	n=3027	59,7%	72,8%	p=0,416
Brenner et al. 2024 (41)	n=2134	60,5%	91,7%	p<0,001

*Abb. 8: Mortalität aller Studien im Vergleich*

## **Sekundäres Ziel**

Komplikationen und Nebenwirkungen wurden in vier Studien (37,38,40,41) erhoben. Hier konnte in keiner der Studien ein signifikanter Unterschied im Vergleich nachgewiesen werden. Nennenswert sind allerdings gewisse Unterschiede im Hinblick auf die Nebenwirkungen zwischen den Verfahren.

Im Rahmen der REBOA-Therapie wurden häufiger periphere Embolien und Ischämien der Extremitäten beobachtet, die eine operative Sanierung bis hin zu einem operativen Eingriff mit der Amputation der betroffenen Extremität nach sich zogen.

Auf der anderen Seite wurde bei den Thorakotomien vermehrt über schwerere systemische Komplikationen wie Multiorganversagen berichtet und andere Nebenwirkungen wie ein Hämatothorax waren zu beobachten.

## **Tertiäres Ziel**

Die Durchführbarkeit wurde in den Studien nur peripher behandelt. Dabei stellen vor allem fehlendes Training bzw. mangelnde Routine von durchführenden Ärzt\*innen, im Speziellen im präklinischen Bereich, Probleme der beiden Verfahren dar.

Bei Cralley et al. (37) wurde in der PMS Auswertung auch der\*die behandelnde Arzt\*Ärztin mitberücksichtigt, um die eventuell verschiedenen Erfahrungslevel auszugleichen.

Bei Koh et al. (39) werden eingriffsspezifische Probleme beschrieben, bei denen die Anlage von REBOA in sechs Fällen misslungen ist. In vier Fällen scheiterte die Etablierung eines arteriellen Zugangs, in einem kam es zur Ruptur des REBOA-Ballons und in einem weiteren kam es vor erfolgreicher Anlage zum Tod.

## Diskussion

Die untersuchten Studien stellen REBOA als gute Alternative zu einer Thorakotomie zur temporären Okklusion der Aorta dar. In den Studien wurde allerdings auch teilweise auf schwere Verletzungen bei Patient\*innen der RT-Gruppe verwiesen. Dieses Ungleichgewicht wurde zum Beispiel in Form von PMS-Matching versucht auszugleichen und auch danach präsentierten sich die Patient\*innen der REBOA-Gruppe mit einer niedrigeren Zahl an Verstorbenen.(37)

Die Resultate legen nahe, dass REBOA eine vielversprechende Methode zur Reduktion der Mortalitätsrate bei Traumapatient\*innen mit schwerem hämorrhagischem Schock darstellt. Die Zeit ist der wichtigste Faktor und sollte stets im Vordergrund stehen. Entscheidend ist dabei auch die Länge der Aortenokklusion, die bei beiden Verfahren so kurz als möglich gehalten werden sollte. Eine Dauer der Aortenokklusion von mehr als 60 Minuten steht in signifikantem Zusammenhang mit der Sterblichkeit. (41)

Eine Ergänzung der bisherigen Erkenntnisse stellt die UK-REBOA-Studie von Jansen et al. (6) dar. Sie ist die erste randomisierte kontrollierte Studie (RCT), die die Anwendung von REBOA bei Traumapatient\*innen untersucht. In der Studie wurde REBOA in Kombination mit der Standardversorgung in der Notaufnahme mit der Standardversorgung alleine verglichen. Es stellte sich heraus, dass die Mortalität innerhalb eines Zeitraums von 90 Tagen in der REBOA-Gruppe höher war (54 % vs. 42 %).

Diese Ergebnisse werfen Zweifel an der Effektivität von REBOA auf. Jedoch gibt es einige Kritikpunkte an der Studie, da die Anlage von REBOA in der Notaufnahme durch Notfallmediziner\*innen erfolgte, was zu einer Verzögerung der definitiven Blutungskontrolle führte. Trotz der hohen Relevanz der Studie als erste RCT-Studie in diesem Feld stellt sich die Frage, ob die Ergebnisse anders ausfallen könnten, wenn REBOA so schnell wie möglich und parallel zu chirurgischen Eingriffen in einem hybriden Operationssaal durchgeführt wird. Das Ergebnis unterstreicht auch noch einmal die Wichtigkeit einer schnellstmöglichen Endversorgung, die auch nicht durch eine REBOA-Anlage verzögert werden sollte. Die Studie wurde aufgrund des fehlenden Vergleichs zwischen REBOA und RT nicht in die Analyse des Reviews miteinbezogen.

Bei der Analyse von Komplikationen zeigte sich kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Verfahren. Allerdings wurden bei REBOA häufiger periphere Embolien und Ischämien der Extremitäten festgestellt, die teilweise eine weitere operative Sanierung erforderten. Im Vergleich dazu treten bei der Thorakotomie eher Probleme wie ein Hämatothorax und vermehrt systemische Komplikationen auf (40,41). Daher ist eine sorgfältige Abwägung, ob die Indikation für eines der Verfahren gegeben ist, erforderlich. Die Indikation sollte restriktiv gestellt werden, wobei eine genaue Überlegung, welches der Verfahren einen Benefit für Patient\*innen darstellt, notwendig ist. Speziell bei penetrierenden Verletzungen ist dafür ein hohes Maß an Erfahrung des durchführenden Teams gefordert. Bei komplexen Penetrationsverletzungen ist die Durchführung einer Thorakotomie durch die zusätzlichen Behandlungsoptionen, der Perikardtamponade und der manuellen Herzdruckmassage, eventuell vorteilhaft.

Ein relativ einfaches Arbeitsschema, die richtige Ausrüstung und ein umfassendes Training für das gesamte Team sind für die Durchführbarkeit von REBOA und Thorakotomie im präklinischen- und Schockraum-Setting entscheidend. Die Effektivität des Eingriffs ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig, darunter fallen das Training des Notfallteams, die Bewältigung praktischer Herausforderungen, wie das Arbeiten unter suboptimalen Bedingungen, die zeitliche Effizienz bei der Durchführung sowie logistische und organisatorische Herausforderungen. Zahlreiche Studien und Fallstudien bestätigen die Machbarkeit der Verfahren, allerdings ist weitere Forschung nötig, um praktische Aspekte, erforderliche Ressourcen und Erfolgsraten in realen präklinischen Szenarien zu bewerten und zu optimieren. Nur wenn eine nahtlose Integration in die Rettungskette gelingt, sind die Verfahren vorteilhaft für Patient\*innen.

REBOA stellt eine vielversprechende Ergänzung zu den bestehenden Maßnahmen zur Kontrolle von Blutungen dar. Die niedrigere Sterblichkeitsrate in vielen Studien im Vergleich zur Thorakotomie lässt sich als Argument für eine verstärkte Nutzung von REBOA anführen. Allerdings sollten weitere Studien durchgeführt werden, um die langfristigen Auswirkungen, die optimale Vorgehensweise sowie die Vermeidung von Komplikationen besser zu verstehen.

Aus diesem Grund sollten Rettungsdienste, Krankenhäuser und Trauma-Zentren eng zusammenarbeiten und zusammen mit eingebunden werden. Die Aus- und Weiterbildungen für Notfallteams, wie INTECH Advanced der Universität Heidelberg (43) oder der London's Air Ambulance Pre-Hospital Care Workshop (44) werden in den letzten Jahren vermehrt angeboten. Sie leisten einen wertvollen Beitrag dafür, dass die Verfahren vermehrt und sicherer durch zielgerichtetes Training für Notfallteams präklinisch durchgeführt werden können. Dadurch kann sichergestellt werden, dass diese lebensrettende Maßnahme überall mit einem gleich hohen Standard angewendet wird.

## Schlussfolgerung

Die Analyse von REBOA im Vergleich zur Thorakotomie zur Kontrolle schwerer hämorrhagischer Blutungen hat gezeigt, dass REBOA eine potenziell effektive Maßnahme zur Senkung der Mortalitätsrate darstellt. Die Notwendigkeit einer schnellen finalen Blutungskontrolle ist für einen erfolgreichen Outcome der wichtigste prognostische Faktor für das Überleben von Patient\*innen und sollte daher bei Fragen der Versorgung stets im Vordergrund stehen.

Insgesamt kann REBOA als vielversprechende Ergänzung zu bestehenden Maßnahmen betrachtet werden. Die Implementierung in ein spezialisiertes Notfallsystem mit den entsprechenden Ressourcen ist als sinnvoll zu erachten.

Im besten Fall sollten dabei die Fälle von REBOA- und RT-Anlagen in einem Register gesammelt werden, um eine weitere Reevaluierung zu ermöglichen.

## Literaturverzeichnis

1. Kauvar DS, Lefering R, Wade CE. Impact of hemorrhage on trauma outcome: an overview of epidemiology, clinical presentations, and therapeutic considerations. *J Trauma*. Juni 2006;60(6 Suppl):S3-11.
2. Gedeberg R, Chen LH, Thiblin I, Byberg L, Melhus H, Michaelsson K, u. a. Prehospital injury deaths--strengthening the case for prevention: nationwide cohort study. *J Trauma Acute Care Surg*. März 2012;72(3):765-72.
3. Gupta BK, Khaneja SC, Flores L, Eastlick L, Longmore W, Shaftan GW. The role of intra-aortic balloon occlusion in penetrating abdominal trauma. *J Trauma*. Juni 1989;29(6):861-5.
4. Moore LJ, Brenner M, Kozar RA, Pasley J, Wade CE, Baraniuk MS, u. a. Implementation of resuscitative endovascular balloon occlusion of the aorta as an alternative to resuscitative thoracotomy for noncompressible truncal hemorrhage. *J Trauma Acute Care Surg*. Oktober 2015;79(4):523-30; discussion 530-532.
5. Inoue J, Shiraishi A, Yoshiyuki A, Haruta K, Matsui H, Otomo Y. Resuscitative endovascular balloon occlusion of the aorta might be dangerous in patients with severe torso trauma: A propensity score analysis. *J Trauma Acute Care Surg*. April 2016;80(4):559-66; discussion 566-567.
6. Jansen JO, Hudson J, Cochran C, MacLennan G, Lendrum R, Sadek S, u. a. Emergency Department Resuscitative Endovascular Balloon Occlusion of the Aorta in Trauma Patients With Exsanguinating Hemorrhage: The UK-REBOA Randomized Clinical Trial. *JAMA*. 21. November 2023;330(19):1862-71.
7. Lendrum RA, Perkins Z, Marsden M, Cochran C, Davenport R, Chege F, u. a. Prehospital Partial Resuscitative Endovascular Balloon Occlusion of the Aorta for Exsanguinating Subdiaphragmatic Hemorrhage. *JAMA Surg*. 1. September 2024;159(9):998-1007.
8. Hallmann B, Honnef G, Eibinger N, Eichlseder M, Posch M, Puchwein P, u. a. Resuscitative endovascular balloon occlusion of the aorta for trauma patients with uncontrolled hemorrhage: a retrospective target trial emulation (the AT-REBOA target trial). *Eur J Emerg Med*. :10.1097/MEJ.0000000000001183.
9. Fowler R, Gallagher JV, Isaacs SM, Ossman E, Pepe P, Wayne M. The Role of Intraosseous Vascular Access in the Out-of-Hospital Environment (Resource Document to NAEMSP Position Statement). *Prehosp Emerg Care*. Januar 2007;11(1):63-6.
10. Chest Tube Decompression of Blunt Chest Injuries by Physicia... : *Journal of Trauma and Acute Care Surgery* [Internet]. [zitiert 24. April 2024]. Verfügbar unter: [https://journals.lww.com/jtrauma/abstract/1998/01000/chest\\_tube\\_decompression\\_of\\_blunt\\_chest\\_injuries.10.aspx](https://journals.lww.com/jtrauma/abstract/1998/01000/chest_tube_decompression_of_blunt_chest_injuries.10.aspx)

11. Klopp M, Dienemann H, Hoffmann H. [Treatment of pneumothorax]. *Chir Z Alle Geb Oper Medizen*. Juli 2007;78(7):655–68.
12. Bernhard M, Helm M, Mutzbauer TS, Aul A, Popp E, Doll S, u. a. Invasive Notfalltechniken. *Notf Rettungsmedizin*. August 2010;13(5):399–414.
13. Leidel BA, Kirchhoff C, Braunstein V, Bogner V, Biberthaler P, Kanz KG. Comparison of two intraosseous access devices in adult patients under resuscitation in the emergency department: A prospective, randomized study. *Resuscitation*. August 2010;81(8):994–9.
14. Mutzbauer TS, Keul W, Bernhard M, Völkl A, Gries A. [Invasive techniques in emergency medicine. IV. Cricothyrotomy in emergency situations]. *Anaesthesist*. Februar 2005;54(2):145–54.
15. ERC Guidelines [Internet]. [zitiert 3. Juni 2024]. Verfügbar unter: <https://cprguidelines.eu/guidelines-2021>
16. Schneider N, Küßner T, Weilbacher F, Göring M, Mohr S, Rudolph M, u. a. Invasive Notfalltechniken – INTECH Advanced. *Notf Rettungsmedizin*. 1. März 2019;22(2):87–99.
17. Tsang TSM, Oh JK, Seward JB, Tajik AJ. Diagnostic Value of Echocardiography in Cardiac Tamponade. *Herz*. 1. Dezember 2000;25(8):734–40.
18. Hunt PA, Greaves I, Owens WA. Emergency thoracotomy in thoracic trauma—a review. *Injury*. 1. Januar 2006;37(1):1–19.
19. Rehn M, Davies G, Lockey D. A practical approach to resuscitative thoracotomy. *Surg - Oxf Int Ed*. 1. September 2015;33(9):455–8.
20. Wise D, Davies G, Coats T, Lockey D, Hyde J, Good A. Emergency thoracotomy: “how to do it”. *Emerg Med J*. 1. Januar 2005;22(1):22–4.
21. Hughes CW. Use of an intra-aortic balloon catheter tamponade for controlling intra-abdominal hemorrhage in man. *Surgery*. Juli 1954;36(1):65–8.
22. Chaudery M, Clark J, Wilson MH, Bew D, Yang GZ, Darzi A. Traumatic intra-abdominal hemorrhage control: Has current technology tipped the balance toward a role for prehospital intervention? *J Trauma Acute Care Surg*. Januar 2015;78(1):153.
23. Andres J, Scott J, Giannoudis PV. Resuscitative endovascular balloon occlusion of the aorta (REBOA): What have we learned? *Injury*. 1. Dezember 2016;47(12):2603–5.
24. Shinozuka K, Aoki M, Ishida K, Maruhashi T, Matsumura Y. Indication of Resuscitative Endovascular Balloon Occlusion of the Aorta in Non-Traumatic Hemorrhage. *J Endovasc Resusc Trauma Manag*. 20. Mai 2022;6(1):14–8.
25. Ishida K, Seno S, Maruhashi T, Matsumura Y. Indication of Resuscitative Endovascular Balloon Occlusion of the Aorta in Trauma Patients. *J Endovasc Resusc Trauma Manag*. 20. Mai 2022;6.

26. Knapp J, Bernhard M, Haltmeier T, Bieler D, Hossfeld B, Kulla M. „Resuscitative endovascular balloon occlusion of the aorta“. *Anaesthesist*. 1. April 2018;67(4):280–92.
27. Stannard A, Eliason JL, Rasmussen TE. Resuscitative endovascular balloon occlusion of the aorta (REBOA) as an adjunct for hemorrhagic shock. *J Trauma*. Dezember 2011;71(6):1869–72.
28. Olsen MH, Thonghong T, Søndergaard L, Møller K. Standardized distances for placement of REBOA in patients with aortic stenosis. *Sci Rep*. 7. August 2020;10(1):13410.
29. Tibbits EM, Hoareau GL, Simon MA, Davidson AJ, DeSoucy ES, Faulconer ER, u. a. Stepwise Reperfusion After Zone 1 REBOA: Is Repositioning to Zone 3 a Useful Maneuver? *J Endovasc Resusc Trauma Manag*. 30. September 2018;2(3):95–102.
30. Epstein L, Grigorian A, Matsushima K, Nahmias J, Dilday J, Demetriades D. Propensity Score Analysis of Resuscitative Endovascular Balloon Occlusion of the Aorta: Zone-1 Versus Zone-3 Resuscitative Endovascular Balloon Occlusion of the Aorta Odds of Mortality. *J Surg Res*. März 2024;295:660–5.
31. Roizen MF, Beaupre PN, Alpert RA, Kremer P, Cahalan MK, Shiller N, u. a. Monitoring with two-dimensional transesophageal echocardiography: Comparison of myocardial function in patients undergoing supraceliac, suprarenal-infraceliac, or infrarenal aortic occlusion. *J Vasc Surg*. 1. März 1984;1(2):300–5.
32. Akuter arterieller Extremitätenverschluss - AMBOSS [Internet]. [zitiert 17. Mai 2024]. Verfügbar unter: <https://next.amboss.com/de/article/1h021f#Zdd110fcc52846a4e2af90651b14f265a>
33. Teeter WA, Matsumoto J, Idoguchi K, Kon Y, Orita T, Funabiki T, u. a. Smaller introducer sheaths for REBOA may be associated with fewer complications. *J Trauma Acute Care Surg*. Dezember 2016;81(6):1039–45.
34. Saito N, Matsumoto H, Yagi T, Hara Y, Hayashida K, Motomura T, u. a. Evaluation of the safety and feasibility of resuscitative endovascular balloon occlusion of the aorta. *J Trauma Acute Care Surg*. Mai 2015;78(5):897.
35. PRISMA statement [Internet]. [zitiert 13. Juni 2024]. PRISMA statement. Verfügbar unter: <https://www.prisma-statement.org>
36. Yamamoto R, Suzuki M, Funabiki T, Nishida Y, Maeshima K, Sasaki J. Resuscitative endovascular balloon occlusion of the aorta and traumatic out-of-hospital cardiac arrest: A nationwide study. *J Am Coll Emerg Physicians Open*. 4. Juli 2020;1(4):624–32.
37. Cralley AL, Vigneshwar N, Moore EE, Dubose J, Brenner ML, Sauaia A. Zone 1 Endovascular Balloon Occlusion of the Aorta vs Resuscitative Thoracotomy for Patient Resuscitation After Severe Hemorrhagic Shock. *JAMA Surg*. Februar 2023;158(2):140–50.

38. Khalid S, Khatri M, Siddiqui MS, Ahmed J. Resuscitative Endovascular Balloon Occlusion of Aorta *Versus* Aortic Cross-Clamping by Thoracotomy for Noncompressible Torso Hemorrhage: A Meta-Analysis. *J Surg Res.* 1. Februar 2022;270:252–60.
39. Koh EY, Fox EE, Wade CE, Scalea TM, Fox CJ, Moore EE, u. a. Resuscitative endovascular balloon occlusion of the aorta and resuscitative thoracotomy are associated with similar outcomes in traumatic cardiac arrest. *J Trauma Acute Care Surg.* Dezember 2023;95(6):912.
40. Granieri S, Frassini S, Cimbanassi S, Bonomi A, Paleino S, Lomaglio L, u. a. Impact of resuscitative endovascular balloon occlusion of the aorta (REBOA) in traumatic abdominal and pelvic exsanguination: a systematic review and meta-analysis. *Eur J Trauma Emerg Surg.* 1. Oktober 2022;48(5):3561–74.
41. Brenner M, Zakhary B, Coimbra R, Scalea T, Moore L, Moore E, u. a. Balloon Rises Above: REBOA at Zone 1 May Be Superior to Resuscitative Thoracotomy. *J Am Coll Surg.* März 2024;238(3):261.
42. Olkin I, Dahabreh IJ, Trikalinos TA. GOSH - a graphical display of study heterogeneity. *Res Synth Methods.* September 2012;3(3):214–23.
43. Schneider N, Küßner T, Weilbacher F, Göring M, Mohr S, Rudolph M, u. a. Invasive Notfalltechniken – INTECH Advanced: REBOA, Perikardiozentese und Clamshell-Thorakotomie. *Notf Rettungsmedizin.* März 2019;22(2):87–99.
44. London’s Air Ambulance [Internet]. [zitiert 5. Juli 2024]. Pre-Hospital Care Workshop. Verfügbar unter: <https://www.londonsairambulance.org.uk/news-and-stories/charity/pre-hospital-care-workshop>