

Diplomarbeit

**ECPR – Extrakorporale Reanimation bei Herz-
Kreislauf-Stillstand:
Eine Literaturübersicht und Bewertung der Umsetzbarkeit
eines ECPR-Programms in Graz**

eingereicht von

Martin Hahn

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

unter der Anleitung von

FA Dr. med. univ. Florian Sommerauer

Univ. FA Priv.-Doz. Dr. med. univ. Dr. scient. med. Martin Rief

Graz, 12. Juni 2026

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 12. Juni 2026

Martin Hahn,eh.

Danksagungen

An erster Stelle möchte ich mich herzlich bei Dr. Florian Sommerauer und Dr. Martin Rief für ihre fachliche Unterstützung, ihre wertvollen Anregungen und die konstruktive Begleitung während der Erstellung dieser Arbeit bedanken.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir durch ihre unermüdliche Unterstützung, ihre große Opferbereitschaft und ihr stetiges Engagement mein Studium überhaupt erst ermöglicht haben. Ohne ihren Rückhalt, ihr Vertrauen und die vielen persönlichen Entbehrungen auf ihrem Weg wäre dieser Meilenstein nicht erreichbar gewesen.

Ebenso danke ich meinen Brüdern sowie meiner bezaubernden Lucie, die mich über viele Jahre hinweg unterstützt, motiviert und mir auch in herausfordernden Phasen den nötigen Rückhalt gegeben haben.

Zusammenfassung

Der plötzliche Atem-Kreislauf-Stillstand stellt eine der häufigsten Todesursachen weltweit dar und ist trotz etablierter Reanimationsleitlinien mit einer hohen Mortalität und oft schlechten neurologischen Outcomes verbunden. Die konventionelle kardiopulmonale Reanimation ist in vielen Fällen nicht ausreichend, um eine adäquate Organperfusion langfristig aufrechtzuerhalten. Vor diesem Hintergrund hat sich die extrakorporale Reanimation (ECPR) als potenzielle Erweiterung des Advanced Life Support etabliert. Durch den Einsatz einer extrakorporalen Membranoxygenierung (ECMO) kann eine suffiziente Oxygenierung und Zirkulation sichergestellt werden, wodurch sich neue therapeutische Möglichkeiten ergeben.

Ziel dieser Arbeit ist es, die aktuelle Evidenzlage zur ECPR systematisch darzustellen und auf dieser Grundlage die Umsetzbarkeit eines ECPR-Programms für den Standort Graz zu evaluieren. Im Rahmen einer umfassenden Literaturübersicht wurden zentrale Aspekte wie Prävalenz und Patient*innenselektion, prognostische Outcome-Faktoren, physiologische Parameter während der Reanimation sowie kurz- und langfristige Überlebensraten analysiert. Darüber hinaus wurden organisatorische, ökonomische und strukturelle Voraussetzungen für die Implementierung eines präklinischen ECPR-Programms untersucht.

Die Ergebnisse zeigen, dass ECPR bei streng selektionierten Patient*innen mit potenziell reversibler Ursache des Kreislaufstillstands einen Überlebensvorteil bieten kann. Entscheidende Einflussfaktoren sind insbesondere die Dauer der „low-flow“-Phase, der initiale Herzrhythmus, das Alter sowie präklinische Bedingungen wie eine rasche Laienreanimation. Gleichzeitig ist die derzeitige Evidenz durch eine hohe Heterogenität der Studien, kleine Fallzahlen und methodische Limitationen eingeschränkt (1, 2). Randomisierte kontrollierte Studien liefern bislang keine konsistent signifikanten Vorteile gegenüber der konventionellen Reanimation (3, 4).

Für den Standort Graz zeigt die Analyse, dass die Implementierung eines ECPR-Programms grundsätzlich möglich erscheint, da sowohl infrastrukturelle als auch personelle Ressourcen in Ansätzen vorhanden sind. Allerdings bestehen derzeit keine standardisierten Abläufe oder zentralen Datenerhebungen, was eine strukturierte Umsetzung erschwert. Die potenziellen Fallzahlen sind im internationalen Vergleich gering, wodurch eine Bündelung von Expertise und Ressourcen erforderlich wäre.

Besondere Herausforderungen ergeben sich im Bereich der präklinischen Logistik, der interdisziplinären Koordination sowie der zeitkritischen Durchführung.

Zusammenfassend stellt die ECPR ein innovatives, jedoch hochkomplexes Therapieverfahren dar, dessen Erfolg maßgeblich von strukturellen Rahmenbedingungen und einer präzisen Patient*innenselektion abhängt. Für Graz erscheint eine schrittweise Implementierung mit begleitender Evaluation sinnvoll, um die Effektivität unter lokalen Bedingungen zu prüfen. Weitere qualitativ hochwertige Studien sind notwendig, um die Rolle der ECPR im Gesamtkonzept der Reanimation abschließend zu definieren.

Abstract

Sudden cardiac arrest remains one of the leading causes of death worldwide and is associated with high mortality and frequently poor neurological outcomes despite established resuscitation guidelines. Conventional cardiopulmonary resuscitation is often insufficient to maintain adequate organ perfusion over a prolonged period. In this context, extracorporeal resuscitation (ECPR) has emerged as a potential extension of advanced life support. By using extracorporeal membrane oxygenation (ECMO), sufficient oxygenation and circulation can be achieved, thereby enabling new therapeutic options.

The aim of this thesis is to systematically review the current evidence on ECPR and, based on this, evaluate the feasibility of implementing an ECPR program in Graz. A comprehensive literature review was conducted, focusing on key aspects such as prevalence and patient selection, prognostic outcome factors, physiological parameters during resuscitation, as well as short- and long-term survival outcomes. In addition, organizational, economic, and structural requirements for the implementation of an ECPR program were analyzed.

The results indicate that ECPR may provide a survival benefit in carefully selected patients with potentially reversible causes of cardiac arrest. Key influencing factors include the duration of low-flow time, initial cardiac rhythm, patient age, and prehospital conditions such as early bystander CPR. At the same time, the current evidence is limited by substantial heterogeneity between studies, small sample sizes, and methodological constraints. Randomized controlled trials have not yet demonstrated consistent significant advantages over conventional resuscitation.

For the region of Graz, the analysis suggests that the implementation of an ECPR program appears feasible in principle, as certain infrastructural and personnel resources are already available. However, there are currently no standardized protocols or centralized data collection systems, which complicates structured implementation. Potential case numbers are relatively low compared to international centers, necessitating a concentration of expertise and resources. Major challenges include prehospital logistics, interdisciplinary coordination, and the time-crucial nature of the procedure.

In conclusion, ECPR represents an innovative but highly complex therapeutic approach whose success largely depends on structural conditions and precise patient selection. For Graz, a stepwise implementation accompanied by continuous evaluation appears to be a reasonable strategy to assess effectiveness under local conditions. Further high-quality

studies are required to better define the role of ECPR within the overall concept of resuscitation.

Inhaltsverzeichnis

1	Abkürzungen und deren Erklärung.....	IX
2	Einleitung.....	1
2.1	Hintergrund: Bedeutung des Herz-Kreislauf-Stillstands.....	1
2.2	Limitierung der konventionellen Reanimation (ACLS).....	1
2.3	Einführung in ECPR als potenziell lebensrettende Erweiterung	2
2.4	Zielsetzung der Diplomarbeit	2
2.5	Fragestellung und Aufbau der Arbeit	3
3	Theoretischer Hintergrund.....	4
3.1	Pathophysiologie des Herz-Kreislauf-Stillstands	4
3.2	Grundlagen der extrakorporalen Membranoxygenierung (ECMO)	6
3.3	Definition und Konzept von ECPR	9
4	Evidenzlage zu ECPR: systematische Literaturübersicht.....	14
4.1	Prävalenz und Patient*innenauswahl	14
4.2	Outcome-Faktoren	19
4.3	ROSC und Langzeitüberleben	27
4.4	Kosten und Effizienz	31
4.5	Training, Team und Workflow	33
4.6	Aktuelle Studienlage.....	34
5	Bewertung der Umsetzbarkeit eines ECPR-Programms in Graz	40
5.1	Aktuelle Situation in Graz/ in der Steiermark	40
5.2	Potenzieller Patient*innenpool	42
5.3	Organisatorische Anforderungen.....	44
5.4	Ökonomische Betrachtung	45
5.5	Risikobewertung und Herausforderungen	46
6	Diskussion	49
7	Schlussfolgerung	53
8	Literaturverzeichnis	55

1 Abkürzungen und deren Erklärung

ACS	Acute coronary syndrome
AED	Automated external defibrillator
AKH	Allgemeines Krankenhaus Wien
ALS	Advanced life support
AML	Arzneimittelliste
APP	Advanced paramedic practitioner
ARDS	Acute respiratory distress syndrome
ATP	Adenosintriphosphat
BGA	Blutgasanalyse
CAD	Coronary artery disease
CPC	Cerebral performance categories
CT	Computertomographie
DNR	Do-not-resuscitate
ECMO	extrakorporale Membranoxygenierung
ECPR	Extracorporeal cardiopulmonary resuscitation
EEG	Elektroenzephalographie
EKG	Elektrokardiogramm
ELSO	Extracorporeal Life Support Organisation
ERC	European Resuscitation Council
FIO ₂	inspiratorische Sauerstofffraktion
HDM	Herzdruckmassage
HKL	Herzkatheterlabor
HKS	Herz-Kreislauf-Stillstand
HLM	Herz-Lungen-Maschine
ICER	Incremental cost-effectiveness ratio
ICU	Intensive Care Unit
JuHe	Jumbohelfer*in
LKH	Landeskrankenhaus
LSF	Landesnervenklinik Sigmund Freud
LVEF	linksventrikuläre Ejektionsfraktion
MC	Mediziner corps Graz
MIC	Medical Intervention Car
mRS	Modified Rankin Scale
MRT	Magnetresonanztomographie
NAH	Notarzhubschrauber
NEF	Notarzteinsatzfahrzeug
NFS	Notfallsanitäter*in
NKA	Notfallkompetenz Arzneimittellehre
NKI	Notfallkompetenz Intubation und Beatmung
NKV	Notfallkompetenz Venenzugang und Infusion
NSE	neuronenspezifische Enolase
OR	Odds Ratio
ÖRK	Österreichisches Rotes Kreuz
PaCO ₂	arterieller Kohlenstoffdioxidpartialdruck
PAE	Pulmonalarterienembolie
PCI	perkutane Koronarintervention
PCPC	Pediatric cerebral performance category
PCT	Procalcitonin
PEA	pulslose elektrische Aktivität
pVT	Pulsless ventricular tachycardia
QALY	Quality adjusted life year
RM	Rettungsmediziner*in
ROSB	Return of spontaneous beating
ROSC	Return of spontaneous circulation
RS	Rettungssanitäter*in
RTW	Rettungstransportwagen
SSEP	somatosensorisch evozierte Potenziale
VAD	Ventricular assist device
VA-ECMO	veno-arterielle extrakorporale Membranoxygenierung
VFib	Ventricular fibrillation

VV-ECMOvenovenöse extrakorporale Membranoxygenierung

2 Einleitung

2.1 Hintergrund: Bedeutung des Herz-Kreislauf-Stillstands

In Europa beträgt die Inzidenz des außerklinischen Atem-Kreislauf-Stillstands 55/100.000 pro Jahr. In etwa 20% der Fälle wird initial ein schockbarer Herzrhythmus festgestellt (5). Die Reanimatologie beschäftigt sich seit Jahrzehnten mit unterschiedlichen Therapieformen, um das neurologische Outcome nach Reanimation zu verbessern. In den letzten Jahren wurden Publikationen veröffentlicht, in denen nur circa 10% aller Patient*innen mit guter neurologischer Funktion das Krankenhaus verlassen konnten (5). Die Mortalität bleibt in vielen Regionen und Zentren hoch, obwohl bereits viele Therapieoptionen verbessert wurden und die Etablierung von strukturierten Reanimationsausbildungen weiter vorangetrieben wird. Die „Chain of Survival“ ist dabei bereits mehr in den Fokus gerückt (6). In vielen Fällen sind die zugrunde liegenden Ursachen des Atem-Kreislauf-Stillstands erkennbar, bleiben allerdings trotz Ausschöpfung konventioneller Therapialgorithmen ohne Erfolg. Somit ist die Überlebenschance bei ausgewählten Patient*innen limitiert, könnte jedoch durch die Implementierung invasiver Maßnahmen potenziell verbessert werden.

2.2 Limitierung der konventionellen Reanimation (ACLS)

Ohne mechanische Thoraxkompressionen kommt es in der Regel zum kompletten Erliegen der Perfusion im Atem-Kreislauf-Stillstand. Diese sogenannte „no-flow“-Zeit gilt es so kurz wie möglich zu halten, um die Chancen des Überlebens per se und des Überlebens mit gutem neurologischen Outcome zu verbessern (7). Durch die bereits etablierte Herzdruckmassage wird bei der konventionellen Reanimation versucht, eine Organperfusion zu etablieren, indem durch abwechselndes Ausdrücken und Entlasten des Herzens ein Schlagvolumen erzeugt wird. Der Cardiac Output wird hier auf maximal 20-30% geschätzt (8). Hierbei kann es zu einer inadäquaten Hirnperfusion kommen, was sich negativ auf das neurologische Outcome auswirkt. Auch wenn im Zuge der Reanimation ein Spontankreislauf erreicht werden kann, bedeutet dies nicht automatisch eine ausreichende zerebrale Perfusion. Des Weiteren ist beim therapierefraktären Herz-Kreislauf-Stillstand, bei dem mit einer langen mechanischen Reanimation zu rechnen ist, eine mögliche Rettung der Lebensqualität eingeschränkt. Je kürzer diese Phase mit inadäquater Organperfusion ist, desto eher bestehen Chancen auf ein gutes neurologisches Ergebnis (9). Die

Limitationen der konventionellen Reanimation durch einen geringen Cardiac Output haben zur Entwicklung von invasiveren Therapieoptionen geführt.

2.3 Einführung in ECPR als potenziell lebensrettende Erweiterung

Die extrakorporale kardiopulmonale Reanimation (ECPR) bezeichnet die respiratorische und hämodynamische Unterstützung durch die Anlage einer extrakorporalen Membranoxygenierung (ECMO) während laufender Reanimationsmaßnahmen. Dieses invasive Verfahren ist als zusätzliche Therapiemethode angedacht, um einer bestimmten Patient*innengruppe Behandlungsstrategien zu ermöglichen. Die dadurch sichergestellte Organperfusion sorgt für eine verbesserte Oxygenierung. Der Nachteil der konventionellen Reanimation mit dem niedrigen Cardiac Output wird hier durch den konstanten Fluss der ECMO-Maschine kompensiert. Dabei ist die ECPR allerdings immer nur als ergänzende Therapie zum bestehenden Advanced Life Support zu sehen. Die hohen logistischen und personellen, sowie ökonomischen Anforderungen stellen einen wesentlichen limitierenden Faktor dar, weshalb diese spezielle Therapieform ausschließlich bei selektierten Patient*innen zur Anwendung kommt. Trotz dieser Einschränkungen deutet die zunehmende wissenschaftliche Auseinandersetzung darauf hin, dass die ECPR einen möglichen Paradigmenwechsel in der Behandlung des therapierefraktären Atem-Kreislauf-Stillstands darstellen könnte, indem sie ausgewählten Patient*innen eine zusätzliche Überlebenschance eröffnet (1, 10).

2.4 Zielsetzung der Diplomarbeit

Als Ziel dieser Arbeit wurde im Vorfeld definiert, die aktuelle Evidenzlage zur extrakorporalen kardiopulmonalen Reanimation kritisch zu analysieren und deren potenziellen Stellenwert in der modernen Reanimationsmedizin einzuordnen.

Aufbauend auf dieser Literaturübersicht wird in einem weiteren Schritt die Umsetzbarkeit eines präklinischen ECPR-Programms am Standort Graz bewertet. Hierbei werden sowohl strukturelle und organisatorische Gegebenheiten als auch potenzielle Patient*innenzahlen und logistische Anforderungen berücksichtigt. Ziel ist es, die theoretischen Erkenntnisse aus der aktuellen Studienlage in einen lokalen Kontext zu übertragen und kritisch zu hinterfragen, inwiefern eine Implementierung unter realen Bedingungen sinnvoll und realisierbar erscheint.

2.5 Fragestellung und Aufbau der Arbeit

Aus der zuvor dargestellten Zielsetzung ergeben sich mehrere zentrale Fragestellungen, die im Rahmen dieser Diplomarbeit systematisch behandelt werden sollen. Im Mittelpunkt stehen dabei die Fragen, welche Patient*innen potenziell von einer extrakorporalen Reanimation profitieren können und welche Kriterien für eine sinnvolle Indikationsstellung herangezogen werden sollten. Darüber hinaus wird untersucht, welche Faktoren das Outcome maßgeblich beeinflussen und in welchem Ausmaß zeitliche, physiologische sowie strukturelle Parameter eine Rolle spielen.

Zur Beantwortung dieser Fragestellungen ist die Arbeit in mehrere thematische Abschnitte gegliedert. Zunächst erfolgt eine systematische Darstellung der aktuellen Evidenzlage, wobei insbesondere Prävalenz, Patient*innenselektion und relevante Studienergebnisse aufgearbeitet werden. Darauf aufbauend werden zentrale Einflussfaktoren auf das Outcome näher analysiert, um ein besseres Verständnis für prognostisch relevante Parameter zu schaffen. Im weiteren Verlauf wird die Umsetzbarkeit eines ECPR-Programms am Standort Graz unter Berücksichtigung lokaler struktureller und organisatorischer Gegebenheiten bewertet. Abschließend werden die gewonnenen Erkenntnisse im Rahmen einer Diskussion kritisch eingeordnet und im Hinblick auf ihre Bedeutung für die klinische Praxis reflektiert.

3 Theoretischer Hintergrund

3.1 Pathophysiologie des Herz-Kreislauf-Stillstands

Unter einem Herz-Kreislauf-Stillstand (HKS) versteht man einen abrupten Ausfall der Herzfunktion, wodurch die Pumpleistung und somit der Kreislauf zum Erliegen kommt. Das pathophysiologische Verständnis ist essenziell, um sowohl konventionelle Reanimationsmaßnahmen als auch extrakorporale Verfahren wie die ECPR in ihren Nutzen und Grenzen einordnen zu können. Dem Kreislaufversagen liegt in der Regel eine elektrische oder mechanische Ursache zugrunde. Eine genauere Differenzierung ist unter anderem mittels Elektrokardiogramms (EKG) möglich, wodurch elektrische Potenziale des Herzens erfasst und abgeleitet werden können. Man unterscheidet hier schockbare von nicht schockbaren Herzrhythmen. Sowohl Kammerflimmern (VFib), bei dem eine unkoordinierte und chaotische Aktivität aller Herzzellen ursächlich ist, als auch eine pulslose ventrikuläre Tachykardie (pVT) zählen zu den schockbaren Rhythmen und können durch den Einsatz eines externen Defibrillators potenziell terminiert werden. Erwähnenswert scheint hier, dass nicht jede ventrikuläre Tachykardie mit einem Herz-Kreislauf-Stillstand einhergehen muss. Ist die Füll- und damit Auswurfleistung des Herzens trotz Tachykardie vorhanden, so geht diese VT mit einem Puls einher. Entsprechend ist in diesem Falle eine andere Therapie laut der aktuellen Guidelines des European Resuscitation Council (ERC) notwendig (11). Jedoch sind Patient*innen mit einer pulshaften ventrikulären Tachykardie oft in einer sogenannten Periarrestsituation, in der die Herzfunktion jederzeit sistieren kann und daher ein Herz-Kreislauf-Stillstand zur Folge ist. Zu den nicht schockbaren Herzrhythmen zählen die Asystolie, bei der keine Herzaktivität mehr im EKG nachweisbar ist und somit eine Nulllinie erkennbar ist, und die pulslose elektrische Aktivität (PEA), bei der es eine elektromechanische Entkoppelung gibt. Darunter versteht man zwar ein messbares Potenzial im EKG, jedoch wird diese elektrische Erregung nicht mechanisch vom Myokard umgesetzt, weshalb eine ventrikuläre Kontraktion und somit ein Blutfluss ausbleiben. Zugrundeliegend können hier unterschiedlichste Ursachen sein, wodurch die Pumpfunktion aufgehoben wird. Die Sonographie hat in den letzten Jahren immer mehr Verbreitung in der Notfallmedizin gefunden, wodurch die Echokardiographie während der Reanimation mehr in den Fokus gerückt ist. Dies ermöglicht eine genauere Differenzierung von nicht schockbaren Rhythmen, was wiederum therapeutische Konsequenzen mit sich führt. In manchen Fällen

lässt sich nämlich mittels Ultraschalls erkennen, dass bei Patient*innen mit einer PEA sehr wohl mechanische Aktivität vorhanden ist, die allerdings zu keinem tastbaren Puls führt, da der Auswurf zu gering ist, um eine zentral tastbare Pulswelle entstehen zu lassen (12). Diese Erkenntnis prägt heutzutage den Begriff Pseudo-PEA und ist in der Reanimatologie mit einem besseren Outcome assoziiert als eine klassische PEA (13).

Unabhängig vom zugrunde liegenden Herzrhythmus kommt es bei einem Herz-Kreislauf-Stillstand zu einem abrupten Sistieren des Herzzeitvolumens, wodurch der mittlere arterielle Blutdruck und damit die Durchblutung der Organe zum Erliegen kommen. Dies führt unweigerlich dazu, dass die Sauerstoffversorgung der Zellen unterbrochen ist, was wiederum den aeroben Energiegewinn limitiert. In Folge wird vermehrt anaerob verstoffwechselt, wodurch mehr Laktat anfällt und somit eine metabolische Azidose verursacht wird. Auf zellulärer Ebene kommt es durch die limitierte Verfügbarkeit von ATP zu einer eingeschränkten Aktivität von Ionenpumpen (Na^+/K^+ -ATPase, Ca^{2+} -Pumpen), was wiederum zu einer unphysiologischen Verteilung von Ionen führt. Dies begünstigt weiters Zellschwellung und eine Störung der Membranintegrität. Der Prozess führt anschließend zu einer mitochondrialen Dysfunktion und folglich zu apoptotischem und nekrotischem Zelluntergang. Schlussendlich kommt es zu einer vermehrten Inflammation und einer endothelialen Dysfunktion.

Im Zusammenhang mit diesem pathophysiologischen Vorgang kann es nach erfolgreicher Reanimation zu dem sogenannten „no-reflow“-Phänomen kommen. Darunter versteht man eine fehlende Wiederherstellung der Mikrozirkulation, welche auf endotheliale Schädigung, kapilläre Mikrothromben, Ödeme im Interstitium und Reperfusionsschäden zurückzuführen ist (14). Man kann somit festhalten, dass eine schnelle Rekompensation der Makrozirkulation dazu führt, dass mikrozirkulatorisch weniger Schäden entstehen, was mitunter einen therapeutischen Ansatz der ECPR darstellt.

Auf organischer Ebene ist zu beachten, dass vor allem das Gehirn und das Herz vom Sauerstoffmangel betroffen sind. Beide Organe haben nur eine geringe Toleranz gegenüber anaerobem Stoffwechsel, wodurch Zellen im Vergleich zu Leber und Muskulatur schneller absterben. Hierbei führt vor allem die Ansammlung von Glutamat und Kalzium in den Neuronen zum Zelluntergang. Im Myokard kommt es aufgrund der metabolischen Azidose und der Elektrolytverschiebungen zu einer Verschlechterung der Rhythmusstabilität.

Organschäden sind umso ausgeprägter, je länger die Unterversorgung mit Sauerstoff andauert. Daher spielt die Zeit zwischen Eintreten des Herz-Kreislauf-Stillstands bis hin

zum Wiedereinsetzen der Gewebepерfusion eine entscheidende Rolle. Diese Phase wird in der Literatur oft als „no-flow“-Zeit bezeichnet. Je nach Ätiologie des Herz-Kreislauf-Stillstands kann es in der Realität dazu kommen, dass das Herz noch mit minimalem Auswurf schlägt und somit zumindest eine Restperfusion des Gewebes ermöglicht. Wird dann mit der Reanimation begonnen, verbessert sich auch die Organdurchblutung, sodass zumindest vermehrt Sauerstoff zu den Zellen gelangt. Diese Phase wird als „low-flow“-Zeit beschrieben. Sobald der spontane Kreislauf der Patient*innen einsetzt oder eine extrakorporale Unterstützung implementiert ist, nähert sich die Gewebepерfusion wieder den physiologischen Zuständen an. Das Ziel einer ECPR sollte demnach sein, die „no-flow“- und „low-flow“-Zeiten möglichst kurz zu halten, um so schnell wie möglich eine annähernd physiologische Durchblutung gewährleisten zu können.

3.2 Grundlagen der extrakorporalen Membranoxygenierung (ECMO)

Unter dem Begriff extrakorporale Membranoxygenierung (ECMO) versteht man eine künstliche Möglichkeit, die Herz- und/ oder Lungenfunktion des Körpers zu unterstützen oder im Extremfall zu übernehmen. Ursprünglich wurde die ECMO aus dem Konzept der Herz-Lungen-Maschine (HLM) weiterentwickelt. Letztere wird heute vor allem bei Herz-Operationen eingesetzt, um zum Beispiel Bypass- oder Klappen-Eingriffe durchzuführen. Es geht dabei um eine intraoperative Überbrückung für wenige Stunden, in denen die Herzfunktion vollständig stillgelegt wird (Kardioplegie), um den Herzchirurg*innen optimale Bedingungen zu schaffen. Zum Aufbau dieser HLM gehören eine Pumpe, ein Oxygenator, Schläuche, Konnektoren, Filter, Wärmetauscher, Sensoren, Transducer und Monitore zur Überwachung (15). Im Vergleich zur ECMO kommen hier vor allem Rollerpumpen zum Einsatz. Diese sorgen für einen nicht pulsatilen Blutfluss und bringen ein erhöhtes Risiko einer Hämolyse mit sich, welche jedoch bei einer Laufzeit unter 4 Stunden zu vernachlässigen ist (16). Auch die Traumatisierung des Blutes ist bei Rollerpumpen erhöht (16). Im Vergleich dazu beinhaltet eine ECMO in der Regel Zentrifugalpumpen, welche für eine längere Betriebsdauer besser geeignet, jedoch mit deutlich erhöhten Kosten verbunden sind.

Sowohl die HLM, als auch die ECMO benötigen für ihre Funktion einen Oxygenator, der für die Aufnahme von Sauerstoff und gleichzeitig die Abgabe von Kohlenstoffdioxid verantwortlich ist. Hierbei wird eine semipermeable Membran genutzt, an der der Austausch zwischen Blut und Gasen abläuft. Auch hier ist die Membran der ECMO für

einen längeren Betrieb ausgelegt, während der Oxygenator der HLM nur wenige Stunden ausreichen muss.

Therapeutisch kann eine ECMO genutzt werden, um die Funktion des Herzens und/ oder der Lunge zu übernehmen. Generell unterscheidet man zwei Möglichkeiten, dieses Gerät einzubauen: veno-venös (VV-ECMO) und veno-arteriell (VA-ECMO). Beide Varianten haben gemeinsam, dass das Blut aus einer großen Körpervene, in der Regel aus der Vena femoralis entnommen wird und der ECMO-Maschine zugeführt wird. Bei einer veno-venösen Installation wird das mit Sauerstoff angereicherte Blut anschließend wieder über eine venöse Zufuhr in den Körper geleitet. Somit wird nur die Lungenfunktion ersetzt, der Kreislauf ist nach wie vor von der eigenen Herzleistung abhängig. Im Gegensatz dazu wird auch die Kreislauftsituation durch Anlage einer veno-arteriellen ECMO unterstützt. Hier wird das oxygenierte Blut in der Regel über die Arteria femoralis rückgeführt. Es entsteht dabei ein retrograder Fluss Richtung Aorta und Herz, wodurch die Nachlast deutlich erhöht wird. Das kann unter Umständen dazu führen, dass die eigentliche Herzleistung eingeschränkt wird, da der linke Ventrikel gegen einen erhöhten Druck arbeiten muss. Im schlimmsten Fall ist die linksventrikuläre Auswurfkraft nicht mehr ausreichend, um die Aortenklappe öffnen zu können. Es kann so zu einer Dilatation des Ventrikels kommen. Der Rückstau des Blutes führt zu einer pulmonalen Stase, was im Lungenödem enden kann. Auf der anderen Seite sorgt eine VA-ECMO für eine reduzierte Vorlast des rechten Ventrikels, da das Blut aus dem venösen System angesaugt wird und somit weniger Rückstrom zum rechten Atrium besteht. Dadurch wird auch der pulmonale Blutdruck vermindert.

Die Interaktion zwischen ECMO und nativem Kreislauf ist wesentlich vom eingestellten Flow der ECMO-Maschine und vom verbleibenden kardialen Output abhängig. Je höher der Flow, desto weniger Anteil hat der Nativkreislauf und desto mehr Blut stammt aus dem ECMO-Kreislauf. Dies ist besonders beim sogenannten „Harlequin-Syndrom“ relevant. Ursache hierfür ist die schnellere Erholung der Herzleistung gegenüber der Lunge bei einem kombinierten Herz-Lungen-Versagen. Konsekutiv pumpt der linke Ventrikel schlecht oder nicht oxygeniertes Blut aus dem Lungenkreislauf antegrad gegen den retrograden Fluss der in der A. femoralis liegenden Kanüle. Eine sogenannte Wasserscheide entsteht. Dadurch kann es sein, dass die obere Körperhälfte mit dem gemischten Blut perfundiert wird, während die untere Körperhälfte ausschließlich mit gut oxygeniertem Blut aus der ECMO durchblutet wird. Dieses Phänomen wird in der

Literatur auch als „Nord-Süd-Syndrom“ bezeichnet (17). Bei Auftreten muss auf venovenös umkanüliert werden.

Grundsätzlich ist zu verstehen, dass der Einbau einer extrakorporalen Unterstützung nie als definitive Therapie anzusehen ist. Eine ECMO dient nicht als kuratives, sondern als überbrückendes Verfahren. Hierbei muss eine klare Zielsetzung angestrebt werden, die von ethischen, prognostischen und auch therapeutischen Aspekten geprägt ist. In der Literatur ist oft der Begriff „Bridge-to“ zu lesen. Darunter versteht man die Möglichkeit, mit Hilfe eines extrakorporalen Verfahrens definierte Ziele zu erreichen. Zum Beispiel könnte eine ECMO-Anlage als „Bridge-to-Recovery“ eingesetzt werden. Es wird also durch die Kreislaufunterstützung Zeit gewonnen, die der Körper benötigt, um eine Erholung zu ermöglichen. Gerade Herz- und Lungenfunktion spielen hier eine große Rolle. Eine akute Myokarditis, toxische Kardiomyopathie oder ein Acute Respiratory Distress Syndrom (ARDS) benötigen im klinischen Alltag Zeit, um eine Heilung zu erlauben. Auch externe Umstände wie eine Hypothermie fallen in diese Kategorie. Die ERC Guidelines 2025 empfehlen unter gewissen Voraussetzungen das Verbringen eines Patienten beziehungsweise einer Patientin in ein geeignetes Krankenhaus, welches auch ECMO-Kapazitäten hat (18).

Falls die Ursache oder der Ausgang der Erkrankung noch unklar ist und mehr Zeit für Diagnostik notwendig ist, gibt es auch den Begriff „Bridge-to-Decision“. Typisch wird diese Strategie bei Patient*innen mit unklarem neurologischen Status oder bei fraglicher Reversibilität der Ursache angewandt. Die gewonnene Zeit sollte durch das behandelnde Team genutzt werden, um relevante Diagnostik wie Bildgebung (CT, MRT), Toxikologie und Blutuntersuchungen (unter anderem neurologische Biomarker) zu veranlassen. Auch eine Elektroenzephalographie (EEG) und somatosensorisch evozierte Potenziale (SSEP) spielen hier eine wichtige Rolle. Weiters kann die zusätzliche Zeit genutzt werden, um Angehörigengespräche zu führen.

Unter der Strategie „Bridge-to-Intervention“ versteht man den Einbau einer ECMO, um anschließend gezielt therapieren zu können. Diese Interventionen bedürfen allerdings eines klinischen Zustands, der ohne extrakorporale Unterstützung nicht möglich wäre. Typischerweise findet man diesen Ansatz bei Patient*innen im kardiogenen Schock. Sowohl eine Koronarangiographie beim Myokardinfarkt als auch eine Katheterintervention bei einer Pulmonalarterienembolie (PAE) oder als Überbrückung bis zur Herzoperation gelten als valide Indikationen für diese Therapiestrategie.

Zu guter Letzt wird auch der Begriff „Bridge-to-Transplant“ verwendet. Die ECMO dient hier als Überbrückung, um eine Organtransplantation überhaupt durchführen zu können. Vor allem bei schwer kranken Patient*innen kann dadurch erst ein klinischer Zustand ermöglicht werden, um sie transplantabel zu machen.

3.3 Definition und Konzept von ECPR

Unter der extrakorporalen kardiopulmonalen Reanimation (ECPR) versteht man den Anschluss einer ECMO-Maschine unter laufender Herzdruckmassage mit dem Ziel, die Herz-Lungen-Funktion zu unterstützen bzw. zu ersetzen. Es handelt sich also um eine VA-ECMO. Im Vergleich zur konventionellen Reanimation, bei der durch Herzdruckmassage eine reduzierte Perfusion des Gewebes zustande kommt, kann mittels ECPR eine verbesserte Durchblutung gewährleistet werden. Diese entspricht durch die fehlende Pulsatilität und den retrograden Fluss innerhalb der Aorta nicht der physiologischen Perfusion, sorgt aber dennoch für eine verbesserte Gewebeversorgung. Die Anlage einer extrakorporalen Membranoxygenierung kommt bei unterschiedlichen Erkrankungen zum Einsatz, jedoch ist die Anlage während der laufenden Reanimation insofern zu unterscheiden, dass eine ECPR nicht nur als Ausreizung einer intensivmedizinischen Therapieform, sondern auch als Notfallprozedere zu verstehen ist. Es handelt sich also um ein Prozedere, welches protokollbasiert in den Reanimationsalgorithmus integriert werden kann. Die Anlage unterscheidet sich im Vergleich zu anderen Indikationen (zum Beispiel ARDS) durch den zeitkritischen Charakter und eine differenzierte Zielsetzung. Diese Erkenntnis wurde bereits in den 1960er-Jahren beschrieben (19). In den 1970er-Jahren wurde bereits die erste Fallserie publiziert, die von mehreren Überlebenden berichtet, die via ECPR gerettet wurden (20). Einzug in die ERC Guidelines fand das Thema erst 2015 (21). Seitdem haben viele Länder und Institutionen spezielle Konzepte entwickelt, sodass die ECPR in vielen Systemen nicht mehr wegzudenken ist.

Pathophysiologisch erhofft man sich bei der Durchführung einer ECPR, dass der niedrige Blutfluss, der durch konventionelle Herzdruckmassage entsteht, durch die ECMO-Maschine deutlich verbessert wird und so eine verbesserte koronare und zerebrale Perfusion entsteht. Man geht also davon aus, dass man von einem niedrigen Cardiac Output während der Reanimation zu einer kontrollierten Hochfluss-Perfusion übergeht. Somit soll die Durchblutung und letztlich Sauerstoffversorgung der Zellen wiederhergestellt werden. Auch die CO₂-Elimination wird dadurch verbessert, da hierfür die Lungenfunktion weniger von Bedeutung ist als bei der konventionellen Reanimation.

Das CO₂ muss nämlich nicht zur Lunge transportiert und abventiliert werden, sondern diffundiert über die Membran der ECMO-Maschine. Bei der konventionellen Herz-Druck-Massage entstehen durch das geringe Herzminutenvolumen eine globale Ischämie und konsekutiv eine metabolische Azidose. Diese pathophysiologischen Veränderungen kann man durch Optimierung der Herzkompensation nur bedingt verbessern, wodurch die klassische Reanimation an ihre Grenzen stößt. Die Chance, dass ein „no-reflow“-Phänomen, eine irreversible neuronale Schädigung oder ein Multiorganversagen entstehen, ist also erhöht im Vergleich zur ECPR. Ein besonderer Fokus liegt hier auf der Zeit, denn der zelluläre Schaden steigt, je länger die Durchblutung eingeschränkt ist. Hier wird immer mehr der Begriff „time-limited salvageability“ geprägt, wodurch diese zeitkritische Verminderung von Schäden zum Ausdruck kommt. Die ECPR zielt darauf ab, das Zeitfenster zu verlängern. Unterschiedliche Konzepte sollen dafür sorgen, dass eine künstliche Perfusion schnellstmöglich etabliert wird. Grundsätzlich unterscheidet man folgende Situationen: 1) Einbau der ECMO in der Präklinik, 2) Verbringung der Patient*innen zum nächstgelegenen Krankenhaus, währenddessen die ECMO und das entsprechende Team ebenfalls zu diesem Krankenhaus gebracht wird, oder 3) alternativ der Transport der Patient*innen in ein ECMO-Zentrum, wo in der Notaufnahme oder Intensivstation der Einbau der ECMO vollzogen wird. Diese unterschiedlichen Konzepte hängen von einigen Faktoren ab. Unter anderem ist das präklinische Rettungssystem von entscheidender Rolle. 1) Je nach Ausbildung und Verfügbarkeit kann es Sinn machen, bereits außerhalb des Krankenhauses eine ECPR durchzuführen. Allerdings muss hier beachtet werden, dass der Einbau einer extrakorporalen Membranoxygenierung viel Expertise und Übung verlangt. Viele deutschsprachige Rettungsdienste beinhalten Anästhesist*innen, welche als Notärzt*innen mit einem Notarzteinsetzfahrzeug (NEF) unterwegs sind. Je nach vorgegebenen Protokollen kann es sein, dass bei dem Gefäßzugang für die ECMO ultraschallgezielt punktiert wird und dann mittels Seldinger-Technik die Schleusen eingeführt werden oder eine chirurgische Präparation und anschließende Punktion notwendig wird. Für Nicht-Chirurg*innen kann der Gefäßzugang durchaus eine Herausforderung darstellen. Mit dem entsprechenden Training kann allerdings dennoch für eine ausreichende Erfolgsquote gesorgt werden (22). Weiters benötigt man durchaus eine gewisse Erfahrung um Routine in solchen speziellen Situationen zu entwickeln. Die ELSO Guidelines geben hier keine explizite Fallzahl vor, um diese Intervention ausreichend trainiert zu haben (23). Auch das notwendige Material

muss eigens in der Präklinik mitgeführt werden, wodurch natürlich auch hohe Kosten entstehen. Dennoch gibt es immer mehr Rettungsdienste weltweit, die für eine präklinische ECPR gerüstet sind. Prominent ist zum Beispiel die Pariser Rettung, die bereits seit 2011 ECMO-Maschinen mitführt (24). Auch im deutschsprachigen Raum gibt es mittlerweile etablierte präklinische ECPR-Systeme. Seit 2019 führt das „Medical Intervention Car“ (MIC) in Heidelberg eine ECMO mit (25). Dieses Fahrzeug wird bei bestimmten Indikationen alarmiert und fährt zusätzlich zu den üblichen Rettungsfahrzeugen zum Notfall, um bei definierten Situationen zusätzliche Interventionen (wie der Einbau einer ECMO) setzen zu können. Mittlerweile gibt es in Deutschland auch in Stuttgart, Gießen und Kaiserslautern ein MIC. Seit Mai 2025 führt auch die London Air Ambulance, die eigentlich nur zu schwerwiegenden Trauma-Patient*innen fliegt, eine ECMO-Maschine für etwaige ECPR-Fälle mit (26).

2) Als alternatives System kann es auch sinnvoll sein, reanimationspflichtige Patient*innen unter laufender Herzdruckmassage (HDM) in das nächstgelegene Krankenhaus zu bringen, auch wenn dort keine ECPR-Kapazitäten vorhanden sind. Die zusätzlichen Ressourcen wie ärztliches Personal, Medikamente oder Blutprodukte können in bestimmten Fällen hilfreich sein. Gleichzeitig sollte aber parallel ein ECMO-Team alarmiert werden, welches sich ebenfalls auf den Weg zum Krankenhaus macht. Das Ziel wäre eine Überbrückung der Zeit, bis das ECMO-Team eintrifft und eine ECPR durchführen kann. Solche Rendezvous-Systeme wurden schon in einigen Ländern ausprobiert und sind vor allem dort sinnvoll, wo es viele kleinere Krankenhäuser gibt, die man schnell erreichen kann, und maximalversorgende Krankenhäuser weiter entfernt liegen. Eine in Sydney, Australien durchgeführte Studie zeigte eine deutliche Steigerung der potenziellen Patient*innen bei der Einführung eines Rendezvous-Systems für die Durchführung einer ECPR (27). Als möglicher Nachteil könnte man das Fehlen der gewohnten Arbeitsumgebung diskutieren. Gerade bei so invasiven Prozeduren kann ein fremdes Milieu zu mehr Fehlern führen. Außerdem ist der Einbau einer ECMO-Maschine immer als interdisziplinäres Prozedere zu sehen. Ein Faktum, dass beim Arbeiten zwischen unbekanntem Personal erschwerend dazu kommen kann. Prinzipiell versucht man durch dieses System die Zeit zu verkürzen, bis der künstliche Kreislauf etabliert ist. Allerdings kann es natürlich in Einzelfällen dazu führen, dass durch die Wartezeit auf das ECMO-Team wertvolle Minuten vergehen und so eine Verlängerung der „low-flow“-Zeit entsteht. Sobald die ECPR erfolgreich etabliert wurde,

können Patient*innen falls notwendig in ein größeres Krankenhaus mit erweiterten diagnostischen und therapeutischen Möglichkeiten transferiert werden.

3) Wiederum als Alternative kann auch probiert werden, Patient*innen unter laufender Reanimation in ein Krankenhaus zu bringen, welches ECPR-Kapazitäten hat, um dort unter kontrollierten Bedingungen eine ECMO einzubauen. Dieses Konzept ist auf Spitäler beschränkt, welche die nötige Erfahrung und Materialien haben. Es wird also in der Regel nur möglich sein, Patient*innen in Maximalversorger zu verbringen, welche oft weiter entfernt sind. Die „low-flow“-Phase wird also durch den Transport deutlich verlängert, dafür profitieren die behandelnden Ärzt*innen von der gewohnten Umgebung und den vielen therapeutischen Möglichkeiten, die es in kleineren Krankenhäusern nicht gibt. Weiters können große Spitäler mit etwaigen Komplikationen umgehen, für die kleinere Krankenhäuser nicht die notwendige Infrastruktur haben. Aus Sicherheitsgründen sollte während des Transportes eine mechanische Unterstützung für die Herzdruckmassage benutzt werden, um das Personal zu schützen, auch wenn die derzeitige Datenlage keinen signifikanten Unterschied für das Outcome zeigt (28). Am Zielkrankenhaus angekommen sollten die Patient*innen schnellstmöglich mit einer ECMO versorgt werden, um das Outcome zu verbessern. Dafür sind in der Regel vordefinierte Protokolle in der Notaufnahme oder Intensivstation notwendig. Ähnlich wie bei einer traumatischen Schockraumalarmierung sollte das Personal ehestmöglich vor verständigt werden, sodass Team und Material bis zur Ankunft der Patient*innen anwesend und vorbereitet sind (29). Unabhängig von der jeweiligen ECPR-Strategie gibt es ein universales Ziel: die Entkoppelung der Reanimation von der Ursachenbehandlung. Gerade hier sind Begriffe wie „Bridge-to-Decision“ beziehungsweise „Bridge-to-Intervention“ von zentraler Bedeutung. Dieses Prinzip spielt natürlich auch eine Rolle bei der Wahl der richtigen ECPR-Strategie, denn je nach Erkrankung müssen Patient*innen einer entsprechenden Therapie unterzogen werden, die unter Umständen nicht in jedem Spital angeboten wird. Die künstliche Perfusion gibt dem behandelnden Team Zeit, um Diagnostik und Therapie anzupassen. So kann zum Beispiel eine Computertomographie ermöglicht oder eine Koronarangiographie, beziehungsweise Thrombektomie durchgeführt werden.

Trotz vieler Behandlungsmöglichkeiten muss dennoch klar festgehalten werden, dass eine ECPR nicht für alle Patient*innen sinnvoll erscheint. Wenn bereits ein irreversibler Hirnschaden entstanden ist oder keine reversible Ursache identifizierbar ist, führt es für die Patient*innen zu keinem Therapieerfolg. Gerade bei langen „no-flow“- beziehungsweise

„low-flow“-Zeiten ist ein neurologisch gutes Outcome unwahrscheinlich. Weiters kann die Regenerationsfähigkeit durch vorbestehende Komorbiditäten eingeschränkt sein, was wiederum eine invasive ECMO-Therapie hinterfragen lässt. Eine erfolgreiche ECPR-Therapie wird also vor allem bei Patient*innen mit klarer reversibler Ursache, geringer „no-flow“- beziehungsweise „low-flow“-Zeit und ausreichend biologischen Reserven für eine anstehende Genesung erfolgreich sein. Letzteres legt auch einen wichtigen Grundstein für diese Therapie: nicht das Erreichen eines Return of spontaneous circulation (ROSC) um jeden Preis, sondern das gute neurologische Outcome ist für diese Patient*innen von Bedeutung, um sich weiterhin an einer funktionellen Lebensqualität erfreuen zu können.

4 Evidenzlage zu ECPR: systematische Literaturübersicht

4.1 Prävalenz und Patient*innenauswahl

ECPR gilt als Intervention, die sicher nicht bei allen Patient*innen zum Erfolg führen kann. Die aufwendige Installation und Durchführung verdeutlicht die Notwendigkeit, bereits frühzeitig die Kriterien der Patient*innenauswahl zu definieren, um so einen tatsächlichen Nutzen dieses Verfahrens zu ermöglichen. Dieser Aspekt war vor allem zu Beginn der ECPR von Bedeutung. Anfangs wurde ein Konzept geschaffen, um in bestimmten Situationen weitere Therapieoptionen zu ermöglichen, ohne dafür wissenschaftliche Grundlagen zu haben. Nur durch stetige wissenschaftliche Evaluierung kommt zunehmend Evidenz hinzu, wodurch alte Paradigmen überarbeitet werden. Speziell bei der Patient*innenauswahl hat sich in den letzten Jahren immer mehr herausgestellt, dass die extrakorporale Reanimation einer besonderen Selektion bedarf. Dies lässt sich unter anderem dadurch erklären, dass bei der Durchführung einer ECPR viele Ressourcen notwendig sind. Nicht nur das tatsächliche Material für den Einbau, sondern auch das geschulte prä- und innerklinische Personal fordert einen großen zeitlichen und finanziellen Aufwand. Zudem ist die Versorgung nach ROSC sehr intensiv und verursacht hohe Kosten. Eine ECPR kann daher nicht als Massenintervention angesehen werden. Der potenziell große Nutzen gilt nur einer kleinen Patient*innengruppe.

Wenn die Auswahl so eine entscheidende Rolle spielt, stellt sich natürlich die Frage, wie viele Patient*innen überhaupt für eine potenzielle extrakorporale Reanimation geeignet wären? Tatsächlich ist es gar nicht so einfach, eine Antwort darauf zu finden. In Österreich existiert kein einheitliches Reanimations-Register, wo solche Daten eingegeben werden. Wenn überhaupt, werden solche Informationen nur für lokale Datenbanken einzelner Krankenhäuser oder Rettungsdienste gesammelt, welche allerdings oft nicht miteinander kompatibel sind, da unterschiedliche Daten eingegeben werden. Der europäische Rat für Wiederbelebung geht in den ERC Guidelines 2025 davon aus, dass die Inzidenz des präklinischen Herz-Kreislauf-Stillstandes circa 55 pro 100.000 Einwohner*innen beträgt, wovon sich etwa 20% mit einem schockbaren initialen Rhythmus präsentieren. Des Weiteren erwähnen die ERC Guidelines, dass circa 1,5 bis 2,8 Atem-Kreislauf-Stillstände pro 1000 Krankenhausaufnahmen stattfinden (5). Davon sind natürlich nicht alle

Patient*innen geeignete ECPR-Kandidat*innen. Ein verpflichtendes flächendeckendes europäisches Reanimationsregister besteht derzeit nicht. Jedoch gibt es immer wieder Bestrebungen, europaweite Daten zu erheben, um die Epidemiologie genauer zu erforschen (30). Für den deutschsprachigen Raum gibt es ein eigenes Reanimationsregister, welches allerdings bei weitem nicht von allen Rettungs- und Krankenhausbetreiber*innen befüllt wird. Dieses Register veröffentlicht jährlich einen Bericht. Dementsprechend gab es 2024 eine Inzidenz von 80,1 außerklinischen Reanimationen pro 100.000 Einwohner, wovon 21,5% einen initial schockbaren Rhythmus hatten (31). Innerklinisch waren es 5810 dokumentierte Herz-Kreislauf-Stillstände, welche in 179 Kliniken stattfanden (32). Bereits in früheren Jahren gab es vergleichbare Zahlen, was für eine gewisse Konstante der wissenschaftlichen Erfassung spricht (33). Durch die gesellschaftlichen und gesundheitspolitischen Ähnlichkeiten zwischen Österreich und Deutschland ist anzunehmen, dass die Zahlen auf die österreichische Bevölkerung zu skalieren wären. In Wien wird bereits ein Reanimationsregister mit Daten des präklinischen Rettungsdienstes in Kombination mit innerklinischen Daten ermittelt. Eine retrospektive Untersuchung zeigte zwischen Jänner 2019 und Dezember 2023 eine Inzidenz an nicht-traumatologischen Atem-Kreislauf-Stillständen von 77,1 pro 100.000 pro Jahr. Allerdings muss hier betont werden, dass die Stadt Wien durch ihre Größe und geographische Aufteilung nicht mit dem Rest Österreichs vergleichbar ist. Gerade in ruralen Gegenden Österreichs kann die Inzidenz stark abweichen. Außerhalb Wiens und den umliegenden Bezirken ist die österreichische Geografie stark durch alpine Eigenschaften und daher veränderte Bevölkerungszahlen geprägt. Innerhalb Wiens wurde von August 2013 bis Juli 2014 ermittelt, wie viele Patient*innen durch eine „load and go“-Strategie für eine potenzielle innerklinische ECPR-Durchführung in Frage kommen würden. 55 von 948 Fällen (6%) aller prähospitalen Stillstände hätten damals die Kriterien für dieses Konzept erfüllt (34). Hier wurden ausschließlich initial schockbare Rhythmen berücksichtigt. Eine weitere retrospektive Untersuchung aus Nordamerika untersuchte von Juni 2007 bis Juli 2010 alle potenziellen prähospitalen ECPR-Patient*innen. Von den 11.368 nicht-traumatologischen Atem-Kreislauf-Stillständen wären 10,9% für die Anlage einer ECMO geeignet gewesen. Hier wurden allerdings auch nicht-schockbare Herzrhythmen berücksichtigt (35). Weiters wurde auch 2022 eine Publikation aus den USA veröffentlicht, in der mittels geografischem Informationssystem eine Berechnung der potenziellen ECPR-Patient*innen erfolgte. Daraus ergab sich, dass circa 3,76% aller präklinischen Reanimationen in Frage

kommen würden (36). Auch hier ist wieder die Auswahl der Patient*innen zu beachten, denn es wurden hier nur schockbare Rhythmen gezählt. Zudem musste unter anderem der Stillstand beobachtet sein und sofort mit der Laien-Reanimation begonnen werden, um in die Studie aufgenommen zu werden. Außerdem wurden nur Fälle untersucht, bei denen eine suspektierte kardiale Ursache zugrunde lag, was die Indikation der ECPR natürlich stark einschränkt. Eine ähnliche Überlegung wurde auch in Schottland analysiert. Hier wurde der Zeitraum von August 2018 bis März 2022 untersucht und dabei festgestellt, dass 21,2% der Fälle für eine ECMO-Anlage geeignet wären (37). Hierfür wurden die Kriterien unter anderem so definiert, dass Kammerflimmern, eine ventrikuläre Tachykardie oder pulslose elektrische Aktivität vorhanden sein mussten.

Man kann also festhalten, dass retrospektive Untersuchungen, sowie Computer-basierte Analysen durchaus unterschiedliche Ergebnisse aufzeigen können. Zudem können durchaus Varianzen zwischen einzelnen Ländern beziehungsweise geografischen Regionen geben. Entscheidend für eine einheitliche Auswertung sind sicherlich dieselben Auswahlkriterien für den Einsatz der ECPR.

Die tatsächliche Durchführbarkeit der extrakorporalen Reanimation hängt sehr mit der zurückgelegten Distanz und damit verbunden mit der verstrichenen Zeit bis zum Einbau der ECMO zusammen. In urbanen Regionen gibt es in der Regel eine höhere Dichte an Krankenhäusern, wodurch auch mehr Infrastruktur zur Verfügung steht. In Sydney gab es diesbezüglich 2022 eine Untersuchung, in der die Erreichbarkeit von potenziellen ECPR-Patient*innen analysiert wurde. Dabei konnte festgestellt werden, dass die fünf größten Krankenhäuser der Stadt, die innerklinisch extrakorporale Reanimationen durchführen, von circa 811.091 Patient*innen in unter 10 Minuten Transportzeit erreicht werden konnten. Bei einer Ausweitung auf insgesamt 26 Notaufnahmen, die mittels Rendezvous-Szenario erreicht werden könnten, würden bis zu 2.175.096 Patient*innen in angedachter Zeit eine ECPR erhalten. Die größte Steigerung konnte durch eine Ausweitung der ECPR in die Präklinik erbracht werden. Hier würden bis zu 3.851.727 potenzielle Patient*innen erreicht werden (27). Natürlich spiegeln diese großen Zahlen keine tatsächliche Prävalenz wider, sondern verdeutlichen lediglich den Zusammenhang zwischen den Ressourcen einer Großstadt und den dadurch möglichen Fallzahlen eines ECPR-Programmes. Aber auch in einer Millionenstadt gibt es infrastrukturelle Grenzen, die den Einsatz der extrakorporalen Reanimation limitieren. Beim Versuch, die „low-flow“-Zeit möglichst kurz zu halten, wurde in London die „Sub30“-Studie durchgeführt, mit dem Ziel, die Durchführbarkeit der

präklinischen ECMO-Anlage in unter 30 Minuten zu zeigen, um so die Zeit zwischen Eintritt des Atem-Kreislauf-Stillstands bis zum etablierten ECMO-Fluss möglichst gering zu halten. Im 13-monatigen Durchführungszeitraum, welcher durch die Covid-19 Pandemie für mehrere Monate unterbrochen war, konnten dabei 43 Patient*innen identifiziert werden, zu denen ein ECPR-Team bestehend aus einem „advanced paramedic practitioner“ (APP), einem „consultant in pre-hospital emergency medicine“ und zwei „senior consultant in intensive care medicine“ disponiert wurde. Schließlich wurden von diesen 43 Patient*innen nur sechs femoral kanüliert, wobei wiederum eine Person einen ROSC vor Anschluss der ECMO erzielte. Von den fünf tatsächlichen ECPR-Patient*innen überlebten zwei bis zur vordefinierten 90-Tage-Grenze, wobei das neurologische Outcome mit einem CPC-Score (cerebral performance categories) von 3 und mRS-Score (modified Rankin scale) von 4 bzw. 5 stark eingeschränkt war. Es wird hier also aufgezeigt, dass auch in einer Millionenstadt wie London der präklinische Einsatz der ECPR zeitlich sehr limitiert sein kann, zumindest bei so eng bemessenen Einschlusskriterien.

Neben dem Faktor Zeit, der vor allem durch geografische Aspekte beeinflusst wird, spielt auch der Herzrhythmus eine große Rolle bei der Auswahl der Patient*innen. Eine retrospektive Auswertung des ELSO-Registers (Extracorporeal Life Support Organisation) verdeutlicht, dass der initiale Herzrhythmus Einfluss auf das Outcome hat und somit auch bei der Auswahl der Patient*innen von Bedeutung ist. 3.382 Fälle wurden hierbei analysiert. Bei initialem Kammerflimmern oder einer pulslosen ventrikulären Tachykardie wurden bessere Überlebenschancen erzielt als bei einer pulslosen elektrischen Aktivität oder Asystolie. Des Weiteren wurde auch untersucht, wie der Rhythmus unmittelbar vor der Kanülierung mit dem Überleben zusammenhängt. Patient*innen, welche weiterhin einen schockbaren Rhythmus zeigten, hatten die besten Überlebenschancen, gefolgt von jenen, welche von einem nicht-schockbaren zu einem schockbaren Rhythmus wechselten. Eine Asystolie zum Zeitpunkt der Kanülierung war mit dem schlechtesten Ergebnis assoziiert (38). Auch eine andere Publikation verdeutlicht den Stellenwert des Herzrhythmus bei der ECPR. Eine systematische Übersichtsarbeit mit Metaanalyse aus dem Jahr 2023 untersuchte 29 Studien mit insgesamt 7.397 Patient*innen. Untersucht wurden prognostische Faktoren, die mit gutem neurologischem Outcome assoziiert waren. Das Vorhandensein eines schockbaren Rhythmus zeigte hier einen deutlichen Vorteil im Vergleich zum nicht-schockbaren Rhythmus. Eine Odds Ratio (OR) von 2,79 verdeutlicht dieses Ergebnis (39). In dieser Analyse wird aber nicht explizit

erklärt, zu welchem Zeitpunkt der Herzrhythmus angegeben wurde. Es ist also nicht klar, ob es der initiale Rhythmus war oder kurz vor der Kanülierung. Auch ein möglicher Wechsel der Herzrhythmen wird nicht beschrieben.

Tran et al. untersuchten in dieser Publikation auch sogenannte „patient factors“, also Eigenschaften, die die Patient*innen beschreiben und das Outcome beeinflussen können, ohne durch die tatsächlichen Reanimationsbemühungen zu verändert werden zu können. Ein gutes Beispiel stellt hier das Alter dar. Bei der Metaanalyse wird klar, dass ein jüngeres Patient*innenalter auch mit einem besseren Outcome assoziiert ist. Das ist pathophysiologisch gut erklärbar, da jüngere Menschen eine bessere zerebrale Autoregulation und in der Regel auch über gesündere Gefäße verfügen. Atherosklerose äußert sich überwiegend bei älteren Personen und kann die Organperfusion einschränken. Weiters verfügen junge Menschen über eine bessere Myokardfunktion und können sich daher besser von möglichen Herzzellschäden erholen. Auch die geringere Komorbidität spielt hierbei eine entscheidende Rolle, da unter anderem eine chronisch-obstruktive Lungenerkrankung (COPD), eine vorbekannte Herzinsuffizienz oder eine chronische Niereninsuffizienz wesentlich die Fähigkeit der Regeneration limitieren kann.

Letztendlich muss jedes System sicherstellen, dass es vordefinierte Selektionskriterien gibt, die eine Patient*innenauswahl anhand klarer Vorgaben ermöglicht. Dies sollte sowohl inner-, als auch präklinisch umgesetzt werden. Die Berufsrettung Wien hat gemeinsam mit der Notaufnahme des Allgemeinen Krankenhauses Wien (AKH) eine Checkliste entwickelt, anhand deren die Auswahl bereits durch den Rettungsdienst präklinisch erfolgt und dann den Transport unter laufender Reanimation nach sich zieht. Bereits 2020 wurde hierzu eine Publikation veröffentlicht, die retrospektiv die Auswahl untersuchte. Damals wurden die Kriterien für eine mögliche ECPR wie folgt definiert: beobachteter Herz-Kreislauf-Stillstand, Beginn der Laienreanimation oder erster Kontakt mit medizinischem Personal innerhalb der ersten fünf Minuten, schockbarer Herzrhythmus, Alter unter 70 Jahren, endtidales CO₂ über 14 mmHg, Pupillen nicht anisokor, entrundet oder weit. Die retrospektive Analyse machte deutlich, dass das Erfüllen aller Kriterien zu einem signifikanten Unterschied im Hinblick auf das 30-Tage-Überleben zeigte. Des Weiteren hatten Patient*innen, welche nicht alle Voraussetzungen erfüllten, eine erhöhte Mortalität nach Beginn der ECPR (40). Bereits zwei Jahre später wurde von der Notaufnahme des AKHs eine Checkliste mit einem Akronym veröffentlicht, welches bei der Auswahl der Kandidat*innen helfen sollte: A₂BCDE₃. Als Anlehnung an das bekannte ABCDE-

Schema, welches bei der Bewertung aller Notfallpatient*innen eingesetzt wird, soll somit eine Merkhilfe bei der Entscheidung einer etwaigen ECPR helfen. Dabei wurden die früheren Auswahlkriterien als Grundlage genutzt und um folgende Faktoren ergänzt: Aktivität im Sinne von offensichtlichen Lebenszeichen während der CPR aber auch als sonographisch bestätigte Restaktivität des Herzens, die entsprechend bei einer Pseudo-PEA zu sehen wäre. Des Weiteren wurden auch PEA mit einer Herzfrequenz über 60/min eingeschlossen. Der endtidale CO₂-Wert verändert, sodass man ab 10 mmHg prinzipiell ECPR-tauglich wäre. Schließlich muss die Zeit zwischen Beginn des Stillstandes bis zur ECPR geschätzt werden, welche mit 60 Minuten begrenzt war. Vorbekannte Erkrankungen im Endstadium sowie mögliche vorhersehbare Komplikationen wurden als Ausschlusskriterien definiert (41). Diese standardisierte Entscheidungsfindung ermöglicht den Sanitäter*innen und Notärzt*innen eine schnelle Evaluierung und vermeidet gleichzeitig subjektive Einzelfallentscheidungen.

Im Falle Wiens sollte spätestens nach dem dritten Rhythmuscheck eine Entscheidung getroffen werden. Je früher die Auswahl getroffen wird, desto kürzer kann die „low-flow“-Zeit gehalten werden. Jedoch birgt eine zu frühe Entscheidung auch das Risiko, die Therapie zu vorschnell einzuschränken. Grunau & Yannopoulos zeigen 2026 mit einer Publikation auf, dass die Patient*innenauswahl ein dynamischer Bewertungsprozess sein sollte, bei dem auch der zeitliche Verlauf eine Rolle spielt. Zum Beispiel wird hierbei auf einen möglichen Wechsel des Herzrhythmus oder Reaktion auf die Therapie eingegangen. Eine fortlaufende Evaluierung sollte daher angestrebt werden, um sowohl eine Untertriagierung geeigneter Patient*innen, als auch eine Übertriagierung prognostisch ungünstiger Fälle zu vermeiden (42).

4.2 Outcome-Faktoren

Der aufwendige Einbau einer ECMO-Maschine während der Reanimation macht natürlich nur Sinn, wenn dadurch ein besseres Ergebnis erzielt werden kann, im Vergleich zu einer konventionellen Reanimation. Es gibt viele Möglichkeiten, das Outcome der Patient*innen zu beschreiben. Viele Studien nehmen hierfür das 30-Tage-Überleben, da es leicht zu messen ist und in dieser Zeit viele Komplikationen auftreten, die das Outcome wesentlich beeinflussen. Jedoch ist die Nachbehandlung einer ECPR von vielen Faktoren, unter anderem der Ätiologie des Stillstandes, abhängig und kann durchaus Monate lang sein. Außerdem kann das reine Überleben mit modernen gesellschaftlichen Ansprüchen nicht als einziges Ziel definiert werden. Die neurologische Funktionalität eines Menschen sollte

heutzutage als Maßstab genommen werden, um das Outcome bestmöglich zu beschreiben. In der Regel wird dies durch Scores untersucht, um eine überregionale Vergleichbarkeit zu schaffen. Mittels CPC-Score und mRS hat man bekannte Evaluierungsmöglichkeiten für die neurologische Funktionalität. Die CPC Klassifikation stellt dabei ein einfaches und international etabliertes Instrument dar, welches die neurologische Funktionalität in fünf Kategorien einteilt. CPC 1 beschreibt ein gutes neurologisches Outcome ohne wesentliche Einschränkungen, während CPC 2 leichte neurologische Defizite bei erhaltener Selbstständigkeit umfasst. CPC 3 steht für schwere neurologische Einschränkungen mit Abhängigkeit im Alltag, CPC 4 beschreibt einen vegetativen Zustand und CPC 5 entspricht dem Tod der Patient*innen. Aufgrund ihrer einfachen Anwendbarkeit wird die CPC-Skala besonders häufig in Studien zur Reanimation verwendet, wobei CPC 1 und 2 als „gutes neurologisches Outcome“ definiert werden. Im Vergleich dazu erlaubt die Modified Rankin Scale eine differenziertere Beurteilung funktioneller Einschränkungen im Alltag und umfasst sieben Abstufungen von 0 (keine Symptome) bis 6 (Tod). Dadurch können auch subtilere neurologische Defizite und Einschränkungen der Selbstständigkeit besser erfasst werden. Die mRS weist daher eine höhere Sensitivität für funktionelle Unterschiede auf, während die CPC-Klassifikation vor allem aufgrund ihrer Einfachheit und besseren Vergleichbarkeit zwischen Studien weiterhin weit verbreitet ist.

Als beeinflussende Faktoren werden meist das Patient*innenalter, der Reanimationsverlauf, die verstrichene Zeit bis zum Beginn der Herzdruckmassage sowie bis zum etablierten ECMO-Flow, die Ursache, die Therapie und die Erfahrung des behandelnden Zentrums beschrieben. Man kann daher eine Einteilung in prä-, intra- und postreanimationsbezogene Faktoren machen.

Von der Intervention unabhängige Eigenschaften wie das Alter beeinflussen das Outcome wesentlich. Wie bereits bei der Patient*innenauswahl angeführt, sprechen im höheren Alter immer Faktoren für ein schlechtes neurologisches Outcome. 2021 veröffentlichte Kim et al. eine retrospektive Analyse, in der zwei Patient*innengruppen miteinander verglichen wurden. Eine Gruppe beinhaltete Personen unter 66 Jahren, die andere über diesem Grenzwert. Sowohl die Überlebensrate als auch das neurologische Outcome war in der jüngeren Gruppe signifikant besser. Die älteren Patient*innen hatten eine höhere Rate an Komorbiditäten, vor allem Diabetes Mellitus, arterielle Hypertonie und Myokardinfarkte (43). Diese Eigenschaften sind durchaus auch auf eine älter werdende mitteleuropäische Gesellschaft übertragbar. Wichtig ist zu betonen, dass es trotz dieser retrospektiven

Analyse keinen universell einsetzbaren Cut-off-Wert für die ECPR gibt. Unterschiedliche Systeme nutzen auch unterschiedliche Altersgrenzen. Meistens liegen diese zwischen 60 und 75 Jahren. Jedoch sollte in jedem einzelnen Fall individuell entschieden werden, ob die Patient*innen für den ECMO-Einbau geeignet sind oder nicht. Weniger eine Jahreszahl als vielmehr die körperliche Funktionalität sind hier von Bedeutung. Einzelfälle können also auch außerhalb der definierten Altersgrenzen für eine ECPR geeignet sein, während zum Beispiel ein 55-jähriger Patient durch vorbestehende Erkrankungen nicht mehr die körperlichen Reserven hat, um langfristig mit der Invasivität einer ECMO fertig zu werden. Man kann also festhalten, dass das Alter mehr als Marker für Komorbiditäten zu verwenden ist, als tatsächlicher Grenzwert zum Ein- bzw. Ausschließen von Patient*innen. Vorerkrankungen können schlecht verallgemeinert werden, da die Ausprägung und damit einhergehende Alltagseinschränkung sehr individuell sind. Besonders chronische Organschäden führen dazu, dass notwendige Reserven für das Überleben eines Stillstandes fehlen. Vor allem Lungen- sowie Herz-Kreislaufkrankungen schränken die Funktionalität stark ein. Halenarova et al. publizierten 2022 eine retrospektive, multizentrische Analyse, in der Komorbiditäten eine klare Auswirkung auf Überleben und neurologisches Outcome widerspiegeln (44). Indirekt kann man auch von der Studie von D'Arrigo et al. ableiten, dass die neurologische Funktionalität schlechter wird, je mehr die Ursache der Reanimation von dem Ausmaß der chronischen Schädigung des Körpers abhängt (45).

Wie bereits beschrieben, dürfte Zeit einer der wichtigsten prognostischen Faktoren einer ECPR sein. Beginnend natürlich mit der Tatsache, dass ein Herz-Kreislauf-Stillstand idealerweise beobachtet sein sollte, um direkt mit der Mobilisierung von Ressourcen und einer entsprechenden Therapie beginnen zu können. Denn innerhalb der sogenannten „no-flow“-Zeit sinkt die Wahrscheinlichkeit eines guten neurologischen Outcomes um circa 13% pro Minute (7). Nach Beginn der Herzdruckmassage und damit einsetzender „low-flow“-Zeit ist zumindest von einer minimalen Organperfusion auszugehen, welche das Zeitfenster für eine Intervention verlängern kann. Dennoch sollte die Phase möglichst kurz gehalten werden, um baldigst eine optimale Durchblutung durch den Fluss der ECMO-Maschine zu generieren (46). Eine sekundäre Analyse der „CRITICAL Study“ (Yamada et al. 2016), welche als prospektive und multizentrische Kohortenstudie die außerklinischen Reanimationen untersuchte, hat sich dem Thema „low-flow“-Zeit in Bezug auf ein gutes neurologisches Outcome gewidmet. 256 Patient*innen wurden hierfür in drei Gruppen

eingeteilt, je nach Dauer der „low-flow“-Zeit. Es konnte klar gezeigt werden, dass eine kürzere Spanne mit besserem neurologischen Outcomes assoziiert war. Das sekundäre Ergebnis war hier mit dem 30-Tage-Überleben definiert; hier gab es keinen signifikanten Unterschied (47). Eine andere Arbeit, ebenfalls in Japan durchgeführt, untersuchte retrospektiv 42365 Patient*innen mit außerklinischem Herz-Kreislauf-Stillstand, die entweder konventionell reanimiert oder mittels ECPR im Krankenhaus therapiert wurden. Hierbei konnte der Zusammenhang zwischen längerer „low-flow“-Zeit und schlechterem neurologischem Outcome nur in der Patient*innengruppe mit initial schockbarem Herzrhythmus aufgezeigt werden. Bei initial nicht-schockbarem Rhythmus gab es keine Verschlechterung, da diese Patient*innen ohnehin oft schlechte Überlebenschancen hatten. Man muss hier nämlich kritisch erwähnen, dass Sanitäter*innen in Japan keine „do-not-resuscitate“-Anweisungen (DNR) befolgen dürfen und somit keine Terminisierung der prähospitalen Reanimation durchführen. Folglich werden diese erst im Krankenhaus abgebrochen (48). Aber auch bei innerklinischen Herz-Kreislauf-Stillständen sollte versucht werden, die „low-flow“-Zeit möglichst kurz zu halten. Die Transportwege zu den Patient*innen bzw. zur Einrichtung, welche die ECMO-Maschine implantiert, sind hierbei deutlich kürzer als im präklinischen Setting. Wenn möglich sollte hier die Zeit bis zur ECPR weniger als 30 Minuten betragen, da ab diesem Zeitpunkt das Überleben und auch das neurologische Outcome signifikant schlechter wird (49). Zusammenfassend stellt die Zeit bis zum ECMO-Flow einen entscheidenden Prädiktor für das neurologische Outcome dar. Eine frühzeitige Indikationsstellung zur ECPR sowie standardisierte innerklinische Abläufe sind erforderlich, um die Low-Flow-Zeit möglichst kurz zu halten. Die ECPR sollte daher nicht als späte Eskalationsmaßnahme, sondern als frühzeitig geplante Reanimationsstrategie verstanden werden, um die Wahrscheinlichkeit eines guten neurologischen Outcomes zu erhöhen (50). Wie bereits beschrieben muss der initiale Herzrhythmus, sowie dessen weiterer Verlauf eine entscheidende Rolle bei der Patient*innenauswahl spielen. Ein gutes neurologisches Outcome findet man vorwiegend bei Patient*innen mit einem schockbaren Rhythmus. Dies konnte Havranek et al. 2022 mit einer retrospektiven Analyse des „Prague-Trial“ zeigen. 256 präklinische Patient*innen wurden in Prag reanimiert und unter laufender Herzdruckmassage in ein Krankenhaus gebracht. Dort wurde entweder konventionell therapiert oder eine ECPR begonnen. Hier konnte ein signifikanter Unterschied, bezogen auf das neurologische Outcome nach 180 Tagen, festgestellt werden, wenn Patient*innen

einen initialen schockbaren Rhythmus hatten. Dies war bei den ECPR-Patient*innen, wie auch bei den konventionell therapierten Patient*innen zu beobachten (51). Auch der Wechsel der Herzrhythmen beeinflusst das Outcome wesentlich. So muss man beachten, dass eine initiale PEA durch suffiziente Reanimation zu einem schockbaren Rhythmus konvertieren kann, was die Überlebenschancen erhöht (38).

Die kumulative Reanimationsdauer hat ebenfalls Auswirkungen auf Überleben und neurologische Funktionalität. Je länger Reanimationsbemühungen andauern, desto mehr entstehen pathophysiologische Mechanismen, wodurch die Wahrscheinlichkeit eines Spontankreislaufs sinkt. Mit fortschreitender Reanimationsdauer kommt es zu einer stetig verstärkten metabolischen Auslenkung. Die entstehende Azidose mit dem verbundenen Laktat- und PaCO₂-Anstieg sind Marker, die bei langer Therapiedauer ersichtlich werden. Diese Werte sollten definitiv nicht als alleinige Abbruchkriterien herangezogen werden, da es auch Patient*innen gibt, die nach kurzer Reanimationsdauer eine deutliche Azidose entwickelt, und dennoch durch eine ECPR profitieren könnten (52). Metabolische Auslenkungen sollten nur in Zusammenschau mit den Therapiezeiten und klinischen Hinweisen interpretiert werden.

Die Ätiologie des Herz-Kreislaufstillstands ist von wesentlicher Bedeutung für den Einsatz einer extrakorporalen Reanimation. Das European Resuscitation Council definiert die reversiblen Ursachen mit den Akronymen: 4Hs & HITS. Hypoxie, Hypovolämie, Hypo-/Hyperthermie, Hypo-/Hyperkaliämie, Herzbeuteltamponade, Intoxikation, Thromboembolie und Spannungspneumothorax sind demnach die Auslöser, die gezielt therapiert werden können, um einen Spontankreislauf wieder zu ermöglichen. Bei einigen reversiblen Ursachen könnte die ECPR einen signifikanten Unterschied machen, da durch den Einsatz der ECMO eine „bridge-to“-Therapie überhaupt erst möglich werden könnte. Bei mechanischen Komplikationen ist eine ECPR sehr umstritten. Ein Spannungspneumothorax muss mittels Thoraxentlastung versorgt werden. Hier scheint der Einsatz einer extrakorporalen Reanimation pathophysiologisch keinen Sinn zu machen. Für die Indikation bei einer Perikardtamponade gibt es nur wenig Literatur. Einzelne Fallberichte zeigen, dass die ECPR durchaus zum Überbrücken geeignet ist (53). Jedoch ist eine chirurgische oder interventionelle Entlastung des Perikards unumgänglich, um die Ursache definitiv zu behandeln. Eine retrospektive Analyse des ELSO-Registers zeigt, dass eine Perikardtamponade eine seltene Komplikation beim Einbau einer ECMO-Maschine ist. In lediglich 2,6% der Fälle konnte dies beobachtet werden, jedoch zeigte sich hier eine

signifikant gesteigerte Mortalität im Vergleich zum Gesamtkollektiv des ELSO-Registers (54). Pathophysiologisch kann der ECMO-Fluss durch den Druck der Tamponade eingeschränkt sein. Dieser komprimiert nämlich das rechte Atrium, was den Rückstrom zum Herzen vermindern oder sogar unterbinden kann. In solchen Fällen kann durch die ECMO keine Perfusion mehr gewährleistet werden. Auch eine Pulmonalarterienembolie führt beim Herz-Kreislauf-Stillstand zu einer mechanischen Komplikation. Die „Prague OHCA study“ wurde auch hier retrospektiv auf dieses spezielle Patient*innenkollektiv analysiert und hierbei konnte ein signifikant schlechteres neurologisches Outcome nach 180 Tage festgestellt werden. Allerdings ist hier zu erwähnen, dass in nur 9,4% aller Fälle eine Pulmonalarterienembolie festgestellt wurde und somit diese spezielle Gruppe aus lediglich 24 Patient*innen bestand, wovon lediglich zwei Patient*innen (8,3%) die 180-Tage-Grenze mit gutem neurologischen Outcome erreichten. (55). So eine kleine Fallzahl kann das Ergebnis leicht verfälschen, da bereits wenige Todesfälle die Mortalität stark beeinflussen. Eine andere Publikation von Scott et al. zeigt andererseits, dass der Einsatz einer ECPR bei einer PAE durchaus mit hohen Überlebenschancen assoziiert ist. 61% aller Patient*innen überlebten nach ECMO-Einbau während der Reanimation nach PAE (56). Kardiale Ursachen gehören zu den häufigsten Gründen für einen therapierefraktären Herz-Kreislauf-Stillstand. Pathophysiologisch ist hier auch am häufigsten mit einem initial schockbaren Rhythmus zu rechnen, da das Myokard sensibel auf Hypoxie reagiert und durch den Untergang der Herzzellen und dadurch freigesetztem Kalium das Membranpotential verschoben wird. Viele Studien schließen darauf, dass Patient*innen mit schockbarem Rhythmus eine höhere Überlebenschance haben und mit einem besseren neurologischen Outcome vergesellschaftet sind. Auch in der „Prague OHCA study“ hatten die meisten Patient*innen mit schockbarem Herzrhythmus (57%) ein akutes Koronarsyndrom (ACS), gefolgt von 19% mit chronischer Koronarerkrankung (CAD). In der Gruppe mit nicht-schockbaren Rhythmen waren diese Entitäten weniger vertreten (38% ACS und 3% CAD) (51).

Auch lebensbedrohliche Intoxikationen stellen eine mögliche Indikation der ECPR dar. Dabei kommt es durch den extrakorporalen Kreislauf zu einer „bridging“-Therapie, womit mehr Zeit gewonnen wird, um die Intoxikation zu therapieren. Dabei kann es vorkommen, dass man gezielte Antidote verwendet, um die Vergiftungssymptome zu lindern oder man verhilft dem Körper, selbst die Noxe zu beherrschen, im Sinne einer „bridge-to-Recovery“-Strategie. Bei Intoxikationen kommt es oft zur simultanen Vergiftung durch mehrere

Substanzen, was die Diagnose und nachfolgende Therapie herausfordernd machen kann. Um durch eine Intoxikation in einen Atem-Kreislauf-Stillstand zu rutschen, muss es pathophysiologisch zu einer respiratorischen Einschränkung oder einem hämodynamischen Versagen kommen. Die potenzielle Hypoxie wird in vielen Fällen durch eine Intubation und Beatmung mit einem FIO_2 von 1,0 zu therapieren sein. Falls dadurch kein Erfolg absehbar ist, wird bis zum Einsetzen des ECMO-Flusses schon ein hypoxischer Schaden entstanden sein. Die hämodynamische Komponente kann als letztmögliche Therapieform durch eine ECPR behandelt werden (57). Hier konnte durchaus eine bessere Überlebenschance dargestellt werden (58).

Hypothermie gilt laut ERC auch als reversible Ursache und ist laut Guidelines bei bestimmten Voraussetzungen als Therapieverfahren anzudenken (18). Für diese Indikation gibt es bereits seit vielen Jahren Publikationen, die sich diesem Thema gewidmet haben. 2001 veröffentlichte Farstad et al. eine retrospektive Analyse, die den Benefit einer ECMO-Unterstützung bei Hypothermie zeigte, wobei in dieser Studie die Patient*innen in zwei Gruppen geteilt wurden, je nachdem, ob es sich um eine primäre Hypothermie handelte, oder ob eine Asphyxie primär vorhanden war und die Unterkühlung sekundär darauf folgte. Die primäre Hypothermie zeigte ein signifikant besseres Überleben (59). Eine Hilfestellung bei Hypothermie-Patient*innen ist der sogenannte „HOPE“-Score, der dafür entwickelt wurde, die Überlebenschance vor ECLS abschätzen zu können. Hierfür werden sechs Variablen benutzt: Alter, Geschlecht, Körperkerntemperatur, Serum-Kalium, Vorhandensein einer Asphyxie und Dauer der Reanimation. Somit hängt die Entscheidung einer ECPR nicht von einer einzelnen Variable ab, sondern muss durch Abschätzen mehrerer Faktoren getroffen werden. Dieser Score scheint nach Validierung die Überlebenschancen akkurat wiedergeben zu können (60). Auch die ERC Guidelines 2025 empfehlen den HOPE-Score bei Lawinen- und Hypothermie-Patient*innen (18).

Die Reanimations-Guidelines geben auch einen klaren Algorithmus für den traumatologischen Herz-Kreislauf-Stillstand vor. Die ECPR wird hier nicht explizit erwähnt, könnte aber in Betracht gezogen werden. Shinar et al. beschäftigte sich 2025 mit der Fragestellung, ob es an der Zeit wäre, einen Paradigmenwechsel bei traumatischen Reanimationen durchzuführen mit der Begründung, dass in den vergangenen Jahrzehnten Trauma als absolute Kontraindikation für den Einsatz einer ECMO galt (61). Hierbei muss festgehalten werden, dass gerade bei einer Trauma-CPR viele Tätigkeiten gleichzeitig ausgeführt werden müssen, um möglichst schnell die reversiblen Ursachen zu beheben.

Sind diese Maßnahmen erledigt und noch kein ROSC eingetreten, geht man in der Regel von schlechten Überlebenschancen aus, weshalb eine ECPR nur in seltenen Fällen erwogen wird. Man könnte allerdings argumentieren, dass durch die extrakorporale Reanimation in auserwählten Situationen mehr Zeit für die chirurgische Versorgung erkaufte wird. Weiters ist das Patient*innenklientel des Trauma-Stillstandes im Vergleich zu nicht-traumatischen Reanimationen eher jünger und beinhaltet oft weniger Komorbiditäten, was den Einsatz der ECMO begünstigen würde. Andererseits sollten ECPR-Patient*innen antikoaguliert werden, um die Thrombenbildung zu vermindern, was jedoch bei blutenden Traumapatient*innen kontraproduktiv wäre. Kato et al. beschäftigte sich 2024 mit Trauma bei ECPR-Patient*innen. Hier wurden in einer retrospektiven Observationsstudie untersucht, ob Verletzungen das Überleben nach ECPR beeinflussen. Alle Patient*innen wurden vor Aufnahme auf der Intensivstation (ICU) mittels Ganzkörper-Computertomographie (CT) untersucht. Von 189 Patient*innen hatten vier eine Schädelverletzung und 31 eine Torsoverletzung. Während die Patient*innen mit Schädelverletzung alle starben, war bei den Torsoverletzungen kein Unterschied im Vergleich zu Unverletzten, bezogen auf Mortalität und neurologisches Outcome erkennbar (62). Diese Studie spiegelt nicht nur Patient*innen wider, bei welchen ein Trauma ursächlich für einen Herz-Kreislauf-Stillstand ist, denn es wurden auch Verletzungen untersucht, die durch die Reanimationsmaßnahmen entstanden sind. Außerdem ist die geringe Fallzahl der Studie kritisch zu hinterfragen. Traumatische Stillstände wurde 2025 retrospektiv von Erblisch et al. untersucht. Von 1. Jänner 2020 bis 31. Dezember 2024 wurden insgesamt 13.132 Patient*innen in das ELSO-Register eingeschlossen. Bei 134 bestand ein Trauma-Bezug: in 24 Fällen lag ein primär traumatologischer Auslöser des Herzstillstands vor, während bei 110 Patient*innen eine nicht-traumatologische Ursache bei gleichzeitig vorhandenen Verletzungen dokumentiert wurde. Von den 24 Patient*innen mit traumatischem Herzstillstand überlebten 7 (29,2 %), während in der Vergleichsgruppe ein Überleben von 37 % beobachtet wurde (63). Auch hier ist wieder die geringe Fallzahl zu beachten, dennoch lässt sich zumindest darstellen, dass ein traumatischer Herz-Kreislauf-Stillstand in auserwählten Fällen mittels ECMO therapiert werden kann und dabei ein Überlebensvorteil entstehen kann.

Unabhängig von den einzelnen Ätiologien wird daran geforscht, physiologische Parameter festzustellen, welche möglicherweise Rückschlüsse auf Perfusion und somit erhöhte Überlebenschancen bieten. Diese Parameter sind unter anderem von der „low-flow“-Zeit

abhängig, da in dieser ein stetiger Zellschaden stattfindet, welcher allerdings wiederum von vielen Faktoren abhängt. Die Messung von physiologischen Markern soll dabei bei der Abschätzung helfen, ob noch eine reversible Ischämie oder bereits ein irreversibler Zelluntergang vorliegt. Einer dieser Messwerte stellt Laktat dar, welches beim anaeroben Stoffwechsel entsteht und somit als Parameter für den metabolischen Status dienen soll. Dusik et al. konnte mit einer retrospektiven Analyse der „Prague OHCA study“ aufzeigen, dass Laktat durchaus eine Rolle bei der Prognose von ECPR-Patient*innen spielen kann. Ab einem Laktatwert über 14 mmol/L hatten Patient*innen in dieser Studie ein schlechteres Outcome, wenn sie mittels ECMO therapiert wurden. Bei konventioneller Reanimation war der Cut-off Wert bei 10,8 mmol/L. Wichtig dabei sind allerdings die seriellen Messungen, da ein einzelner Wert wenig aussagekräftig ist. Bei der Gruppe mit dem besseren neurologischen Outcome war eine deutliche Abnahme des Laktats über acht Stunden ersichtlich, was bei der anderen Gruppe nicht zu beobachten war (64).

Auch klinische Hinweise können hinweisgebend auf das Überleben sein. Die Pupillen können auf vorhandenen Lichtreflex untersucht werden. Das Fehlen dieses Reflexes spricht für eine höhere Mortalität. Auch die Pupillengröße kann untersucht werden, konnte allerdings in einer Studie nicht als unabhängiger prognostischer Wert identifiziert werden (65).

Schließlich könnte auch das Post-Kanülierungsmanagement Auswirkungen auf das Outcome von ECPR-Patient*innen haben, jedoch wurde dies noch nicht so explizit durch Studien bewiesen. Die respiratorische und hämodynamische Stabilisierung, sowie die weitere Behandlung der zugrundeliegenden Ursache kann die neurologische Funktion stark beeinflussen. Dazu gehört auch eine passende Sedierung nach Beginn des ECMO-Flusses. Vordefinierte Protokolle sollten hierfür vorliegen, um durch eine standardisierte Therapie das Outcome bestmöglich zu verbessern. Die Fallzahl und damit einhergehende Routine des behandelnden Teams spielt hier eine zentrale Rolle. Zentren mit viel Erfahrung mit ECPR können tendenziell besser mit diesen oft instabilen Patient*innen umgehen und mit etwaigen Komplikationen besser umgehen.

4.3 ROSC und Langzeitüberleben

Als ROSC wird in der Medizin das Einsetzen eines spontanen Kreislaufes verstanden und ist in der Reanimatologie oft als primäres Ziel definiert. Alle Reanimationsbemühungen haben das Ziel, die eigenständige Perfusion der Organe zu ermöglichen, wofür eine funktionelle Herzaktion vonnöten ist. Festgestellt wird dieses Wiedereinsetzen des

Kreislaufes durch eine Rhythmusanalyse, bei welcher ein entsprechender Herzrhythmus zu sehen sein muss, welcher auch mit einem Auswurf vergesellschaftet ist, und zusätzlich durch eine Pulskontrolle an einem zentralen Gefäß; in der Regel wird hierfür die Arteria Carotis oder die Arteria femoralis genutzt. Durch den Einbau einer extrakorporalen Membranoxygenierung wird der Körperkreislauf zusätzlich durch die maschinelle Perfusion unterstützt, wodurch wiederum eine Oxygenierung der Organe gewährleistet werden kann. Je nach Einstellungen und Geräten kann es dabei vorkommen, dass keine Pulsatilität entsteht. Auch der intrinsische Herzschlag kann bei einer ECPR weiterhin schockbar sein und dennoch kann eine Organperfusion mittels extrakorporalem Kreislauf stattfinden. Hier trifft also die bekannte Definition eines ROSC nicht zu, da der eigentliche Kreislauf nicht spontan funktioniert. In der Literatur haben sich daher andere Begriffe durchgesetzt, sodass man in diesem Fall oft vom sogenannten ROSB liest (66). Der „return of spontaneous beating“ beschreibt nämlich genau die Situationen, in denen es zu einer systemischen Organperfusion ohne eigenständige kardiale Pumpfunktion kommt. Manchmal wird diese Abkürzung auch für „return of spontaneous blood flow“ verwendet. Dieser artifizielle Kreislauf hat natürlich Auswirkungen auf die Herzfunktion, da durch den retrograden Fluss die linksventrikuläre Nachlast ansteigt. Gleichzeitig wird durch die venöse Drainage die rechtventrikuläre Vorlast und somit die pulmonale Durchblutung reduziert (67). Die tatsächlichen Auswirkungen auf das Herz dürfte Flow-abhängig sein. So muss damit gerechnet werden, dass nach Einsetzen des ECMO-Flusses die Pumpfunktion des Herzens zwar unterstützt wird, das Myokard allerdings durch die veränderte Hämodynamik auch geschädigt werden kann. Diese Schädigungen führen in vielen Fällen zur Herzinsuffizienz, was wiederum große Auswirkungen auf das alltägliche Leben haben kann. Herauszulesen ist dies nicht immer, da zwar das Langzeitüberleben in vielen Studien angegeben wird, jedoch oft mit unterschiedlichen Messwerten. In vielen Fällen wird es mit dem reinen Überleben definiert, was wiederum keine Rückschlüsse auf die neurologische Funktionalität zulässt. Diese wird in den Studien meistens mittels CPC oder mRS beschrieben. Swol et al. beschreiben die Heterogenität der Studienlage bezogen auf das Langzeitüberleben und betonen dabei die Wichtigkeit der Integration in das Arbeitsleben nach erfolgreicher ECPR, was gleichzeitig eine gewisse Neurologie voraussetzt und dabei einen essenziellen Bestandteil unserer modernen Gesellschaft widerspiegelt (68). Diese Arbeitsfähigkeit wird bisher kaum in Studien untersucht und sollte in Zukunft mehr in den Fokus geraten, um den Erfolg einer ECPR aufzuzeigen.

Wie bereits erwähnt, ist der initiale Herzrhythmus ein wichtiger Parameter bei der Patient*innenauswahl. Pound et al publizierten 2024 eine retrospektive Analyse des EXCEL Registers, bei dem australische Patient*innen nach innerklinischem Herz-Kreislauf-Stillstand mittels ECPR versorgt wurden. Interessanterweise wiesen hier rund 65% der eingeschlossenen Patient*innen einen initial nicht-schockbaren Rhythmus auf. Dennoch zeigte sich bei 32,7% ein gutes neurologisches Outcome nach sechs Monaten gezeigt. Die Rate an Komplikationen und höheren Behinderungswerten war allerdings auch erhöht (69). Die neurologische Beurteilbarkeit dieser Patient*innen soll so früh wie möglich gegeben sein, um eine Prognose abgeben zu können. Dabei spielt natürlich auch die Bildgebung eine Rolle. So wurde in einer retrospektiven Analyse der „Prague OHCA“ Studie der Fokus auf das Verhältnis zwischen grauer und weißer Substanz im Hirn gelegt, was jedoch nach Versorgung mittels ECPR keinen signifikanten Unterschied zeigte. Bei Patient*innen mit gutem neurologischen Outcome war das Verhältnis im Putamen und Nucleus Caudatus in einem engeren Wertebereich als bei Patient*innen mit schlechtem neurologischen Ergebnis. Ein Hirnödem konnte bildgebend nur bei Patient*innen mit schlechter neurologischer Funktionalität nachgewiesen werden, was auf eine erhöhte Schädigung des Hirns rückschließen lässt (70). Das neurologische Outcome lässt sich leider zwischen unterschiedlichen Studien oft schwer miteinander vergleichen, da unterschiedliche Zeitpunkte für die Analyse herangezogen werden. In vielen Publikationen liest man von der Erfassung der Neurologie 30 Tagen nach erfolgter ECPR. Jedoch kann es in vielen Fällen zu prolongierten neurologischen Verbesserungen kommen, wodurch es nach weiteren Monaten zu einer deutlichen Steigerung der neurologischen Fähigkeiten kommt. Retrospektive Daten zeigen eine signifikante Besserung zwischen dem ersten und dem sechsten Monat nach extrakorporaler Reanimation. Eine vergleichbare Steigerung konnte hier bei konventionellen Wiederbelebungen nicht beobachtet werden. Nach diesen sechs Monaten ist von keiner signifikanten Verbesserung mehr auszugehen (71). Pathophysiologisch könnte hinter dieser verzögerten Besserung der Neurologie eine Entstehung von Mikrothromben durch den ECMO-Kreislauf selbst stehen (72). Der vermehrte Einsatz von klinischen Untersuchungen und erweiterten bildgebenden Verfahren wie einer Magnetresonanztomographie (MRT) mit Perfusionsdarstellung könnte hier hinweisend sein (73).

Biomarker sollten derzeit routinemäßig bei allen ROSC-Patient*innen untersucht werden (74). Auch in Bezug auf ECPR wurden hierfür bereits Analysen durchgeführt, die jedoch

derzeit kein klares Statement zulassen. Es gibt zwar Anzeichen, dass ein erhöhter Wert von Biomarkern wie NSE (neuronenspezifische Enolase) oder PCT (Procalcitonin) auf ein schlechteres neurologisches Outcome hinweist, jedoch ohne statistische Signifikanz (75, 76).

Auch das Temperaturmanagement wird in der Reanimatologie seit Jahren als möglicher Einflussfaktor auf das Langzeitüberleben und das neurologische Outcome diskutiert. Während die ERC Guidelines in den letzten Jahren zurückhaltender mit genaueren Aussagen und Empfehlungen wurden, scheint zumindest das Vermeiden von Fieber über die ersten 72 Stunden als gültiger Konsens zu dienen (74). Auch bei erfolgter ECPR wird das Temperaturmanagement untersucht, um mögliche Auswirkungen zu kontrollieren. Dabei zeigt eine chinesische Studie, dass eine größere Temperaturvarianz möglicherweise bessere neurologische Outcomes generieren kann, im Vergleich zu geringeren Temperaturschwankungen. Kühlung scheint zumindest laut dieser Datenlage derzeit keine Verbesserung der Neurologie zu verursachen (77).

Neben dem neurologischen Outcome wird auch die hämodynamische Funktionalität als wichtiger Bestandteil des Langzeitüberlebens identifiziert. Dies muss bereits bei der Implementierung der ECPR bedacht werden. Ein unterschiedlicher ECMO-Flow hat nämlich Auswirkungen auf das Herz und muss somit in Betracht gezogen werden, um die Hämodynamik während, aber auch nach erfolgreicher Reanimation bestmöglich zu stabilisieren. Ein hoher ECMO-Flow sorgt bei wiedererlangtem Spontankreislauf für niedrigere enddiastolische Volumina und Drücke und reduziert die Schlagarbeit im linken Ventrikel (78). Dies scheint den linken Ventrikel entlasten zu können, was sich auf längere Sicht potenziell auf die Herzleistung auswirken kann. Daten aus Paris zeigen, dass eine ECPR nach stattgehabtem prähospitalen Atem-Kreislauf-Stallstand durchaus mit guter kardialer Funktion vergesellschaftet sein kann. Retrospektiv wurden Patient*innen untersucht, welche zwischen Jänner 2015 und Dezember 2023 präklinisch mittels ECPR therapiert wurden und dabei primär ein akutes Koronarsyndrom als zugrundeliegende Erkrankung hatten. 21% überlebten davon mindestens ein Jahr mit gutem neurologischen Outcome und wurden dabei wiederholt kardiologisch untersucht. Die meisten Patient*innen hatten einen NYHA-Score von I und eine linksventrikuläre Ejektionsfraktion (LVEF) von über 50%, was eine annähernd normale Herzaktivität widerspiegelt. Diese kardiale Funktionalität erlaubte auch den meisten Patient*innen wieder den Wiedereinstieg

in die Arbeitswelt. Nach etwa 6,8 Jahren waren zumindest die Hälfte der eingeschlossenen Überlebenden berufstätig (79).

Leider kann nicht in jedem Fall ein Überleben mit gutem neurologischen Outcome sichergestellt werden. Einige Patient*innen überleben zwar primär die ECPR, werden jedoch mit der Zeit als Hirntod diagnostiziert. Zumindest kann anschließend eine Organspende in Betracht gezogen werden, was wiederum anderen Menschen zugutekommen kann. Durch den Einsatz einer extrakorporalen Reanimation kann das Überleben also nicht nur mittels primärem Überleben beschrieben werden, sondern kann auch erweitert für andere Patient*innen einen Benefit bringen (80). Im Gegensatz zum direkten Überleben nach ECMO-Einbau, steigt die Anzahl der Organspenden mit längerer „low-flow“-Zeit und wenn es initial keinen schockbaren Herzrhythmus gab (81).

Zusammenfassend lässt sich aus wissenschaftlicher Perspektive sagen, dass die Literatur zum Langzeitüberleben nach ECPR größtenteils aus retrospektiven Analysen mit kleinen Patient*innengruppen besteht. Zudem herrscht ein heterogener Fokus in den Publikationen: vor allem hämodynamisches und neurologisches Monitoring wurden untersucht, wobei Ergebnis- und Endpunktdefinitionen inkonstant sind und somit ein Vergleich erschwert wird (82).

4.4 Kosten und Effizienz

Eine extrakorporale Reanimation ist ein invasives und ressourcenintensives Verfahren, das mit einem großen organisatorischen Aufwand assoziiert ist. Auch wenn das ärztliche Interesse einer Behandlung immer dem moralischen Ethos des Helfens folgen sollte, so kann ein System längerfristig nur funktionieren, wenn die ökonomischen Anforderungen gedeckt sind. Das spezialisierte Personal, welches einen großen Trainingsaufwand betreiben muss, und die notwendige Infrastruktur verursachen hohe Kosten. Zudem sollte das behandelnde Team beziehungsweise das Krankenhaus eine ständige Bereitschaft haben, um rund um die Uhr eine ECPR anbieten zu können. Daher sollte zu jeder Zeit genug geschultes Personal, sowie die ECMO-Maschine, eventuell ein Katheterlabor und eine intensivmedizinische Nachversorgung gewährleistet werden. Je nach Einzugsgebiet und ECPR-Strategie (präklinisch, Rendezvous oder innerklinisch) steht dies in Relation zu einem deutlich kleineren Patient*innenklientel als bei anderen Interventionen, die bereits in der Notfallmedizin flächendeckend etabliert sind (83). Deshalb stellt sich die Frage, ob der Überlebensgewinn die Kosten und den Aufwand rechtfertigt (84).

Hierfür muss man die direkt anfallenden Kosten durch ECMO-System, Kanülierung, Personal, Intensivstation, Katheterlabor und etwaige Transporte von den weniger konkreten Kosten unterscheiden, welche zum Beispiel durch langfristige Rehabilitation und Wiedereingliederung in den Alltag entstehen. Der mediane Kostenunterschied zwischen einer konventionellen und einer extrakorporalen Reanimation ist zunächst nicht so groß. Delnoij et al. berechneten im Rahmen einer gesundheitsökonomischen Analyse einen durchschnittlichen Kostenunterschied von 5109 Euro pro PatientIn zwischen konventioneller Reanimation und ECPR. In diese Berechnung flossen neben den unmittelbaren Krankenhauskosten unter anderem diagnostische und therapeutische Maßnahmen, Intensivstationsaufenthalte, Medikamente sowie poststationäre Versorgungskosten ein. Nicht vollständig abgebildet wurden jedoch potenzielle Implementierungs- und Ausbildungskosten eines neu etablierten ECPR-Systems. Die AutorInnen kamen dennoch zu der Schlussfolgerung, dass die extrakorporale Reanimations – zumindest im untersuchten niederländischen Versorgungssystem – nicht kosteneffektiv sei (85). Wie bereits erwähnt, ist auch die Organspende nach diagnostiziertem Hirntod ein interessanter Aspekt (86). Dadurch können auf längerer Sicht wiederum Kosten eingespart werden, was die ECPR ökonomisch vertretbarer gestaltet (87) und je nach Auslastung des ECPR-Teams und der berechneten Überlebensrate der Patient*innen eventuell sogar kosteneffektiv macht (88). Die tatsächlichen Kosten werden in der derzeitigen Literatur sehr heterogen angegeben: zumeist werden die Kosten angegeben, die ein Jahr mit voller Lebensqualität (QALY) beträgt. Wenn man damit einen Vergleich zur konventionellen Reanimation ziehen will, kann man sich mittels „Incremental Cost-Effectiveness Ratios“ (ICER) ausrechnen, wie viel ein weiteres QALY kostet. Hierfür gibt es in vielen Ländern errechnete Schwellenwerte, bis zu denen eine Therapie als kosteneffektiv gilt. In den USA wäre dies circa 150.000 US-Dollar. Wenn also ein zusätzliches Jahr an guter Lebensqualität unter dieser Summe liegt, gilt die extrakorporale Reanimation als kosteneffektiv, darüber wäre dies nicht der Fall. Derzeit scheinen einige ECPR-Programme diesen Schwellenwert knapp zu unterschreiten (89). Besonders zu beachten ist hier, dass durch den Einbau der ECMO zu Beginn hohe Kosten anfallen, aber durch eine selektive Patient*innenauswahl, kurze „low-flow“-Zeiten und somit hohe Überlebensraten die ICER gering gehalten werden kann. Der Fokus liegt hier durchaus auf der Generierung von gutem neurologischen Outcome, um die langfristigen Ausgaben zu minimieren (90, 91). Aus ökonomischer Sicht macht es also Sinn, in regionale Netzwerke zu investieren, in

denen ECPR-Zentren mit hohen Fallzahlen Expertise erlangen. Hier ist eine steile Lernkurve zu erwarten, wodurch Fehlkanülierungen, Blutungen und andere Komplikationen vermindert werden. Extrakorporale Reanimation muss als systemisch gedacht werden und kann sich daher nur weiterentwickeln, wenn zu Beginn eines ECPR-Programms die notwendigen Investitionen getätigt werden, um einen Lerneffekt und damit eine steigende Überlebenschance zu ermöglichen.

4.5 Training, Team und Workflow

Die Invasivität der ECPR erfordert eine intensive Aus- und Fortbildung für Kolleg*innen aller Professionen, die in diesen Prozess involviert sind. Beginnend mit dem notwendigen theoretischen Wissen müssen sich behandelnde Teams bis ins Detail mit allen Aspekten der ECMO auseinandersetzen. Dazu gehören organisatorische Abläufe wie Indikationen, Alarmierung, Transport zum beziehungsweise mit Patient*in, Vorbereitung des Equipments, Kanülierung, Komplikationen, fortführende Diagnostik und Therapie, sowie der interprofessionelle Umgang im Team. Weiters müssen bestimmte Abläufe wie Kanülierung während der Herzdruckmassage geübt werden, um unter anspruchsvollen Bedingungen entsprechende Leistung bringen zu können. Weit verbreitet ist hier das Üben an Tieren, vor allem Schweinen, da deren Anatomie im weitesten Sinne mit der des Menschen vergleichbar erscheint und so ein realistischer Ablauf trainiert werden kann. Üblicherweise gibt es ein definiertes Ausbildungsprogramm, in dem der Lernprozess schrittweise erklärt wird und so für alle Kolleg*innen nachvollziehbar ist (92). Vor der Umsetzung an echten Patient*innen sollte der gesamte Prozess mit unterschiedlichen Teams und vor allem interprofessionell durchgespielt werden, sodass ein reibungsloser Ablauf garantiert werden kann. Nicht nur bei der Ausbildung, sondern auch bei der gesamten Umsetzung der ECPR ist ein durchdachter und definierter Prozess essenziell. Gerade der Faktor Zeit leidet am meisten, wenn es während der Umsetzung einer extrakorporalen Reanimation zu Zwischenfällen kommt. Durch einen strukturierten Workflow kann die „low-flow“-Zeit signifikant reduziert werden, was Auswirkungen auf das Outcome hat (29).

Die effektive Durchführung einer ECPR kann nur in einem routinierten Team umgesetzt werden, wobei die behandelnden Ärzt*innen nicht unbedingt Chirurg*innen sein müssen. In früheren Zeiten, als für den femoralen Zugang noch eine chirurgische Präparation notwendig war, wurden Chirurg*innen aufgrund ihrer Erfahrung und anatomischen Wissens bevorzugt für den Zugang herangezogen. Heutzutage wird für die Kanülierung der

Arteria femoralis primär eine Seldinger-Technik benutzt, bei der mittels Nadel das Gefäß punktiert wird und dann anschließend ein Metalldraht eingebracht wird. Über diesen kann nachfolgend die eigentliche Kanüle im Gefäß etabliert werden. Selbstverständlich sind auch bei dieser Technik anatomische Gegebenheiten eine Grundvoraussetzung. Die Anlage einer ECMO durch Nicht-Chirurg*innen gilt mittlerweile jedoch auch als sicher und kann auch während der laufenden Reanimation in Erwägung gezogen werden (22).

4.6 Aktuelle Studienlage

Es gibt zahlreiche aktuelle Publikationen zum Thema ECPR, was den Stellenwert in der modernen Notfallmedizin hervorhebt. In vielen Ländern der Welt laufen Untersuchungen, um nähere Erkenntnisse zu sammeln und die Umsetzung zu verbessern. In den letzten Jahren wurden hierbei drei Studien veröffentlicht, von denen man immer wieder in der weiterführenden Literatur liest. Sie alle haben gemeinsam, dass sie randomisiert Therapiemöglichkeiten miteinander vergleichen. 2020 wurde von Yannopoulos et al. die sogenannte „ARREST“ Studie veröffentlicht. Hierbei wurden prähospitale Atem-Kreislauf-Stillstände (OHCA) untersucht, die durch ein therapierefraktes Kammerflimmern, ein Patient*innenalter zwischen 18 und 75 Jahren und eine geschätzte Transportzeit von unter 30 Minuten bis zur Notaufnahme charakterisiert waren. Nach drei erfolglosen Defibrillationen wurden hier die Patient*innen unter laufender Reanimation in ein Krankenhaus transportiert, wo sie randomisiert wurden (93). Dabei wurden 15 Fälle konventionell und 15 weitere mittels extrakorporaler Reanimation behandelt. 43% der ECPR-Fälle konnten das Krankenhaus lebend verlassen, während dies bei der Standardtherapie nur 7% waren. Die „ARREST“ Studie wurde frühzeitig beendet, nachdem die erste Interimsanalyse einen deutlichen Überlebensvorteil zugunsten der ECPR-Gruppe zeigte und damit die vordefinierten Überlegenheitsgrenzen überschritten wurde. Aus ethischen Gründen erschien eine weitere Randomisierung zur konventionellen Therapie nicht mehr vertretbar (1). Diese Resultate sind im Vergleich zu üblichen Überlebenswahrscheinlichkeiten sehr vielversprechend, obwohl natürlich die geringe Population zu beachten ist. Weiters ist zu bedenken, dass diese Studie an einem einzelnen Zentrum durchgeführt wurde, wodurch lokale Gegebenheiten und Erfahrung eine große Rolle spielen könnten und daher die Umsetzung in anderen Krankenhäusern andere Ergebnisse erzielen könnten.

2022 wurde die sogenannte „PRAGUE OHCA Study“ publiziert, in welcher prähospitale Reanimationen mittels innerklinischer ECPR therapiert wurden. Auch hier wurden

Patient*innen in die Studie aufgenommen, wenn sie einen beobachteten Atem-Kreislauf-Stillstand hatten und zwischen 18 und 65 Jahren alt waren. Im Vergleich zur „ARREST“-Studie wurden hier auch initial nicht-schockbare Herzrhythmen untersucht. Auch hier wurde ein Transport unter laufender Reanimation und bei Ankunft in der Notaufnahme eine Randomisierung durchgeführt. 124 Patient*innen kamen hierbei in die Interventionsgruppe, welche mit ECPR versorgt wurde, während 132 konventionell reanimiert wurden. Der primäre Endpunkt war definiert als Überleben mit gutem neurologischen Outcome (CPC 1 oder 2) nach 180 Tagen. 31,5% der ECPR-Patient*innen erreichten diesen Endpunkt im Vergleich zu 22% in der Vergleichsgruppe. Auch diese Studie wurde frühzeitig abgebrochen, da die vordefinierten Sicherheitsgrenzen erreicht wurden (3). Das Überleben erreichte hier höhere Werte als zuvor berechnet (10%), was damit zusammenhängen könnte, dass wiederum alle Patient*innen in ein Zentrum gebracht wurden und somit viel Erfahrung gesammelt wurde. Im Vergleich zu Österreich, wo trotz zahlreicher Schulungsprogrammen die Erste-Hilfe-Rate gering ist, muss kritisch bewertet werden, dass die eingeschlossenen Fälle eine sehr hohe Rate an Laienreanimation aufwiesen, was maßgeblich das Überleben und weiters das neurologische Outcome beeinflusst.

Die Patient*innenpopulation dieser Studie wurde sekundär untersucht, um Hinweise auf besseres neurologisches Outcome zu finden. So wurden einige post-hoc Analysen zu den Themen Herzrhythmus, Lungenembolie, Serumlaktat, Biomarker und Organspende durchgeführt (51, 55, 64, 75, 94).

Die dritte große Publikation zur ECPR ist die sogenannte „INCEPTION“-Studie. Sie wurde 2023 veröffentlicht und gilt durch ihren multizentrischen Aufbau als Meilenstein für eine flächendeckende Systemlösung, anstatt eines einzelnen erfahrenen Zentrums. 160 Patient*innen wurden hier zwischen Mai 2017 und Februar 2021 eingeschlossen, wobei 70 davon in die ECPR-Gruppe kamen. Die Inklusionskriterien waren mit einem Alter von 18 bis 70 Jahren, initial schockbarem Rhythmus, beobachtetem Stillstand und mindestens 15 Minuten Advanced Life Support (ALS) ohne ROSC definiert. Der primäre Endpunkt war als gutes neurologisches Outcome nach 30 Tagen beschrieben, was in 20% der ECPR-Fällen erreicht wurde. Im Vergleich dazu konnten 16% der konventionell reanimierten Patient*innen dieses Ziel erreichen, was keinen signifikanten Unterschied zeigt (4). Die Studie dürfte zu wenige Patient*innen eingeschlossen haben, um eine Signifikanz aufzuweisen, wurde jedoch ansonsten in der Durchführung wissenschaftlich professionell

umgesetzt. Die intention-to-treat-Idee zeigt auch den realitätsnahen Zugang der Autor*innen. Ubben et al. analysierten im Zusammenhang mit der „INCEPTION“ Studie diejenigen Patient*innen, die die Inklusionskriterien nicht erfüllten, weil die Zeit bis zur Kanülierung über 60 Minuten betrug oder weil es schon einen ROSC bis zum Eintreffen im Krankenhaus gab. Diese zuvor geplante Untersuchung zeigt wiederum ein verbessertes neurologisches Outcome nach 30 Tagen, allerdings ohne signifikanten Unterschied (16% in der ECPR-Gruppe und 9% bei den konventionellen Reanimationen) (95). Auch hier beschreiben die Autor*innen die kleine Patient*innengruppe, was Auswirkungen auf das Gesamtergebnis haben könnte.

Diese beschriebenen Studien gelten als richtungsweisend in der Reanimatologie in Bezug auf ECPR. Allerdings wird auch in vielen anderen Ländern erforscht, inwiefern eine extrakorporale Reanimation vorteilhaft sein kann. In Frankreich werden seit vielen Jahren prä- und innerklinisch ECPRs durchgeführt. Lamhaut et al. publizierten hierzu 2017 eine Studie, in der in der ersten Phase eine ECPR entweder prähospital oder im Krankenhaus durchgeführt wurde, je nachdem wie lange die Transportzeit dauerte, und in der zweiten Phase wurden die Selektionskriterien verschärft und der Einbau der ECMO nur mehr prähospital durchgeführt. 156 Patient*innen konnten eingeschlossen werden, wobei das gute neurologische Überleben bei Patient*innen der zweiten Phase signifikant besser war (29% vs. 8%) (24). Die Anzahl der Fälle war jedoch durch die veränderte Strategie in der zweiten Phase mit 42 Patient*innen deutlich niedriger. 2020 wurde dann von Bougouin eine prospektive Registerstudie veröffentlicht, in der 13.191 Fälle (OHCA) inkludiert wurden. 525 davon wurden auch tatsächlich mittels ECPR versorgt, 136 davon prähospital. 8% in der extrakorporalen Reanimationsgruppe und 9% in der konventionellen überlebten, was keinen signifikanten Unterschied aufzeigt (96).

In Minnesota wurden von Dezember 2019 bis April 2020 prähospitaler Atem-Kreislauf-Stillstände mittels ECPR therapiert, wobei hier ein mobiles ECMO-Team zum Einsatz kam, welches im Sinne eines Rendezvous-Systems in das entsprechende Krankenhaus fuhr, um dort die Patient*innen vom Rettungsteam zu übernehmen. Nach ECMO Anschluss wurden diese Patient*innen dann in ein entsprechendes Zentrum weitertransferiert. Zu den Inklusionskriterien zählten ein initial schockbarer Rhythmus, ein Alter zwischen 18 und 75 Jahren und eine geschätzte Transportzeit von unter 30 Minuten bis zur nächsten Notaufnahme. Von den 63 eingeschlossenen Patient*innen konnten 43% die ersten 30 Tage mit gutem neurologischen Outcome überleben (2). Dieses Ergebnis

konnte nur erzielt werden, da die Eintreffzeit des Rettungsdienstes kurz war und das mobile ECMO-Team parallel disponiert wurde und die „low-flow“-Zeit dadurch sehr kurz gehalten wurde.

In London wurde ebenfalls versucht diese Zeit so kurz wie möglich zu halten und die Kanülierung innerhalb von 30 Minuten durchzuführen. Die „Sub30“ Publikation war eine Machbarkeitsstudie, in der prähospital der ECMO Einbau durchgeführt wurde. Zu 18 Patient*innen wurde das ECPR-Team disponiert, fünf Mal wurde auch tatsächlich eine extrakorporale Reanimation durchgeführt. Die Kanülierung unter 30 Minuten konnte dabei nie erreicht werden. Im Schnitt vergingen 47,4 Minuten zwischen Notruf und ECMO-Fluss. Neurologisch gutes Outcome wurde hier nicht erzielt, zwei Patient*innen überlebten mit CPC 3 (97).

Australien gilt ebenfalls als wissenschaftlicher Schwerpunkt in der Reanimatologie, was durch zahlreiche Studien zum Thema ECPR klar wird. Bereits 2015 wurde die „CHEER“ Studie aus Melbourne veröffentlicht, in der OHCA und IHCA in der Notaufnahme mittels extrakorporaler Reanimation versorgt wurden. Allerdings war diese Intervention mit therapeutischer Hypothermie und einer mechanischen Reanimation gekoppelt, was für die Interpretation der Daten interessant ist. 24 Patient*innen wurden kanüliert, wovon 13 (54%) mit gutem neurologischen Outcome das Krankenhaus verlassen konnten (CPC 1). Für diese Studie wurden die Einschlusskriterien strikt definiert: es musste ein beobachteter Stillstand mit Laienreanimation innerhalb von zehn Minuten erfolgen, ein Kammerflimmern als initialer Rhythmus vorliegen und eine kardiale Ursache vermutet werden. Außerdem wurden nur Patient*innen zwischen 18 und 65 Jahren inkludiert (98).

Diese Erfahrung wurde wenige Jahre später genutzt, um wiederum in Melbourne eine prähospitale ECPR-Studie durchzuführen. In der „CHEER3“ Studie wurden zehn Patient*innen präklinisch mittels ECMO reanimiert, wovon 40% mit gutem neurologischen Outcome das Krankenhaus verlassen konnten. Diese Machbarkeitsstudie wurde unter anderem durchgeführt, um die Zeit bis zum Beginn des ECMO-Flow zu erforschen. Im Schnitt wurden hierfür 50 Minuten von Beginn des Notrufes gebraucht. Auch hier wurden nur wenige Patient*innen inkludiert, obwohl das Notfallteam zu 709 „potenziellen Stillständen“ gefahren ist (99). Dies zeigt die hohe Bereitschaft, frühzeitig ein entsprechendes Team zu disponieren, obwohl eine hohe Rate an Fehleinsätzen dabei entsteht.

In Sydney wurden ebenfalls extrakorporale Reanimationen durchgeführt. Eine multizentrische Observationsstudie untersuchte 2017 37 Patient*innen, welche an einer von zwei Notaufnahmen durchgeführt wurden. 12 davon waren außerklinische Stillstände, 25 innerklinische. 35% der Fälle überlebten mit gutem neurologischen Outcome.

Die „PRECARE“ Studie wurde anschließend ebenfalls im prähospitalen Setting durchgeführt, wo 12 Patient*innen eingeschlossen wurden. Bei dieser Machbarkeitsstudie konnten nur 25% der Fälle mit gutem neurologischen Outcome entlassen werden, jedoch ist wiederum die geringe Fallzahl zu beachten. Die durchschnittliche „low-flow“-Phase betrug 39 Minuten mit einer Spannweite von 24 bis 56 Minuten (100). Auch hier sind größere Studien geplant, um das Thema ECPR weiter zu erforschen, die praktische Umsetzung konnte mit dieser Studie bereits bewiesen werden.

Nur wenige Publikationen gibt es derzeit für pädiatrische Fälle. Eine Registeranalyse der ELSO-Daten mit 1903 Patient*innen, die innerklinisch mittels ECPR therapiert wurden, konnte ein „günstiges“ Überleben bei 41,4% der Fälle aufzeigen, welches als lebende Entlassung, permanente ventrikuläre Unterstützung (VAD) oder Organtransplantation definiert war. Eingeschlossen wurden hier alle beobachteten Atem-Kreislauf-Stillstände unter 18 Jahre, welche eine ECPR erhielten. Es konnte auch bewiesen werden, dass ein unbeobachteter Stillstand, ein nicht-schockbarer Rhythmus und eine nicht-kardiale Ursache mit einem schlechteren Outcome verbunden war (101). Jedoch ist diese Publikation wie jede Registeranalyse limitiert. Fehlende Dateneingabe oder Heterogenität verschlechtern die Vergleichbarkeit der Angaben. Zum Beispiel wurde das neurologische Outcome nicht bei allen Patient*innen angegeben; weniger als 15% wurden mittels „pediatric cerebral performance category“ (PCPC) untersucht (102).

Aktuelle Übersichtsarbeiten geben einen umfassenden Einblick in die derzeitige Evidenzlage zur extrakorporalen Reanimation bei therapierefraktärem Atem-Kreislauf-Stillstand. Ali et al. fassen die bisherigen klinischen Studien zusammen und zeigen, dass ECPR im Vergleich zur konventionellen Reanimation in ausgewählten Situationen mit höheren Überlebensraten und einem besseren neurologischen Outcome assoziiert sein kann (9). Auch Magnet und Poppe weisen in ihrem Überblick darauf hin, dass mehrere prospektive Studien und Registeranalysen ein potenziell verbessertes Überleben nach extrakorporaler Reanimation beschreiben, wobei die Ergebnisse zwischen den einzelnen Untersuchungen teilweise deutlich variieren (10). Supady et al. heben in seiner Analyse hervor, dass insbesondere die Ergebnisse der randomisierten Studien ein heterogenes Bild

zeigen und bislang keine eindeutige Überlegenheit der ECPR gegenüber der konventionellen Therapie in allen Settings belegt werden konnte. Insgesamt zeigt die aktuelle Datenlage vielversprechende Ansätze für den Einsatz der ECPR, verdeutlicht jedoch gleichzeitig den Bedarf an weiteren großen randomisierten Studien, um den tatsächlichen Nutzen dieser Therapieform klarer zu definieren.

5 Bewertung der Umsetzbarkeit eines ECPR-Programms in Graz

5.1 Aktuelle Situation in Graz/ in der Steiermark

Zumindest bis zum ersten Quartal 2026 gab es keine einheitliche Struktur, um in Graz eine ECPR durchzuführen. Weder präklinisch, noch innerklinisch sind Konzepte zur optimalen Durchführung vorhanden, um einen reibungslosen Ablauf zu garantieren. Nur in seltenen Fällen werden dennoch ECPRs durchgeführt, jedoch ohne vereinheitlichte Umsetzung, wodurch der Vergleich zu anderen Systemen schwerfällt. Die Outcomes werden hier nicht zentral gesammelt, wodurch keine Datenbank analysiert wird. Die Fallzahlen sind daher auch unbekannt, genauso wie die Komplikationsraten oder bereits aufgetretene Probleme. Für die präklinische Patient*innengruppe gibt es hier noch zusätzliche Hindernisse, für deren Verständnis man sich zunächst mit dem steirischen Rettungsdienst auseinandersetzen muss.

In Graz wird die prähospitalen Versorgung größtenteils vom Österreichischen Roten Kreuz (ÖRK) übernommen. Rund um die Uhr stehen zumindest zehn Rettungstransportwagen (RTW) zur Verfügung, die in der Regel mit zwei Rettungssanitäter*innen (RS) besetzt sind. Die Ausbildung dieses Personals ist im internationalen Vergleich sehr reduziert und beschränkt sich auf 260 Stunden, wovon 100 Stunden Theorie- und 160 Stunden Praxisausbildung entfallen. Hierbei liegt der primäre Fokus auf dem Umgang mit der Liege und dem Tragsessel, sowie dem Erkennen von Notfällen und deren basalen Behandlungsmöglichkeiten (zum Beispiel Lagerung, Verbandsanlage und Sauerstoffgabe). Das Monitoring ist auf eine orientierende klinische Untersuchung, das Messen der Sauerstoffsättigung und des Blutzuckers, sowie das manuelle nicht-invasive Blutdruckmessen limitiert. Eine umfangreiche Gabe von Notfallmedikamenten ist dieser Personalgruppe nicht gestattet. Die Rettungsfahrzeuge des steirischen Roten Kreuzes verfügen über keinen Monitor. Im Falle einer Reanimation wird ein halbautomatischer Defibrillator mitgeführt (AED). Eher die Ausnahme ist derzeit, wenn zumindest eine Person auf diesem RTW die Ausbildung zur Notfallsanitäterin bzw. zum Notfallsanitäter (NFS) abgeschlossen hat. Für diese erweiterte Ausbildung sind wiederum 480 Stunden notwendig, wovon 160 Stunden für eine theoretische Vertiefung und zumindest 40 Stunden für ein Krankenhauspraktikum genutzt werden, welches meistens auf einer Notaufnahme oder auf einer anästhesiologischen Abteilung absolviert wird. Nach erfolgreicher

Abschlussprüfung dürfen Notfallsanitäter*innen eigenständig Medikamente der sogenannten „Arzneimittelliste 1“ (AML) verabreichen. Darauf aufbauend gibt es noch die Möglichkeit weitere Notfallkompetenzen zu erwerben: „Notfallkompetenz Arzneimittellehre“ (NKA), „Notfallkompetenz Venenzugang und Infusion“ (NKV) und „Notfallkompetenz Intubation und Beatmung“ (NKI) (103). Zählt man alle Ausbildungen zusammen, so erhält man eine Dauer von 940 Stunden, was im Vergleich zu anderen internationalen Systemen sehr gering ist, da in anderen Ländern oft ein Bachelorstudium die Grundausbildung im Rettungsdienst darstellt. Zu den zehn RTWs kommen zusätzlich zwei spezielle Rettungsfahrzeuge hinzu, welche als „Notfallwagen“ oder „Jumbo“ bezeichnet werden. Sie unterscheiden sich vielfältig von anderen Rettungsautos und werden vom „Grazer Medizinercorps“ (MC) betrieben. Das MC ist Teil der Bezirksstelle Graz-Stadt des ÖRK und existiert seit 1890. Damals wurde es von Johann-Baptist Tilly, einem damaligen Wundarzt, gegründet, um mittels junger Medizinstudierender der Grazer Bevölkerung zu helfen und dabei bereits präklinische Versorgung zu gewährleisten (104, 105). Jeder Jumbo ist rund um die Uhr mit vier Personen besetzt, wovon alle eine spezielle Zusatzausbildung erhalten haben: als „Jumbohelfer*innen“ (JuHe) muss man zumindest RS sein und erhält anschließend einen tiefgehenden Einblick in den Umgang mit Geräten wie Monitor oder Beatmungsgerät. Ein Fokus wird bei dieser Ausbildung auf den Ablauf einer Reanimation gelegt, wodurch später am Jumbo ein hoher Versorgungsstandard bei Atem-Kreislauf-Stillständen entsteht. Abgeschlossen wird diese Vertiefung mit einem Prüfungsdienst, in dem das erworbene Wissen abgefragt wird. Zumindest eine Person auf diesem Notfallwagen ist ein sogenannter NKI-Rettungsmediziner (RM). Darunter versteht man jemanden mit der höchstmöglichen Ausbildung nach dem Sanitätergesetz von 2002, also einer/einem Notfallsanitäter*in mit der Notfallkompetenz Intubation und Beatmung. Jedoch durchläuft diese Person eine weitaus tiefergehende Ausbildung, in der man sich detailliert mit den einzelnen Themen der Notfallmedizin auseinandersetzt und über mindestens neun Monate viel Erfahrung am Jumbo sammelt, wo man von einem bereits fertigen RM supervidiert Einsätze leitet und im Anschluss Feedback erhält. Kumulativ mit allen bisherigen Lehrgängen beinhaltet die RM-Ausbildung rund 5000 Stunden, was wiederum im internationalen Vergleich sehr viel ist. Diese Erfahrung ist nötig, um bei lebensbedrohlichen Einsätzen das Teamleading übernehmen zu können und dabei eine Guideline-gerechte Versorgung bieten zu können.

Die notärztliche Versorgung wird in Graz über zwei Notarzteinsetzfahrzeuge (NEF), welche jeweils auf die östliche bzw. westliche Seite der Mur aufgeteilt sind, und einen Notarzthubschrauber (NAH) im Süden der Stadt gewährleistet. Gemeinsam mit den zwei Jumbos gibt es also für den gesamten Versorgungsbereich fünf Rettungsmittel, die primär für die lebensbedrohlichen Notfälle im prähospitalen Bereich gedacht sind. Die innerklinische Versorgung wird überwiegend von der Grazer Universitätsklinik im Osten und dem Landeskrankenhaus Graz II Standort West (kurz LKH West) gestemmt. Lediglich neurologische und psychiatrische Notfälle werden auch im Landeskrankenhaus Graz II Standort Süd (früher Landesnervenklinik Sigmund Freud genannt, kurz LSF) versorgt. Des Weiteren können im Krankenhaus der Elisabethinen und beim Krankenhaus der Barmherzigen Brüder Patient*innen aufgenommen werden. Allerdings sind hier die Intensivbetten und Therapiemöglichkeiten sehr begrenzt, wodurch sie nur in seltenen Fällen vom örtlichen Rettungsdienst angefahren werden. Beide Spitäler verfügen außerdem nicht über die Möglichkeit einer Herzkatheteruntersuchung und können keine ECMO-Bereitschaft anbieten. Letzteres kann in Graz nur an der Universitätsklinik und im LKH West umgesetzt werden, weshalb sie auch im Falle einer ECPR als primäre Zielorte zu erwägen wären. Hier ist lediglich zu beachten, dass die Herzkatheterbereitschaft zeitlich aufgeteilt ist: Montag bis Freitag von 07:00 bis 15:00 bieten beide Spitäler die Versorgung an, anschließend übernimmt das Herzkatheterlabor (HKL) des LKH West dienstags und freitags, sowie jeden zweiten Sonntag. Die restlichen Zeiten werden vom LKH Universitätsklinikum Graz gedeckt, was als Maximalversorger alle Formen der Therapie anbieten kann.

5.2 Potenzieller Patient*innenpool

In Österreich gibt es kein standardisiertes Reanimationsregister, in dem alle Fälle abgebildet sind. Bis Jänner 2026 gab es in Graz keine einheitliche Aufzeichnung dieser Reanimationen. Lediglich das NEF Graz Ost erstellte in den letzten Jahren eine Datenbank, um einen Überblick zu erhalten, allerdings werden dadurch weniger als die Hälfte aller Patient*innen erfasst und durch die geographische Lage könnte es zu einer Verzerrung in diesem Datenpool kommen. Seit 1. Jänner 2026 gibt es ein einheitliches Register, welches von beiden Grazer NEFs gepflegt wird. Daher kann man bisher keine genaue Aussage zu Fallzahlen machen, welche auf wissenschaftlichen Daten eines mehrjährigen Registers zurückzuführen sind. Zumindest kann man Hochrechnungen aufstellen, wodurch man einen Überblick erhält. Legt man die am häufigsten verwendeten Auswahlkriterien für eine

ECPR zugrunde – beobachteter Atem-Kreislauf-Stillstand, initial schockbarer Herzrhythmus oder zumindest pulslose elektrische Aktivität, sowie ein Patient*innenalter unter 70 Jahren – so wurden im Jänner 2026 sechs Fälle dokumentiert, in denen eine extrakorporale Reanimation hätte erwogen werden können. Aufgerechnet auf ein Jahr könnten also bis zu 72 Patient*innen von einer ECPR profitieren. Natürlich muss man bei solchen Hochrechnungen verschiedene Faktoren mitbedenken, die zu einer Reduktion dieser Zahl führen könnten. Bei einem Teil dieser Fälle könnte ein ROSC bis zum Eintreffen im Krankenhaus auftreten, wodurch der Einbau der ECMO in vielen Fällen obsolet wäre. Auch können saisonale Schwankungen auftreten, wodurch die Anzahl in manchen Monaten stark abweichen könnte. Weiters könnte eine längere Anfahrt zum Notfallort bzw. ein längerer Transportweg ins Spital eine ECPR obsolet machen, wenn die „low-flow“-Zeit damit zu lange wäre.

Nach den Angaben von Poppe et al. waren zwischen August 2013 und Ende Juli 2014 rund 6% aller präklinischen Reanimationen für eine ECPR in der Notaufnahme geeignet (34). Zu beachten ist hier, dass nur schockbare Herzrhythmen für die Inklusion vorgesehen waren. Rechnet man diese Kriterien auf Grazer Verhältnisse um, so würden sich die potenziellen Fallzahlen auf rund 36 pro Jahr reduzieren. Prinzipiell ist damit zu rechnen, dass sich die Anzahl an ECPRs mit zunehmender Erfahrung und Weiterentwicklung des Systems steigern wird. Im Wiener AKH wurden im Jahr 2020 auch lediglich 29 extrakorporale Reanimationen bei Patient*innen aus der Präklinik durchgeführt. Diese Zahl konnte bis 2023 auf 41 gesteigert werden (106).

Mit Beginn 2026 wurden in der Stadt Graz 345.391 Einwohner*innen registriert (107). Mit dem Bezirk Graz-Umgebung, der auch durch das Grazer Notarztsystem versorgt wird, kommen hier noch rund 165.000 EinwohnerInnen dazu. Im Vergleich zu anderen ECPR-Zentren wie Paris, Minneapolis oder Melbourne ist die Bevölkerung also deutlich geringer, wodurch auch weniger Fallzahlen entstehen. In der deutschen Stadt Stuttgart (Stand Dezember 2025: 605.663 Einwohner*innen (108)) wurde 2024 ein sogenanntes Medical Intervention Car (MIC) etabliert, welches – angelehnt an ein NEF, nur mit mehr Equipment und zusätzlicher Expertise – in einem Jahr circa 500 Einsätze präklinisch verzeichnete. Von diesen waren 162 Alarmierungen (32,4%) aufgrund einer ECMO oder ECPR. Nur in 60% der Einsätze kam es auch tatsächlich zu einem direkten Patient*innenkontakt, was unter anderem auf Fehllarmierungen oder langen Anfahrtszeiten zurückzuführen ist (109). Auf Graz umgemünzt könnten sich also bis zu

rund 80 Fälle ergeben, wo präklinische Patient*innen prinzipiell von einer ECMO/ ECPR profitieren könnten. Bei diesen Zahlen muss berücksichtigt werden, dass die Auswahlkriterien nicht öffentlich bekannt sind und daher die Disponierung des MIC in Stuttgart möglicherweise ganz anders abläuft, als es in Graz passieren würde.

5.3 Organisatorische Anforderungen

Je nach unterschiedlichem ECPR-Programm müsste der Fokus bei der Umsetzung auf unterschiedlichen Bereichen liegen. Im Falle des präklinischen Einbaus der ECMO müssten drei große Punkte etabliert werden: 1) ein passendes Auto, in dem das ganze Material verstaut wäre und welches idealerweise rund um die Uhr zur Verfügung stehen würde. Je nach Standort müssen dann vor Ort entsprechende Vorbereitungen getroffen werden, um die Batterie des Autos am Stützpunkt laden zu können und weiters müssen ausreichend Lagermöglichkeiten für Ersatzmaterialien bereitstehen. In Graz könnte hierfür konkret eine der zwei Dienststellen des Roten Kreuzes benutzt werden, an denen die organisatorischen Voraussetzungen bereits gegeben wären oder man könnte dieses Fahrzeug an einem der zwei Notarztstützpunkte stationieren. Weiters müssen die Grazer Rettungsautos in der Lage sein, Patient*innen mit implantierter ECMO zu transportieren. Die derzeitigen RTWs sind für solche Einsätze nicht gerüstet und halten dementsprechend keine Halterungen oder Verstaunungen vor, um das Material während der Fahrt fachgerecht zu sichern. 2) Es muss zudem Personal organisiert werden, welches dieses Fahrzeug besetzt und dabei in der Lage ist, ohne lange Verzögerungen ausfahren zu können. Es macht dementsprechend wenig Sinn, wenn das ärztliche Personal, welches schlussendlich die ECMO einbauen soll, erst von einem anderen Stützpunkt abgeholt werden müsste, da hierdurch die „low-flow“-Zeit verlängert wäre. An der Grazer Universitätsklinik wird das NEF vorwiegend von Anästhesist*innen besetzt, welche mit entsprechender Schulung und Erfahrung auch die Dienste auf diesem Fahrzeug übernehmen könnten. Alternativ wird das NEF auch mit Chirurg*innen und Internist*innen besetzt, was wiederum Expertise von anderen Fachrichtungen integriert. Das Notarzteinsatzfahrzeug im Westen der Stadt wird durch Anästhesist*innen, Unfallchirurg*innen und freiberufliche Notärzt*innen bespielt. 3) Entsprechende Schulungen müssen interdisziplinär durchgeführt werden, um einen einwandfreien Ablauf garantieren zu können. Hier ist wichtig, alle Schnittstellen auszutesten, bei denen es üblicherweise zu Komplikationen kommen kann. Das Zusammenarbeiten vom ECMO-Team mit anderen Sanitäter*innen, vor allem den Rettungsmediziner*innen, welche in solchen herausfordernden Situationen die restliche

Versorgung inkl. Intubation und Medikamentengabe übernehmen können, trägt dazu bei, das Outcome potenziell zu verbessern. Auch Übergaben und Umlagerungen müssen geübt werden. Hier empfiehlt es sich auch Trainingsvideos zu produzieren, welche diese speziellen Prozeduren detailliert widerspiegeln und so die Einschulung von neuem Personal erleichtern.

Die alternative Möglichkeit, bei der die ECPR innerklinisch durchgeführt wird, birgt auch wiederum Herausforderungen für den Rettungsdienst. Derzeit läuft eine präklinische Reanimation in Graz tendenziell invasiv ab; eine endotracheale Intubation, arterielle invasive Blutdruckmessung, Blutgasanalyse (BGA) und Sonographie gehören zum üblichen Prozedere. Für den gezielten Einsatz einer ECPR sind hier viele Maßnahmen kritisch zu hinterfragen, um die „low-flow“-Zeit wieder kurz zu halten (110). Auch bei dieser Form der extrakorporalen Reanimation sind Schulungen wichtig, um die Herangehensweise der Notärztinnen und Sanitäter*innen zu verändern.

Innerklinisch müssen auch viele Ressourcen bereitgestellt werden, da der Einbau einer ECMO sehr aufwendig und maximalinvasiv ist. Idealerweise sollte die Implementierung von erfahrenen Kolleg*innen übernommen werden. Das kardiologische Team der Grazer Universitätsklinik nutzt schon seit einigen Jahren extrakorporale Verfahren bei Patient*innen mit kardiogenem Schock und hat somit einige Erfahrungswerte im Grazer Einzugsgebiet (111). Am LKH Universitätsklinikum gibt es rund um die Uhr Kardiotechniker*innen, die für den Einsatz eines extrakorporalen Verfahrens hilfreich sein können; am LKH West stehen diese nicht zur Verfügung, was durch ärztliches und pflegerisches Personal kompensiert werden muss. In beiden Grazer Spitälern werden ECMO-Patient*innen auf der Intensivstation betreut, wodurch der Umgang mit diesen für diplomierte Pflegekräfte bekannt sein sollte.

Die wechselnde Herzkatheterbereitschaft in Graz sorgt dafür, dass gegebenenfalls Interhospitaltransporte durchgeführt werden müssen, wenn Komplikationen beim Einbau der ECMO auftreten. Kardiochirurgische Eingriffe können nur an der Universitätsklinik durchgeführt werden, wodurch die Verbringung dieser Patient*innen dorthin konzipiert werden muss. Auch hier würde konkreter Schulungsbedarf aufkommen.

5.4 Ökonomische Betrachtung

Aufgrund der niedrigen potenziellen Fallzahlen ist mit hohen Kosten pro Patient*in zu rechnen. Wie bereits oben angegeben, kann der Einsatz einer ECPR in wenigen selektierten Fällen kosteneffizient sein. Unter anderem kann auch die Zentrumserfahrung

die möglichen Ausgaben senken, da viel Expertise in einem Krankenhaus die Komplikationsraten senkt. In der konkreten Umsetzung in Graz ist es definitiv von Vorteil, dass derzeit schon viele Ressourcen bereitstehen und diese lediglich für den ECPR-Einsatz systematisch miteinbezogen werden müssen. Der örtliche Rettungsdienst zum Beispiel ist bereits mit dem Großteil an Equipment ausgestattet. Ein mechanisches Reanimationsdevice müsste für beide NEFs angeschafft werden, um potenzielle Patient*innen sicher unter laufender Reanimation transportieren zu können. Für die Schulung des präklinischen Personals ist nur wenig Investition notwendig, da das System größtenteils über freiwillige Mitarbeiter*innen funktioniert und hier ein großes Engagement und viel Bereitschaft für Aus- und Fortbildungen besteht. Innerklinisch sind hier mehr Finanzen notwendig, da das Krankenhauspersonal angestellt ist und daher die Schulungen innerhalb der Arbeitszeit stattfinden müssen.

Es könnte erwogen werden, alle möglichen präklinischen Patient*innen nur an ein Krankenhaus zu transportieren, um den organisatorischen Aufwand in Grenzen zu halten. Jedoch müsste man hierfür wiederum die Herzkatheterbereitschaft in Graz anpassen, sodass das zuständige Krankenhaus rund um die Uhr von der Rettung angefahren werden kann. Konkret würde sich hier die Grazer Universitätsklinik anbieten, da sie nicht nur mehr Herzkatheterbereitschaft pro Woche hat und somit die Änderung leichter zu organisieren wäre, sondern auch aufgrund der vermehrten Therapieoptionen und dem größeren Personalpool.

Für den Standort Graz erscheint die Implementierung eines ECPR-Programmes unter ökonomischen Gesichtspunkten grundsätzlich möglich, jedoch nur bei sorgfältiger Patient*innenselektion, ausreichenden Fallzahlen und hoher struktureller Effizienz sinnvoll.

5.5 Risikobewertung und Herausforderungen

Die Etablierung eines so umfassenden Systems wie einer ECPR birgt natürlich besonders in der Anfangsphase einige Risiken. In Graz dürfte es definitiv zu einer Herausforderung werden, selektierte Patient*innen unter 60 Minuten zur ECMO zu bringen. Aufgrund der zum Teil weiten Fahrstrecken kann diese Zeitgrenze durchaus auch überschritten werden, wenn der Notfall in weiter entfernten Bezirken stattfindet. Auch der Morgen- und Nachmittagsverkehr stellt eine Hürde dar, weil es mehrere vielbefahrene Straßen gibt, die zu Pendelzeiten für Stau sorgen. Zudem kann die Reanimationsdauer vom verfügbaren Personal abhängig sein, da man innerhalb der Stadt durch das Jumbo- und NEF-System

viel „Manpower“ aufweisen kann, jedoch bei Belegung dieser Fahrzeuge bzw. außerhalb der Stadt auf weniger Ressourcen zurückgreifen muss.

Bereits in der Rettungsleitstelle sind die ersten Schritte zu setzen, um überhaupt eine Patient*innenselektion durchführen zu können. Idealerweise werden die diensthabenden klinischen Ärzt*innen telefonisch kontaktiert, um einen potenziellen ECPR-Fall anzukündigen und um so bereits alle Vorbereitungen veranlassen zu können. Der Rettungsdienst birgt weiters das Risiko, dass viele Kolleg*innen strukturell geschult werden müssen, um ein anderes „mindset“ etablieren zu können, da bei der ECPR doch andere Prioritäten zu setzen sind.

Innerklinisch dürfte die hohe Personalbindung zu einer Herausforderung werden, da ein extrakorporales Verfahren viele Ressourcen benötigt, um komplikationsarm abzulaufen. In Zeiten des Pflegemangels könnte es teilweise schwierig werden, genügend Pflegepersonal für die aufwendige Betreuung zu finden. Auch die langfristige Belegung von Intensivbetten muss hier bedacht werden, da diese für andere Patient*innen nicht mehr zur Verfügung stehen.

Medizinisch ist gerade in der Anfangsphase eines ECPR-Programmes mit vielen Komplikationen zu rechnen, da die Etablierung in der Realität nie komplikationslos ablaufen kann. Blutungen, Thrombosen oder Ischämien in den Extremitäten sind Herausforderungen, die sich gerade am Beginn eines Systems abzeichnen. Hier gilt es schnelle Lösungsansätze zu entwickeln und das behandelnde Personal darin zu schulen, da eine hohe Komplikationsrate schnell zu schlechter Stimmung oder sogar Ablehnung im Team führen kann.

Auch ethische Herausforderungen können entstehen, gerade wenn nur limitierte Ressourcen vorhanden sind und dann entschieden werden muss, welche Therapieform für welche Patient*innen verfügbar ist oder eben nicht. Auch wenn die Fallzahlen in Graz überschaubar bleiben werden, so kann es in Einzelfällen dennoch zu Kapazitätseinschränkungen kommen, auf die man vorbereitet sein sollte. Ein neu eingeführtes, invasives Verfahren wie eine ECPR birgt auf der anderen Seite das Risiko einer Übertherapie, da man gerade zu Beginn den Drang nach einem Therapieerfolg verspüren kann. Klar vordefinierte Prozedere können hier helfen, strukturierte Therapiepläne umzusetzen, ohne persönliche Einflüsse zuzulassen.

Zu guter Letzt könnte auch die Evidenzlage zu Verunsicherungen führen. Eine prospektive Vergleichsstudie für präklinische Atem-Kreislauf-Stillstände mit ECPR, die ein signifikant

besseres neurologisches Outcome aufzeigt, ist bis jetzt noch nicht publiziert. Viele Studien lassen die möglichen Therapieerfolge erahnen. Jedoch zeigt die Evidenz zum jetzigen Zeitpunkt noch keine klare Aussage, die den invasiven Einsatz der extrakorporalen Reanimation so deutlich befürwortet. Speziell in der Anfangsphase der Etablierung kann es hier schnell zu Zweifeln kommen. Weitere laufende Studien könnten den Einsatz der ECPR mehr rechtfertigen. Bis dahin lassen die bisherigen Publikationen zumindest die Aussage zu, dass es in auserwählten Patient*innengruppen einen möglichen Benefit bringen könnte. Aufklärende Fortbildungen könnten eine entscheidende Rolle spielen, um das eingesetzte Personal weiterhin fokussiert und motiviert an der Umsetzung der ECPR arbeiten zu lassen.

6 Diskussion

Die derzeitige Literatur zum Thema ECPR wird kontrovers diskutiert. Einerseits gibt es viele Publikationen, vor allem in den letzten 20 Jahren, andererseits fehlt immer noch eine prospektive, randomisierte Studie, die den Einsatz bei außerklinischen Atem-Kreislauf-Stillständen durch signifikante Ergebnisse rechtfertigt. Aus den derzeitigen Studien lassen sich zumindest einige wichtige Rückschlüsse ziehen, um eine extrakorporale Reanimation bestmöglich umzusetzen. Zentraler Punkt dürfte hier die Patient*innenselektion sein. Durch streng definierte Auswahlkriterien kann diese invasive Therapieform denjenigen angeboten werden, die wohl am meisten profitieren. Zu beachten ist hier vor allem das Alter der Patient*innen, die Beobachtung des Atem-Kreislauf-Stillstandes und der initiale Herzrhythmus. In der klinischen Praxis bleibt die Indikationsstellung jedoch trotz definierter Kriterien häufig eine Einzelfallentscheidung, die stark von der Erfahrung des Teams und den situativen Rahmenbedingungen beeinflusst wird. In Bezug auf Logistik ist bei der Auswahl wichtig, dass die 60 Minuten „low-flow“-Zeit nicht überschritten wird, da ab diesem Zeitpunkt mit weniger guten Outcomes zu rechnen ist. Neben der „low-flow“-Zeit spielt jedoch auch die „no-flow“-Phase eine entscheidende Rolle, da insbesondere eine fehlende initiale Reanimation mit einer deutlich schlechteren neurologischen Prognose assoziiert ist. Der Therapieerfolg hängt außerdem von der zugrunde liegenden Ursache der Reanimation ab. Vorwiegend kardiale Auslöser werden von der derzeitigen Literatur untersucht. Auch andere Ätiologien wie Hypothermie oder Intoxikation scheinen eine Indikation für eine ECPR zu sein. Durch die heterogenen Ergebnisse bislang veröffentlichter Studien kann kein konstanter Benefit für alle Patient*innen gezeigt werden. Nur wenige prospektive Daten sind bis jetzt erhoben worden. Zwei große Studien sind derzeit noch im Gange, beziehungsweise wurden noch keine Ergebnisse veröffentlicht: die „APACAR2“-Studie aus Paris und die „on-scene“-Studie aus den Niederlanden (112). Der Großteil der bis jetzt genutzten Daten basiert weiterhin auf retrospektiven Analysen, Registerdaten oder kleineren Kohortenstudien. Diese Studienformen sind naturgemäß anfällig für Selektionsbias, da vor allem Patient*innen eingeschlossen werden, die bereits im Vorfeld als potenziell geeignet erscheinen. Dadurch entsteht ein verzerrtes Bild, welches den tatsächlichen Nutzen der ECPR im klinischen Alltag möglicherweise überschätzt. Auch die vorhandenen randomisierten Studien weisen Limitationen auf, wie zum Beispiel geringe Fallzahlen oder vorzeitige Studienabbrüche aufgrund von Sicherheitsanalysen oder unerwarteten Zwischenergebnissen. Dies erschwert

eine klare Interpretation der Resultate und limitiert die Generalisierbarkeit auf andere Gesundheitssysteme. Zusätzlich besteht eine erhebliche Heterogenität hinsichtlich Einschlusskriterien, logistischen Abläufen und therapeutischer Strategien, wodurch ein direkter Vergleich der Studien nur eingeschränkt möglich ist. Insgesamt lässt sich somit festhalten, dass die derzeitige Evidenz zwar vielversprechende Ansätze zeigt, jedoch noch nicht ausreichend robust ist, um eine flächendeckende Implementierung ohne weitere kritische Evaluation zu rechtfertigen. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass ein verbessertes hämodynamisches Outcome oder ein erhöhter ROSC nicht zwangsläufig mit einem guten neurologischen Langzeitergebnis gleichzusetzen ist. Gerade die neurologische Prognose stellt den entscheidenden Endpunkt dar, welcher durch die ECPR nicht in allen Studien signifikant verbessert werden konnte.

Ein weiterer zentraler Aspekt in der Diskussion ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse internationaler Hochleistungszentren auf regionale Versorgungssysteme wie jene in Graz. Viele der publizierten Studien stammen aus spezialisierten Zentren mit hoher Fallzahl, standardisierten Protokollen und eingespielten interdisziplinären Teams. Diese Strukturen ermöglichen es, die „low-flow“-Zeit konsequent zu minimieren und dadurch bessere Outcomes zu erzielen. Im Gegensatz dazu steht ein System wie in Graz, welches aktuell keine einheitlich etablierte ECPR-Struktur aufweist und in dem die Fallzahlen deutlich geringer sind. Die fehlende Routine sowie die notwendige initiale Aufbauphase eines solchen Programms könnten sich negativ auf die Ergebnisse auswirken, insbesondere in der frühen Implementierungsphase. Darüber hinaus unterscheiden sich auch präklinische Faktoren, wie beispielsweise die Organisation des Rettungsdienstes, die Verfügbarkeit von Notärzt*innen oder die Laienreanimationsrate, welche einen erheblichen Einfluss auf das neurologische Outcome haben. Diese Unterschiede führen dazu, dass die in internationalen Studien erzielten Ergebnisse nur eingeschränkt auf lokale Gegebenheiten übertragen werden können. Eine unreflektierte Übernahme solcher Konzepte birgt daher das Risiko, die tatsächlichen Erfolgsaussichten zu überschätzen. Zusätzlich scheint die Erfahrung eines Zentrums einen entscheidenden Einfluss auf das Outcome zu haben. Studien zeigen, dass sogenannte „High-volume“-Zentren mit standardisierten Abläufen und hoher Fallzahl bessere Ergebnisse erzielen. Dies impliziert gleichzeitig, dass in der initialen Phase der Implementierung eines ECPR-Programms mit einer Lernkurve zu rechnen ist, welche sich potenziell negativ auf die frühen Behandlungsergebnisse auswirken kann.

Neben den strukturellen und evidenzbasierten Limitationen müssen auch ethische Fragestellungen in die Diskussion berücksichtigt werden. Die Indikationsstellung zur ECPR erfolgt in der Regel unter erheblichem Zeitdruck und basiert auf einer Vielzahl von Faktoren, die nicht immer eindeutig zu bewerten sind. Insbesondere zu Beginn der Reanimation ist das Ausmaß eines potenziellen neurologischen Schadens oft nicht abschätzbar, wodurch die Entscheidung für eine hochinvasive Therapieform wie die ECMO mit Unsicherheiten behaftet ist. Daraus ergibt sich die Gefahr einer Übertherapie bei Patient*innen, die letztlich keine nachhaltigen Benefits von der Maßnahme haben. Gleichzeitig stellt sich die Frage, in welchem Ausmaß Ressourcen gebunden werden dürfen, wenn die Erfolgsaussichten unklar sind. Die Durchführung einer ECPR erfordert eine erhebliche personelle und infrastrukturelle Kapazität, welche in anderen Bereichen der Notfall- und Intensivmedizin fehlen könnten. Gerade in Zeiten begrenzter Ressourcen und zunehmendem Personalmangel ist daher eine sorgfältige Abwägung zwischen individuellem Nutzen und systemischer Belastung erforderlich.

Die systemische Umsetzung ist ein essenzieller Bestandteil für den Erfolg einer ECPR. Ein einzelner Interventionist kann allein kein extrakorporales Verfahren umsetzen. Beginnend beim Rettungsdienst sind entscheidende Maßnahmen zu setzen, um so ein System etablieren zu können. Auch innerklinisch ist das interdisziplinäre Zusammenwirken aller Berufsgruppen von Bedeutung. Besonderes Augenmerk muss hier auf alle potenziellen Schnittstellen gelegt werden, da gerade hier Komplikationen auftreten können. Der Informationsfluss darf von der prähospitalen Versorgung bis zum ECMO-Team und weiters bis auf die Intensivstation nicht abreißen und muss gleichzeitig strukturiert ablaufen, um dadurch keine wertvolle Zeit verstreichen zu lassen. Der große Fokus auf Reduktion der „low-flow“-Zeit hängt unmittelbar mit der strukturierten Kommunikation aller Beteiligten in einem ECPR-System zusammen und wird darum auch von bisher veröffentlichter Literatur propagiert. Viele Umsetzungsideen berufen auf Expert*innenmeinungen, da es für Details bei der extrakorporalen Reanimation zu wenig Daten gibt. Zumindest können so Meinungen von Kolleg*innen einfließen, die jahrelange Erfahrung im Bereich Reanimatologie beziehungsweise ECMO-Therapie haben (113).

Bei entsprechender Umsetzung des ECPR-Programms kann diese invasive Maßnahme durchaus einen Unterschied für die individuellen Patient*innen bringen. Auch wenn die Publikationen kein signifikant besseres Outcome gezeigt haben, so geben Einzelfälle zumindest die Hoffnung, einzelne Schicksale verändern zu können. Klar ist, dass eine

ECMO-Maschine einen besseren Flow und damit eine verbesserte Perfusion erzeugen kann als die herkömmliche Herzdruckmassage. Bezogen auf die danach folgende Therapie bietet der extrakorporale Kreislauf eine gute Möglichkeit als „bridge-to-therapy“-Verfahren eingesetzt zu werden. Gerade beim therapierefraktären Kammerflimmern kann dadurch eine mögliche perkutane Koronarintervention (PCI) umgesetzt werden. Ebenfalls kann eine lebensrettende Thrombektomie stattfinden, wenn man mittels ECPR die Perfusion überbrückt. Das therapeutische Zeitfenster kann also verlängert werden, wodurch der Begriff „time-limited salvageability“ geprägt wird. Systemisch gedacht kann die regionale Notfallversorgung auf ein höheres Niveau angehoben werden, da durch die extrakorporale Reanimation Therapiemöglichkeiten erschlossen werden, die davor nicht umsetzbar waren. In Graz könnte die aufgeteilte Zuständigkeit zwischen LKH Universitätsklinik und LKH Graz II Standort West zu einer verbesserten Zusammenarbeit führen, da die Einführung eines ECPR-Programms beide Spitäler betreffen würde und somit der Austausch forciert werden könnte. Gemeinsames Ausarbeiten eines Konzeptes führt automatisch zu einer besseren Verknüpfung zweier Säulen der Grazer Gesundheitsversorgung.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die extrakorporale kardiopulmonale Reanimation ein innovatives und potenziell lebensrettendes Therapieverfahren darstellt, dessen Nutzen jedoch stark von strukturellen Rahmenbedingungen, einer präzisen Patient*innenselektion und einer effizienten interdisziplinären Zusammenarbeit abhängt. Für den Standort Graz erscheint eine Implementierung grundsätzlich möglich, allerdings nur unter der Voraussetzung, dass klare Protokolle etabliert, ausreichende Schulungsmaßnahmen durchgeführt und die vorhandenen Ressourcen gezielt eingesetzt werden. Eine schrittweise Einführung mit begleitender Evaluation könnte dabei helfen, die Effektivität des Systems realistisch einzuschätzen und gegebenenfalls Anpassungen vorzunehmen. Langfristig wird es entscheidend sein, weitere qualitativ hochwertige Studien durchzuführen, um die Rolle der ECPR im Gesamtkonzept der Reanimation besser definieren zu können.

7 Schlussfolgerung

Die extrakorporale kardiopulmonale Reanimation stellt eine vielversprechende Erweiterung der modernen Reanimatologie dar, deren Potenzial insbesondere bei selektierten Patient*innen deutlich wird. Die Analyse der aktuellen Studienlage zeigt jedoch, dass der Nutzen dieser Therapieform stark von klar definierten Rahmenbedingungen abhängt. Neben der Patient*innenauswahl spielen vor allem zeitkritische Faktoren, strukturelle Voraussetzungen sowie die interdisziplinäre Zusammenarbeit eine entscheidende Rolle für den Therapieerfolg. Die derzeitige Evidenz weist zwar auf mögliche Vorteile hin, ist jedoch durch methodische Limitationen und eine hohe Heterogenität der Studien eingeschränkt.

Für den Standort Graz ergibt sich daraus ein differenziertes Bild. Einerseits bestehen bereits zahlreiche infrastrukturelle und personelle Voraussetzungen, die eine Implementierung eines ECPR-Programms grundsätzlich ermöglichen. Andererseits zeigt die Analyse der lokalen Gegebenheiten sowie der potenziellen Fallzahlen, dass eine erfolgreiche Umsetzung nur unter klar definierten organisatorischen Strukturen und mit entsprechender Bündelung von Ressourcen realisierbar ist. Insbesondere die Etablierung standardisierter Abläufe, gezielter Schulungsprogramme sowie einer zentralen Datenerfassung erscheint essenziell, um die Qualität und Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen.

Die Einführung eines solchen Programms sollte daher nicht als isolierte Maßnahme betrachtet werden, sondern als Bestandteil eines umfassenden Versorgungskonzepts, das sowohl präklinisch als auch innerklinisch Prozesse integriert. Eine schrittweise Implementierung mit begleitender wissenschaftlicher Evaluation könnte dabei helfen, potenzielle Schwachstellen frühzeitig zu identifizieren und Anpassungen vorzunehmen. Gleichzeitig bietet sich dadurch die Möglichkeit, einen wertvollen Beitrag zur internationalen Datenlage zu leisten.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die ECPR kein universell einsetzbares Therapieverfahren darstellt, sondern gezielt und unter optimalen Bedingungen angewendet werden muss. Unter Berücksichtigung der aktuellen Evidenz sowie der lokalen Strukturen erscheint die Umsetzung eines ECPR-Programms in Graz prinzipiell möglich, jedoch mit erheblichen Herausforderungen verbunden. Die zukünftige Entwicklung wird maßgeblich davon abhängen, inwieweit es gelingt, klinische Erfahrungen, wissenschaftliche

Erkenntnisse und organisatorische Effizienz miteinander zu verknüpfen, um den größtmöglichen Nutzen für betroffene Patient*innen zu erzielen.

8 Literaturverzeichnis

1. Yannopoulos D, Bartos J, Raveendran G, Walser E, Connett J, Murray TA, et al. Advanced reperfusion strategies for patients with out-of-hospital cardiac arrest and refractory ventricular fibrillation (ARREST): a phase 2, single centre, open-label, randomised controlled trial. *Lancet*. 2020;396:1807-16. doi:10.1016/S0140-6736(20)32338-2
2. Bartos JA, Frascione RJ, Conterato M, Wesley K, Lick C, Sipprell K, et al. The Minnesota mobile extracorporeal cardiopulmonary resuscitation consortium for treatment of out-of-hospital refractory ventricular fibrillation: Program description, performance, and outcomes. *EClinicalMedicine*. 2020;29-30:100632. doi:10.1016/j.eclinm.2020.100632
3. Belohlavek J, Smalcova J, Rob D, Franek O, Smid O, Pokorna M, et al. Effect of Intra-arrest Transport, Extracorporeal Cardiopulmonary Resuscitation, and Immediate Invasive Assessment and Treatment on Functional Neurologic Outcome in Refractory Out-of-Hospital Cardiac Arrest: A Randomized Clinical Trial. *JAMA*. 2022;327:737-47. doi:10.1001/jama.2022.1025
4. Suverein MM, Delnoij TSR, Lorusso R, Brandon Bravo Bruinsma GJ, Otterspoor L, Elzo Kraemer CV, et al. Early Extracorporeal CPR for Refractory Out-of-Hospital Cardiac Arrest. *N Engl J Med*. 2023;388:299-309. doi:10.1056/NEJMoa2204511
5. Baldi E, Whent J, Caputo ML, Haywood KL, Lilja G, Masterson S, et al. European Resuscitation Council Guidelines 2025 Epidemiology in Resuscitation. *Resuscitation*. 2025;215:110733. doi:10.1016/j.resuscitation.2025.110733
6. Semeraro F, Schnaubelt S, Olasveengen TM, Bignami EG, Bottiger BW, Fijacko N, et al. European Resuscitation Council Guidelines 2025 System Saving Lives. *Resuscitation*. 2025;215:110821. doi:10.1016/j.resuscitation.2025.110821
7. Guy A, Kawano T, Besserer F, Scheuermeyer F, Kanji HD, Christenson J, et al. The relationship between no-flow interval and survival with favourable neurological outcome in out-of-hospital cardiac arrest: Implications for outcomes and ECPR eligibility. *Resuscitation*. 2020;155:219-25. doi:10.1016/j.resuscitation.2020.06.009
8. Low CJW, Ramanathan K, Ling RR, Ho MJC, Chen Y, Lorusso R, et al. Extracorporeal cardiopulmonary resuscitation versus conventional cardiopulmonary resuscitation in adults with cardiac arrest: a comparative meta-analysis and trial sequential analysis. *Lancet Respir Med*. 2023;11:883-93. doi:10.1016/S2213-2600(23)00137-6
9. Ali S, Meuwese CL, Moors XJR, Donker DW, van de Koolwijk AF, van de Poll MCG, et al. Extracorporeal cardiopulmonary resuscitation for refractory cardiac arrest: an overview of current practice and evidence. *Neth Heart J*. 2024;32:148-55. doi:10.1007/s12471-023-01853-5
10. Magnet I, Poppe M. [Extracorporeal resuscitation-criteria, prerequisites, outcome : A reality check]. *Med Klin Intensivmed Notfmed*. 2022;117:325-32. doi:10.1007/s00063-022-00913-9
11. Soar J, Bottiger BW, Carli P, Jimenez FC, Cimpoesu D, Cole G, et al. European Resuscitation Council Guidelines 2025 Adult Advanced Life

- Support. Resuscitation. 2025;215:110769.
doi:10.1016/j.resuscitation.2025.110769
12. Parish DC, Goyal H, James E, Dane FC. Pulseless Electrical Activity: Echocardiographic Explanation of a Perplexing Phenomenon. *Front Cardiovasc Med*. 2021;8:747857. doi:10.3389/fcvm.2021.747857
 13. Prosen G, Krizmaric M, Završnik J, Grmec S. Impact of modified treatment in echocardiographically confirmed pseudo-pulseless electrical activity in out-of-hospital cardiac arrest patients with constant end-tidal carbon dioxide pressure during compression pauses. *J Int Med Res*. 2010;38:1458-67. doi:10.1177/147323001003800428
 14. Kloner RA, King KS, Harrington MG. No-reflow phenomenon in the heart and brain. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*. 2018;315:H550-H62. doi:10.1152/ajpheart.00183.2018
 15. Schmid C, Philipp A. Leitfaden Extrakorporale Zirkulation. Heidelberg: Springer; 2011. 126 p.
 16. Larsen R. Anästhesie und Intensivmedizin in Herz-, Thorax- und Gefäßchirurgie. Berlin: Springer; 2012. 483 p.
 17. Badulak J, Abrams D, Luks AM, Zakhary B, Conrad SA, Bartlett R, et al. Position paper on the physiology and nomenclature of dual circulation during venoarterial ECMO in adults. *Intensive Care Med*. 2024;50:1994-2004. doi:10.1007/s00134-024-07645-8
 18. Lott C, Karageorgos V, Abelairas-Gomez C, Alfonzo A, Bierens J, Cantellow S, et al. European Resuscitation Council Guidelines 2025 Special Circumstances in Resuscitation. *Resuscitation*. 2025;215:110753. doi:10.1016/j.resuscitation.2025.110753
 19. Brandorff M, Owyang CG, Tonna JE. Extracorporeal membrane oxygenation for cardiac arrest: what, when, why, and how. *Expert Rev Respir Med*. 2023;17:1125-39. doi:10.1080/17476348.2023.2288160
 20. Mattox KL, Beall AC, Jr. Resuscitation of the moribund patient using portable cardiopulmonary bypass. *Ann Thorac Surg*. 1976;22:436-42. doi:10.1016/s0003-4975(10)64452-9
 21. Monsieurs KG, Nolan JP, Bossaert LL, Greif R, Maconochie IK, Nikolaou NI, et al. European Resuscitation Council Guidelines for Resuscitation 2015: Section 1. Executive summary. *Resuscitation*. 2015;95:1-80. doi:10.1016/j.resuscitation.2015.07.038
 22. Lamhaut L, Jouffroy R, Soldan M, Phillipe P, Deluze T, Jaffry M, et al. Safety and feasibility of prehospital extra corporeal life support implementation by non-surgeons for out-of-hospital refractory cardiac arrest. *Resuscitation*. 2013;84:1525-9. doi:10.1016/j.resuscitation.2013.06.003
 23. Richardson ASC, Tonna JE, Nanjappa V, Nixon P, Abrams DC, Raman L, et al. Extracorporeal Cardiopulmonary Resuscitation in Adults. Interim Guideline Consensus Statement From the Extracorporeal Life Support Organization. *ASAIO J*. 2021;67:221-8. doi:10.1097/MAT.0000000000001344
 24. Lamhaut L, Hutin A, Puymirat E, Jouan J, Raphalen JH, Jouffroy R, et al. A Pre-Hospital Extracorporeal Cardio Pulmonary Resuscitation (ECPR) strategy for treatment of refractory out hospital cardiac arrest: An observational study and propensity analysis. *Resuscitation*. 2017;117:109-17. doi:10.1016/j.resuscitation.2017.04.014

25. Kaltschmidt N, Katzenschlager S, Kaltschmidt L, Leo A, Weilbacher F, Popp E. Materielle Ausstattung des Heidelberger Medical Intervention Car. Notfall Rettungsmed. 2024;doi:10.1007/s10049-024-01370-x
26. London's Air Ambulance Charity. Launching pre-hospital ECMO in London. [Internet]. 2025 [cited 25.01.2026]. Available from: <https://www.londonsairambulance.org.uk/>
27. Song C, Dennis M, Burns B, Dyson S, Forrest P, Ramanan M, et al. Improving access to extracorporeal membrane oxygenation for out of hospital cardiac arrest: pre-hospital ECPR and alternate delivery strategies. Scand J Trauma Resusc Emerg Med. 2022;30:77. doi:10.1186/s13049-022-01064-8
28. Anantharaman V, Ng BL, Ang SH, Lee CY, Leong SH, Ong ME, et al. Prompt use of mechanical cardiopulmonary resuscitation in out-of-hospital cardiac arrest: the MECCA study report. Singapore Med J. 2017;58:424-31. doi:10.11622/smedj.2017071
29. Grunau B, Carrier S, Bashir J, Dick W, Harris L, Boone R, et al. A comprehensive regional clinical and educational ECPR protocol decreases time to ECMO in patients with refractory out-of-hospital cardiac arrest. CJEM. 2017;19:424-33. doi:10.1017/cem.2017.376
30. Grasner JT, Wnent J, Lefering R, Herlitz J, Masterson S, Maurer H, et al. European registry of cardiac arrest study THREE (EuReCa- THREE) - EMS response time influence on outcome in Europe. Resuscitation. 2025;110704. doi:10.1016/j.resuscitation.2025.110704
31. Deutsches Reanimationsregister. außerklinischer Jahresbericht 2024. [Internet]. 2024 [cited 27.01.2026]. Available from: <https://www.reanimationsregister.de/downloads/oeffentliche-jahresberichte/oeffentliche-jahresberichte-ausserklinische-reanimation/373-ausserklinischer-jahresbericht-2024/file.html>
32. Deutsches Reanimationsregister. innerklinischer Jahresbericht 2024. [Internet]. 2024 [cited 27.01.2026]. Available from: <https://www.reanimationsregister.de/downloads/oeffentliche-jahresberichte/oeffentliche-jahresberichte-innerklinische-reanimation/383-innerklinische-reanimation-2024/file.html>
33. Wnent J, Grasner JT, Fischer M, Ramshorn-Zimmer A, Bohn A, Bein B, et al. The German Resuscitation Registry - Epidemiological data for out-of-hospital and in-hospital cardiac arrest. Resusc Plus. 2024;18:100638. doi:10.1016/j.resplu.2024.100638
34. Poppe M, Weiser C, Holzer M, Sulzgruber P, Datler P, Keferbock M, et al. The incidence of "load&go" out-of-hospital cardiac arrest candidates for emergency department utilization of emergency extracorporeal life support: A one-year review. Resuscitation. 2015;91:131-6. doi:10.1016/j.resuscitation.2015.03.003
35. Reynolds JC, Grunau BE, Elmer J, Rittenberger JC, Sawyer KN, Kurz MC, et al. Prevalence, natural history, and time-dependent outcomes of a multi-center North American cohort of out-of-hospital cardiac arrest extracorporeal CPR candidates. Resuscitation. 2017;117:24-31. doi:10.1016/j.resuscitation.2017.05.024
36. Gottula AL, Shaw CR, Gorder KL, Lane BH, Latessa J, Qi M, et al. Eligibility of out-of-hospital cardiac arrest patients for extracorporeal cardiopulmonary resuscitation in the United States: A geographic information system model. Resuscitation. 2022;180:111-20. doi:10.1016/j.resuscitation.2022.09.017

37. Leung KHB, Hartley L, Moncur L, Gillon S, Short S, Chan TCY, et al. Assessing feasibility of proposed extracorporeal cardiopulmonary resuscitation programmes for out-of-hospital cardiac arrest in Scotland via geospatial modelling. *Resuscitation*. 2024;200:110256. doi:10.1016/j.resuscitation.2024.110256
38. Rob D, Macoun J, Tonna JE, Svitekova K, Dusik M, Pudil J, et al. Impact of rhythm changes during CPR on ECPR outcomes: an ELSO Registry study. *Resuscitation*. 2025;219:110951. doi:10.1016/j.resuscitation.2025.110951
39. Tran A, Rochweg B, Fan E, Belohlavek J, Suverein MM, Poll M, et al. Prognostic factors associated with favourable functional outcome among adult patients requiring extracorporeal cardiopulmonary resuscitation for out-of-hospital cardiac arrest: A systematic review and meta-analysis. *Resuscitation*. 2023;193:110004. doi:10.1016/j.resuscitation.2023.110004
40. Poppe M, Schriebl C, Steinacher A, Clodi C, Warenits AM, Nurnberger A, et al. Extracorporeal cardiopulmonary resuscitation at the emergency department: A retrospective patient selection evaluation. *Eur J Anaesthesiol*. 2020;37:280-5. doi:10.1097/EJA.0000000000001142
41. Mueller M, Magnet IAM, Poppe M, Mitteregger T, Krammel M. Rhythm check three - A(2)BCDE(3)! - A new acronym to select eligible patients for extracorporeal cardiopulmonary resuscitation (eCPR). *Resuscitation*. 2022;171:30-2. doi:10.1016/j.resuscitation.2021.12.031
42. Grunau B, Yannopoulos D. Beyond first impressions: dynamic ECPR candidacy assessment. *Resuscitation*. 2026;219:110988. doi:10.1016/j.resuscitation.2026.110988
43. Kim YS, Cho YH, Yang JH, Yang JH, Chung S, Suh GY, et al. Impact of age on the outcomes of extracorporeal cardiopulmonary resuscitation: analysis using inverse probability of treatment weighting. *Eur J Cardiothorac Surg*. 2021;60:1318-24. doi:10.1093/ejcts/ezab339
44. Halenarova K, Belliato M, Lunz D, Peluso L, Broman LM, Malfertheiner MV, et al. Predictors of poor outcome after extra-corporeal membrane oxygenation for refractory cardiac arrest (ECPR): A post hoc analysis of a multicenter database. *Resuscitation*. 2022;170:71-8. doi:10.1016/j.resuscitation.2021.11.015
45. D'Arrigo S, Cacciola S, Dennis M, Jung C, Kagawa E, Antonelli M, et al. Predictors of favourable outcome after in-hospital cardiac arrest treated with extracorporeal cardiopulmonary resuscitation: A systematic review and meta-analysis. *Resuscitation*. 2017;121:62-70. doi:10.1016/j.resuscitation.2017.10.005
46. Grunau B, Rob D, Hupitych M, Pudil J, Havranek S, Kavalkova P, et al. The time-dependent yield of invasive vs. standard resuscitation strategies: A secondary analysis of the Prague out-of-hospital cardiac arrest study. *Resuscitation*. 2024;203:110347. doi:10.1016/j.resuscitation.2024.110347
47. Matsuyama T, Irisawa T, Yamada T, Hayakawa K, Yoshiya K, Noguchi K, et al. Impact of Low-Flow Duration on Favorable Neurological Outcomes of Extracorporeal Cardiopulmonary Resuscitation After Out-of-Hospital Cardiac Arrest: A Multicenter Prospective Study. *Circulation*. 2020;141:1031-3. doi:10.1161/CIRCULATIONAHA.119.044285
48. Matsuyama T, Ohta B, Komukai S, Cheskes S, Lin S, Mohindra R, et al. Extracorporeal and Conventional Cardiopulmonary Resuscitation and Low-Flow Duration: Insights From a Nationwide Hospital-Based Registry Study in

- Japan (JAAM-OHCA Registry). *J Am Heart Assoc.* 2025;14:e039938. doi:10.1161/JAHA.124.039938
49. Koukousaki D, Kosmopoulos M, Sebastian P, Kalra R, Alexy T, Gutierrez A, et al. Effect of time to extracorporeal cardiopulmonary resuscitation on survival outcomes in in-hospital cardiac arrest patients. *Resuscitation.* 2025;217:110857. doi:10.1016/j.resuscitation.2025.110857
50. Swol J, Hoffmann J. Time as an enemy - Defining the window of opportunity for in-hospital extracorporeal cardiopulmonary resuscitation. *Resuscitation.* 2025;217:110890. doi:10.1016/j.resuscitation.2025.110890
51. Havranek S, Fingrova Z, Rob D, Smalcova J, Kavalkova P, Franek O, et al. Initial rhythm and survival in refractory out-of-hospital cardiac arrest. Post-hoc analysis of the Prague OHCA randomized trial. *Resuscitation.* 2022;181:289-96. doi:10.1016/j.resuscitation.2022.10.006
52. Bartos JA, Grunau B, Carlson C, Duval S, Ripeckyj A, Kalra R, et al. Improved Survival With Extracorporeal Cardiopulmonary Resuscitation Despite Progressive Metabolic Derangement Associated With Prolonged Resuscitation. *Circulation.* 2020;141:877-86. doi:10.1161/CIRCULATIONAHA.119.042173
53. Kato T, Miyagawa A, Hikone M, Yuri K, Sugiyama K. Peripheral VA-ECMO and pericardial drainage connected to the ECMO circuit for cardiac tamponade from blowout rupture: a case report. *BMC Cardiovasc Disord.* 2023;23:431. doi:10.1186/s12872-023-03477-4
54. Basilio C, Anders M, Rycus P, Paiva JA, Roncon-Albuquerque R, Jr. Cardiac Tamponade Complicating Extracorporeal Membrane Oxygenation: An Extracorporeal Life Support Organization Registry Analysis. *J Cardiothorac Vasc Anesth.* 2024;38:731-8. doi:10.1053/j.jvca.2023.12.027
55. Pudil J, Rob D, Smalcova J, Smid O, Huptych M, Vesela M, et al. Pulmonary embolism-related refractory out-of-hospital cardiac arrest and extracorporeal cardiopulmonary resuscitation: Prague OHCA study post hoc analysis. *Eur Heart J Acute Cardiovasc Care.* 2023;12:507-12. doi:10.1093/ehjacc/zuad052
56. Scott JH, Gordon M, Vender R, Pettigrew S, Desai P, Marchetti N, et al. Venoarterial Extracorporeal Membrane Oxygenation in Massive Pulmonary Embolism-Related Cardiac Arrest: A Systematic Review. *Crit Care Med.* 2021;49:760-9. doi:10.1097/CCM.0000000000004828
57. Daubin C, Lehoux P, Ivascau C, Tasle M, Bousta M, Lepage O, et al. Extracorporeal life support in severe drug intoxication: a retrospective cohort study of seventeen cases. *Crit Care.* 2009;13:R138. doi:10.1186/cc8017
58. Masson R, Colas V, Parienti JJ, Lehoux P, Massetti M, Charbonneau P, et al. A comparison of survival with and without extracorporeal life support treatment for severe poisoning due to drug intoxication. *Resuscitation.* 2012;83:1413-7. doi:10.1016/j.resuscitation.2012.03.028
59. Farstad M, Andersen KS, Koller ME, Grong K, Segadal L, Husby P. Rewarming from accidental hypothermia by extracorporeal circulation. A retrospective study. *Eur J Cardiothorac Surg.* 2001;20:58-64. doi:10.1016/s1010-7940(01)00713-8
60. Pasquier M, Rousson V, Darocha T, Bouzat P, Kosinski S, Sawamoto K, et al. Hypothermia outcome prediction after extracorporeal life support for hypothermic cardiac arrest patients: An external validation of the HOPE score. *Resuscitation.* 2019;139:321-8. doi:10.1016/j.resuscitation.2019.03.017

61. Shinar ZM, Burns B. ECPR in the Futile Traumatic Patient: Breaking Paradigms or Fanciful Optimism? *Resuscitation*. 2025;219:110915. doi:10.1016/j.resuscitation.2025.110915
62. Kato T, Hikone M, Shibahashi K, Sugiyama K. The impact of injuries at the time of cardiac arrest on the prognosis of extracorporeal cardiopulmonary resuscitation (ECPR) in out-of-hospital cardiac arrest patients. *Resusc Plus*. 2024;19:100700. doi:10.1016/j.resplu.2024.100700
63. Erbllich R, Swol J, Singer B, Krenner N, Lipusch J, Noitz M, et al. Extracorporeal cardiopulmonary resuscitation in trauma patients: An analysis of the ELSO registry. *Resuscitation*. 2025;218:110884. doi:10.1016/j.resuscitation.2025.110884
64. Dusik M, Rob D, Smalcova J, Havranek S, Karasek J, Smid O, et al. Serum lactate in refractory out-of-hospital cardiac arrest: Post-hoc analysis of the Prague OHCA study. *Resuscitation*. 2023;192:109935. doi:10.1016/j.resuscitation.2023.109935
65. Jouffroy R, Saade A, Philippe P, Guyard A, Carli P, Vivien B. Pupil Reactivity in Refractory Out-of-Hospital Cardiac Arrest Treated by Extra-Corporeal Cardiopulmonary Resuscitation. *Turk J Anaesthesiol Reanim*. 2020;48:294-9. doi:10.5152/TJAR.2019.75418
66. Lin JW, Wang MJ, Yu HY, Wang CH, Chang WT, Jerng JS, et al. Comparing the survival between extracorporeal rescue and conventional resuscitation in adult in-hospital cardiac arrests: propensity analysis of three-year data. *Resuscitation*. 2010;81:796-803. doi:10.1016/j.resuscitation.2010.03.002
67. Brechot N, Muller T. E-CPR: Does ECMO enhance or relieve the pressure on the injured heart? *Resuscitation*. 2025;207:110501. doi:10.1016/j.resuscitation.2025.110501
68. Swol J, Hoffmann J. Back to life - Defining long term outcomes after prehospital extracorporeal cardiopulmonary resuscitation. *Resuscitation*. 2024;207:110478. doi:10.1016/j.resuscitation.2024.110478
69. Pound G, Jones D, Eastwood GM, Paul E, Neto AS, Hodgson CL. Long-term outcomes of patients who received extracorporeal cardiopulmonary resuscitation (ECPR) following in-hospital cardiac arrest: Analysis of EXCEL registry data. *Crit Care Resusc*. 2024;26:279-85. doi:10.1016/j.ccrj.2024.08.008
70. Hrdlicka J, Smalcova J, Bircakova B, Lambert L, Belohlavek J, Burgetova A. Both decreased and increased grey-to-white matter attenuation ratio in the putamen and caudate on early head computed tomography differentiate patients with favorable and unfavorable outcomes after prolonged cardiac arrest-secondary analysis of the Prague OHCA study. *Quant Imaging Med Surg*. 2023;13:6205-14. doi:10.21037/qims-23-430
71. Magnet I, Clodi C, Ettl F, Grafeneder J, Holzer M, Lobmeyr E, et al. Delayed neurological recovery in patients after extracorporeal resuscitation compared to conventional resuscitation. Implications for outcome assessment after cardiac arrest. *Resuscitation*. 2025;216:110819. doi:10.1016/j.resuscitation.2025.110819
72. Haroon MM. ECMO circuit-induced microembolism and subclinical cognitive decline: a hidden determinant of delayed neurological recovery after eCPR. *Resuscitation*. 2025;217:110889. doi:10.1016/j.resuscitation.2025.110889
73. Magnet I, Poppe M. Response to the Letter to the Editor titled "ECMO circuit-induced microembolism and subclinical cognitive decline: a hidden

- determinant of delayed neurological recovery after eCPR". *Resuscitation*. 2025;217:110891. doi:10.1016/j.resuscitation.2025.110891
74. Nolan JP, Sandroni C, Cariou A, Cronberg T, D'Arrigo S, Haywood K, et al. European Resuscitation Council and European Society of Intensive Care Medicine Guidelines 2025 Post-Resuscitation Care. *Resuscitation*. 2025;215:110809. doi:10.1016/j.resuscitation.2025.110809
 75. Brodská H, Smalcová J, Kavalková P, Lavage DR, Dusík M, Belohlávek J, et al. Biomarkers for neuroprognostication after standard versus extracorporeal cardiopulmonary resuscitation - A sub-analysis of Prague-OHCA study. *Resuscitation*. 2024;199:110219. doi:10.1016/j.resuscitation.2024.110219
 76. Brodská H, Smalcová J, Kavalková P, Lavage DR, Dusík M, Belohlávek J, et al. Corrigendum to "Biomarkers for neuroprognostication after standard versus extracorporeal cardiopulmonary resuscitation - A sub-analysis of Prague-OHCA study" [*Resuscitation* 199 (2024) 110219]. *Resuscitation*. 2024;201:110283. doi:10.1016/j.resuscitation.2024.110283
 77. Zhang X, Chen L, Wang F, Wu Y, Chen J, Chen F, et al. Impact of differential temperature trajectories following targeted temperature management on outcomes in out-of-hospital cardiac arrest patients receiving ECPR: a multicenter, retrospective study with prospective validation. *Resuscitation*. 2025;219:110932. doi:10.1016/j.resuscitation.2025.110932
 78. Kalra R, Gaisendrees C, Alexy T, Kosmopoulos M, Voicu S, Bartos JA, et al. Left ventricular energetics in patients receiving veno-arterial extracorporeal membrane oxygenation for extracorporeal cardiopulmonary resuscitation. *Resuscitation*. 2024;207:110475. doi:10.1016/j.resuscitation.2024.110475
 79. Khoury J, Soumagnac T, Vimpere D, El Morabity A, Hutin A, Raphalen JH, et al. Long-term heart function in refractory out-of-hospital cardiac arrest treated with prehospital extracorporeal cardiopulmonary resuscitation. *Resuscitation*. 2024;207:110449. doi:10.1016/j.resuscitation.2024.110449
 80. Sandroni C, D'Arrigo S. Brain death is common after extracorporeal cardiopulmonary resuscitation (eCPR): An undesired outcome with potential benefits. *Resuscitation*. 2024;200:110246. doi:10.1016/j.resuscitation.2024.110246
 81. Bonizzoni MA, Scquizzato T, Pieri M, Delrio S, Nardelli P, Ortalda A, et al. Organ donation after extracorporeal cardiopulmonary resuscitation for refractory out-of-hospital cardiac arrest in a metropolitan cardiac arrest centre in Milan, Italy. *Resuscitation*. 2024;200:110214. doi:10.1016/j.resuscitation.2024.110214
 82. Scquizzato T, Moscoloni G, Supady A, Abrams D, Taccone FS, Sandroni C, et al. Post-resuscitation care after adult extracorporeal cardiopulmonary resuscitation: A scoping review. *Resuscitation*. 2025;217:110880. doi:10.1016/j.resuscitation.2025.110880
 83. Dennis M, Shekar K, Burrell AJ, National EWG. Extracorporeal cardiopulmonary resuscitation for refractory cardiac arrest in Australia: a narrative review. *Med J Aust*. 2024;220:46-53. doi:10.5694/mja2.52130
 84. Shinar Z, Nickson CP. The fast and the frivolous: Does prehospital ECPR's "need for speed" provide enough "bang for the buck"? *Resuscitation*. 2024;207:110482. doi:10.1016/j.resuscitation.2024.110482
 85. Delnoij TSR, Suverein MM, Essers BAB, Hermanides RC, Otterspoor L, Elzo Kraemer CV, et al. Cost-effectiveness of extracorporeal cardiopulmonary resuscitation vs. conventional cardiopulmonary resuscitation in out-of-hospital

- cardiac arrest: a pre-planned, trial-based economic evaluation. *Eur Heart J Acute Cardiovasc Care*. 2024;13:484-92. doi:10.1093/ehjacc/zuae050
86. Alenazi A, Couper K. Reply to: Beyond survival: cost-effectiveness of eCPR for refractory cardiac arrest. *Resuscitation*. 2025;110931. doi:10.1016/j.resuscitation.2025.110931
 87. Rosenberg A, Akhtar W. Extra corporeal cardiopulmonary resuscitation: A cost of living crisis? *Resuscitation*. 2025;208:110524. doi:10.1016/j.resuscitation.2025.110524
 88. Zmudzki F, Burns B, Kruit N, Song C, Moylan E, Vachharajani H, et al. Pre-hospital ECPR cost analysis and cost effectiveness modelling study. *Resuscitation*. 2025;208:110488. doi:10.1016/j.resuscitation.2024.110488
 89. Alenazi A, Alotaibi B, Madan J, Yeung J, Johnson S, Couper K. The cost-effectiveness of extracorporeal cardiopulmonary resuscitation (ECPR) for refractory cardiac arrest: A systematic review. *Resuscitation*. 2025;216:110822. doi:10.1016/j.resuscitation.2025.110822
 90. Rajsic S, Putzer G, Unterpertinger R, Breitskopf R. Beyond survival: cost-effectiveness of eCPR for refractory cardiac arrest. *Resuscitation*. 2025;110930. doi:10.1016/j.resuscitation.2025.110930
 91. van de Poll MCG, van de Koolwijk AF. Cost-effectiveness in extracorporeal CPR: Moving from optimism to realism. *Resuscitation*. 2025;216:110839. doi:10.1016/j.resuscitation.2025.110839
 92. Kruit N, Burrell A, Edwards C, Dennis M. A training programme for novice extracorporeal resuscitation providers. *Resusc Plus*. 2024;19:100720. doi:10.1016/j.resplu.2024.100720
 93. Yannopoulos D, Kalra R, Kosmopoulos M, Walser E, Bartos JA, Murray TA, et al. Rationale and methods of the Advanced R(2)Eperfusion STRategies for Refractory Cardiac Arrest (ARREST) trial. *Am Heart J*. 2020;229:29-39. doi:10.1016/j.ahj.2020.07.006
 94. Smalcova J, Havranek S, Pokorna E, Franek O, Huptych M, Kavalkova P, et al. Extracorporeal cardiopulmonary resuscitation-based approach to refractory out-of-hospital cardiac arrest: A focus on organ donation, a secondary analysis of a Prague OHCA randomized study. *Resuscitation*. 2023;193:109993. doi:10.1016/j.resuscitation.2023.109993
 95. Ubben JFH, Suverein MM, Delnoij TSR, Heuts S, Winkens B, Gabrio A, et al. Early extracorporeal CPR for refractory out-of-hospital cardiac arrest - A pre-planned per-protocol analysis of the INCEPTION-trial. *Resuscitation*. 2024;194:110033. doi:10.1016/j.resuscitation.2023.110033
 96. Bougouin W, Dumas F, Lamhaut L, Marijon E, Carli P, Combes A, et al. Extracorporeal cardiopulmonary resuscitation in out-of-hospital cardiac arrest: a registry study. *Eur Heart J*. 2020;41:1961-71. doi:10.1093/eurheartj/ehz753
 97. Singer B, Hla TTW, Abu-Habsa M, Davies G, Wrigley F, Faulkner M, et al. Sub30: Feasibility study of a pre-hospital extracorporeal membrane oxygenation (ECMO) in patients with refractory out-of-hospital cardiac arrest in London, United Kingdom. *Resuscitation*. 2024;207:110455. doi:10.1016/j.resuscitation.2024.110455
 98. Stub D, Bernard S, Pellegrino V, Smith K, Walker T, Sheldrake J, et al. Refractory cardiac arrest treated with mechanical CPR, hypothermia, ECMO and early reperfusion (the CHEER trial). *Resuscitation*. 2015;86:88-94. doi:10.1016/j.resuscitation.2014.09.010

99. Richardson SAC, Anderson D, Burrell AJC, Byrne T, Coull J, Diehl A, et al. Pre-hospital ECPR in an Australian metropolitan setting: a single-arm feasibility assessment-The CPR, pre-hospital ECPR and early reperfusion (CHEER3) study. *Scand J Trauma Resusc Emerg Med*. 2023;31:100. doi:10.1186/s13049-023-01163-0
100. Kruit N, Burns B, Shearer N, Hui J, Coggins A, Buscher H, et al. Pre-hospital ECPR for refractory cardiac arrest - The PRECARE pilot feasibility study. *Resuscitation*. 2025;212:110631. doi:10.1016/j.resuscitation.2025.110631
101. Morales-Demori R, Olson TL, Alali A, Barbaro RP, Rycus P, Alexander PMA, et al. Outcomes in pediatric ECPR for in-hospital cardiac arrest: an ELSO registry analysis. *Resuscitation*. 2025;216:110794. doi:10.1016/j.resuscitation.2025.110794
102. Guerguerian AM. A new era in pediatric ECPR registry data: using the ELSO ECPR addendum to collectively move forward. *Resuscitation*. 2025;216:110835. doi:10.1016/j.resuscitation.2025.110835
103. Österreich R. Sanitätsgesetz 2002. 2002.
104. Mediziner corps Graz. Mediziner corps. [Internet]. 2015 [cited 17.03.2026]. Available from: https://de.wikipedia.org/wiki/Mediziner_corps
105. Prause G, Oswald S, Himler D, Wildner G, Gemes G. The Mediziner corps Graz: a 120-year-old institution of emergency medicine. *Prehosp Emerg Care*. 2013;17:416-20. doi:10.3109/10903127.2013.785622
106. Magnet I, Behringer W, Eibensteiner F, Ettl F, Grafeneder J, Heinz G, et al. Extracorporeal Cardiopulmonary Resuscitation: Outcomes Improve With Center Experience. *Ann Emerg Med*. 2025;85:doi:10.1016/j.annemergmed.2024.12.004
107. Stadt Graz. Zahlen, Daten und Fakten zur Integration in Graz. [Internet]. 2026 [cited 18.03.2026]. Available from: https://www.graz.at/cms/beitrag/10237914/12605712/Zahlen_Daten_und_Fakten_zur_Integration.html#:~:text=GRAZ%20SIND%20WIR%20ALLE&text=Jänner%202026%20in%20Graz.,Nicht%20EU%20Bürger%3Ainnen
108. Stadt Stuttgart. Weniger Einwohner: Stuttgarts Bevölkerung nimmt 2025 weiter ab. [Internet]. 2026 [cited 21.05.2026]. Available from: <https://www.stuttgart.de/service/aktuelle-meldungen/2026/februar/weniger-einwohner-stuttgarts-bevoelkerung-nimmt-2025-weiter-ab>
109. Klinikum Stuttgart. Stuttgarter Medical Intervention Car (MIC) erreicht 500. Alarmierung. [Internet]. 2025 [cited 19.03.2026]. Available from: <https://www.klinikum-stuttgart.de/medizin-pflege/anaesthesiologie/notfallmedizin/mic-medical-intervention-car/aktuelles-news/detail/stuttgarter-medical-intervention-car-mic-erreicht-500-alarmierung>
110. Drabek T, Cavaliere GA. How to plan for prehospital ECPR, and move mountains. *Resuscitation*. 2025;215:110790. doi:10.1016/j.resuscitation.2025.110790
111. von Lewinski D, Herold L, Stoffel C, Patzold S, Fruhwald F, Altmanninger-Sock S, et al. PROspective REgistry of PATients in REfractory cardiogenic shock-The PREPARE CardShock registry. *Catheter Cardiovasc Interv*. 2022;100:319-27. doi:10.1002/ccd.30327
112. Ali S, Moors X, van Schuppen H, Mommers L, Weelink E, Meuwese CL, et al. A national multi centre pre-hospital ECPR stepped wedge study; design and

- rationale of the ON-SCENE study. Scand J Trauma Resusc Emerg Med. 2024;32:31. doi:10.1186/s13049-024-01198-x
113. Schmitzberger FF, Haas NL, Coute RA, Bartos J, Hackmann A, Haft JW, et al. ECPR(2): Expert Consensus on Percutaneous Cannulation for Extracorporeal CardioPulmonary Resuscitation. Resuscitation. 2022;179:214-20. doi:10.1016/j.resuscitation.2022.07.003

Zur sprachlichen Optimierung des Textes wurde folgendes Tool verwendet:

1. ChatGPT (Modell: GPT-5.5)
 - Anbieter: OpenAI
 - Datum: 12. Juni 2026
 - Uniform Resource Locator (URL): <https://chatgpt.com>
 - Prompt: „Bitte lies dir meine Diplomarbeit durch und zeige mir Grammatik- sowie Rechtschreibfehler an.“