

Die hämodynamischen Auswirkungen der intermittierenden Beinkompression

V. C. Roberts

Biomedical Engineering Department

King's College Hospital Medical School

Denmark Hill

GB London S.E.5

Einleitung

Einleitend möchte ich auf die Faktoren eingehen, die uns veranlaßt haben, die intermittierende Kompression als Mittel der Thromboseprophylaxe zu prüfen. Als wir im Jahre 1970 unsere ursprünglichen Arbeiten zur Hämodynamik der aktiven und passiven Plantar- und Dorsalflexion durchführten, konnten wir feststellen, daß während dieser Begegnungen die mittlere Strömungsgeschwindigkeit in der Femoralis um ca. 30 % zunimmt. Gleichzeitig werden auftretende Pulsationen bis zu 6–7fach verstärkt. Wir prüften anschließend die Anwendungsmöglichkeiten der intermittierenden Kompression zur Thromboseprophylaxe und entnahmen Autorenangaben (1-4) die Reduktion der Thrombosehäufigkeit von 70%. Wir wußten zu diesem Zeitpunkt nicht, ob die Zunahme der mittleren Strömungsgeschwindigkeit oder die Pulsation der Strömung dafür verantwortlich waren. Deshalb haben wir versucht, eine Methode zu erarbeiten, die uns eine Beurteilung der prophylaktischen Wirkung erlaubt (Abb. 1a, 1b).

a)

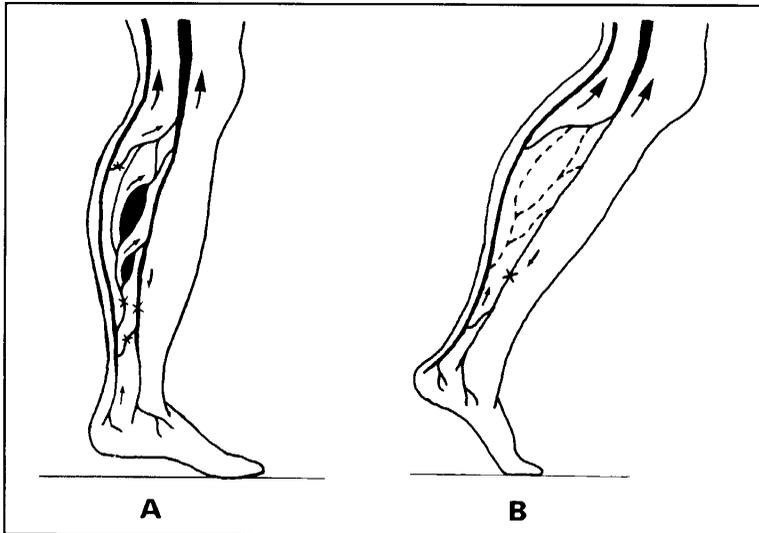
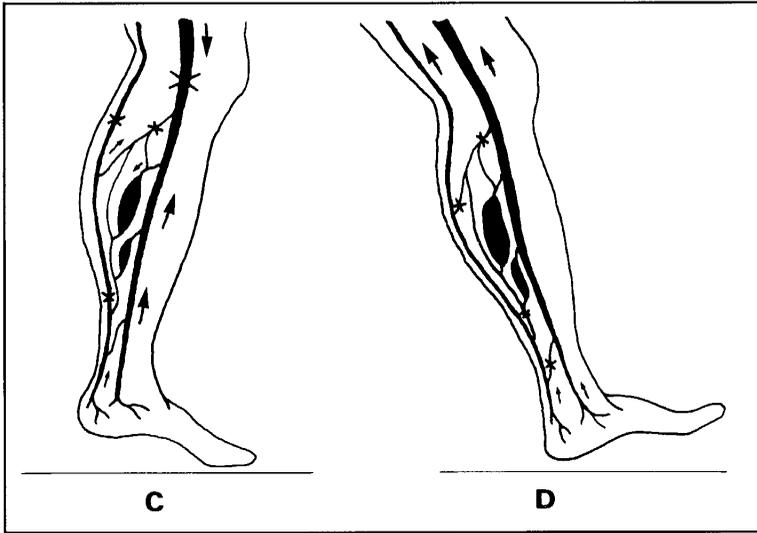


Abb. 1:
(a und b) Wadenmuskelpumpe in Aktion.

b)



Das Venensystem ist außerordentlich kompliziert. Um herauszufinden, wie sich Einflüsse von außen darauf auswirken, wurde ein vereinfachtes Modell verwendet, bei dem das venöse System aus der Mikrozirkulation und in weiterer Folge aus den Arterien gespeist wird. Zu diesem Zweck muß man sich ein von außen bedienbares Gerät vorstellen, mit dem ein Druck P angewendet wird. Damit läßt sich die Veränderung der Strömungsgeschwindigkeit aus den Venen unter den verschiedenen angewendeten Drücken verfolgen.

Die Anwendung statischen Drucks

Bei Anwendung statischen Drucks auf das Bein passieren drei Dinge. Der transmurale Druck auf die Venenwand wird reduziert und mit weiter zunehmender Stärke der Außenkompression sogar umgekehrt. Die Venen und intramuskulären Sinusoiden kollabieren, und das Blut wird aus dem Bein ausgetrieben. Der Blutstrom in der V. femoralis entspricht etwa der Darstellung in Abbildung 2a. Der venöse Blutstrom verhält sich normalerweise ruhig und wird nur durch die Respiration leicht bewegt, eine Abnahme erfolgt auf der Femoralebene beim Einatmen. Bei Anwendung von äußerem Druck wird das Blut bis zur V. femoralis ausgetrieben. Der Blutstrom wird vorübergehend erhöht und pegelt sich anschließend um den Ausgangswert wieder ein. Entfällt der Druck, sinkt der Ausstrom aus dem Bein vorübergehend und reguliert sich anschließend um den Ausgangswert wieder ein (Abb. 2b). Die schattierten Flächen stellen das ausströmende bzw. einströmende Blutvolumen dar.

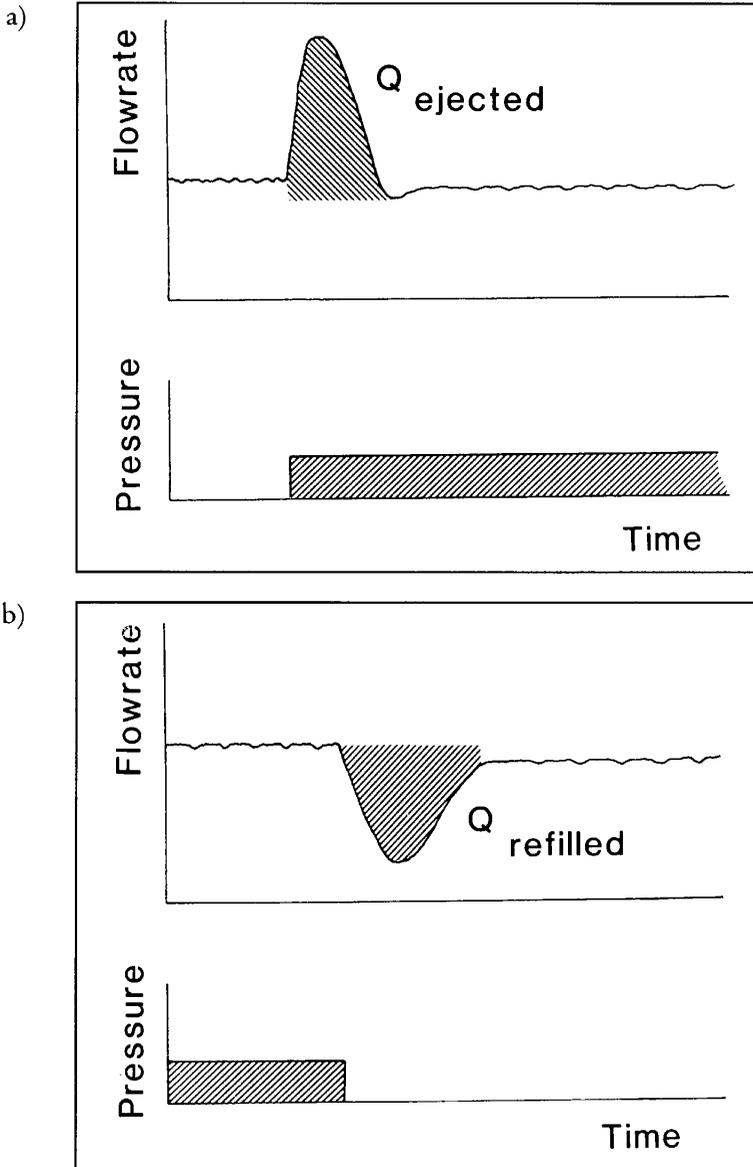


Abb. 2: Wirkung auf den Femoralvenenstrom: a) Bei Kompression. – b) Nach Kompression.

Das ein- und ausströmende Blutvolumen wird als Funktion des äußeren Drucks in Abbildung 3 wiedergegeben. Diese Darstellung veranschaulicht die Auswirkung gleichmäßiger Druckanwendung unterhalb des Knies. Der Ausstrom (Q_e) erreicht sein Maximum von ca. 90 ml bei einem Druck von 6 kPa. Der Einstrom erreicht

sein Maximum jedoch bereits bei dem wesentlich geringeren Druck von nur 3 und 4 kPa. Darüber hinaus ist das Einstromvolumen (Q_r) auf jeden Fall geringer als das Ausstromvolumen. Der Unterschied ergibt sich aus der Anatomie der solealen Sinus und beschreibt das darin enthaltene Blutvolumen ($Q_e - Q_r$). In diesem Fall beträgt das Volumen ca. 45 ml oder annähernd die Hälfte des gesamten Ausstromvolumens.

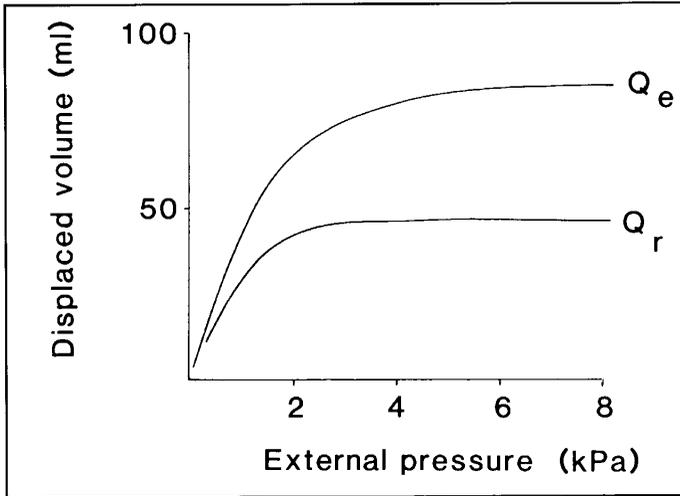


Abb. 3: Volumen von Blutausstrom (Q_e) und Bluteinstrom (Q_r) infolge Kompression.

Abgesehen vom Blutausstrom aus dem venösen System, besitzt die äußere Druckanwendung weitere unterschiedliche Wirkungen auf die Perfusion des Unterschenkels. Bei Druckanwendung auf einen Unterschenkel und gleichzeitiger Beobachtung des kontralateralen Schenkels ergeben sich Schwankungen im durchschnittlichen Blutstromniveau.

Bei gleichmäßiger Druckanwendung unterhalb des Knies (an der Wade) ist ein leichter Anstieg des Blutstroms im kontralateralen (unbehandelten) Schenkel zu beobachten. Dieser Anstieg beträgt bei Druckanwendung von 6 kPa (Abb. 4a) maximal 8%. Wenn jedoch sowohl auf die Wade als auf den gesamten Unterschenkel Druck ausgeübt wird, resultiert ein noch größerer Anstieg. Er beträgt ungefähr 13% und wird bereits durch den wesentlich geringeren Druck von nur 1 kPa erzeugt. Weitere Druckerhöhungen bewirken nur einen unverhältnismäßig geringen Anstieg des Blutstroms.

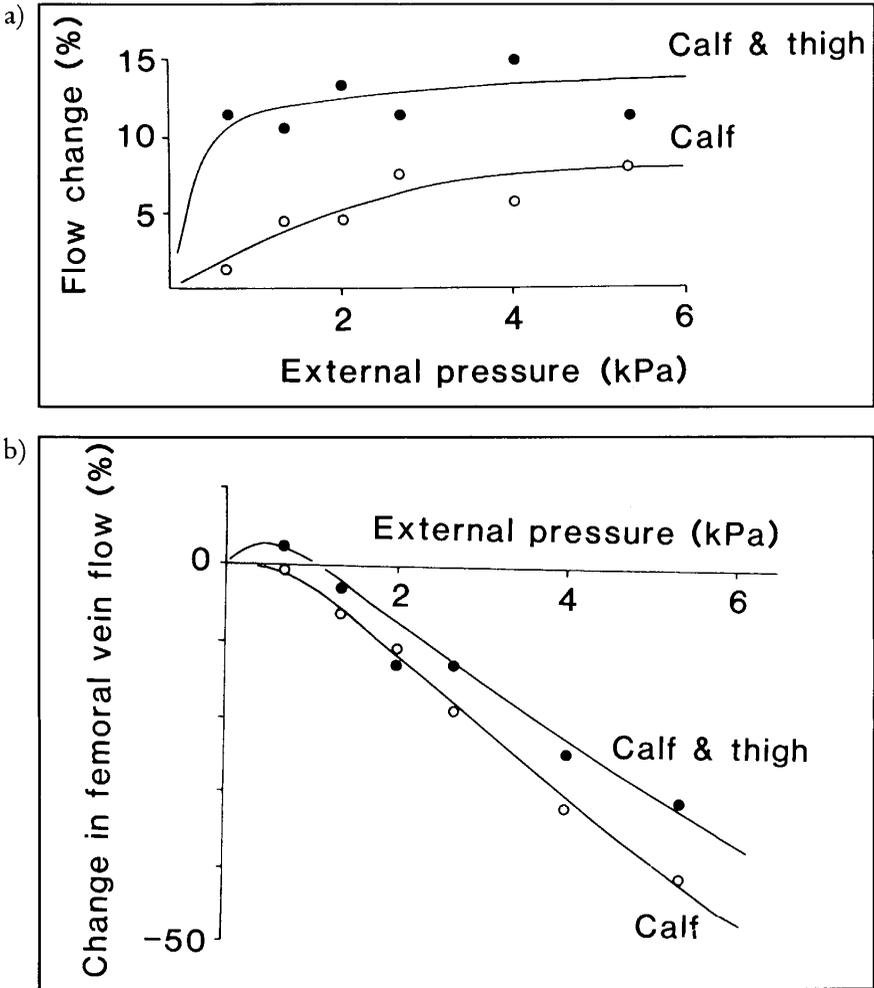


Abb. 4: Blutstromveränderungen durch externen Druck: a) Im Kontrollbein (ohne Kompression). – b) Im mit Kompression behandelten Bein.

Die Untersuchung am komprimierten Bein macht deutlich (Abb. 4b), daß der Blutstrom nur bei geringem Druck ansteigt, und auch nur dann, wenn Druck auf Wade und Schenkel ausgeübt wird. Mit höherem Druck sinkt der Blutstrom stetig, bis er bei 6 kPa um nahezu 50% reduziert ist. Interessant erscheint die Beobachtung, daß die Anwendung hohen Drucks auf Flächen über dem Bein nicht zu einer zunehmenden Verringerung des gesamten Blutstroms führt. Diese Annahme rührt von der Verwendung elastischer Strümpfe her, bei denen der Druck vom Sprunggelenk zum Schenkel hin stetig verringert wird. Die Ergebnisse zeigen eindeutig, daß der Blutstrom im Bein in erster Linie von distaler Druckeinwirkung abhängt.

Die Anwendung intermittierender Drucks

Die Betrachtung von Abbildung 2a ergibt, daß der Blutstrom bei Druckenwendung bis zu einem Gipfel ansteigt und danach abfällt. Die schattierte Fläche unter dem Gipfel ist das Ausstromvolumen, das für jeden beliebigen Druck feststeht. Erfolgt die Druckenwendung rascher, liegt der Gipfel des Blutstroms höher, und der anschließende Abfall setzt sich schneller ein. Die Fläche unter der Blutstromkurve bleibt aber gleich. Werden die Spitzenwerte des Blutstroms, die sich durch die Kompression ergeben, als Funktion der Druckenwendungsrate dargestellt, müßte sich erwartungsgemäß eine lineare Beziehung ergeben. Abbildung 5 zeigt, daß diese Annahme zutrifft. Bis zu einem Druck von 1 kPa/sec. besteht dieses lineare Verhältnis. Von diesem Punkt an begrenzt ein Widerstand den plötzlichen Stromausstoß in die V. cava und erlaubt anschließend nur noch geringfügige weitere Anstiege.

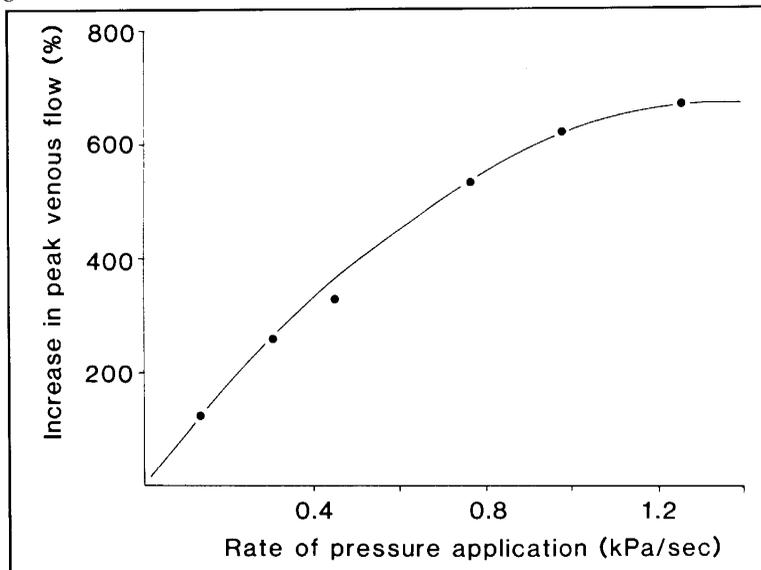


Abb. 5:

Anhebung der Höchstwerte des venösen Stroms in Funktion zum Kompressionsintervall.

Nachdem das venöse Blut aus der Wade geströmt ist, muß anschließend genügend Zeit zum Wiederauffüllen des Systems bleiben. Abbildung 6 stellt den höchsten Wert des Blutstroms in der V. femoralis nach einer Reihe von Druckimpulsen am Bein dar. Diese Druckimpulse wenden einen Maximaldruck von 6 kPa an. Die Ausstromspitzenwerte erreichen ihr Maximum, wenn dem venösen System 60 Sekunden zum Wiederauffüllen bleiben. Die Ergebnisse stammen von Patienten ohne Anzeichen arterieller Insuffizienz. Wird die Kompression bei Patienten mit Arterienerkrankungen der Beine angewendet, muß zwischen den Kompressionen ein größerer Zeitabstand liegen. In diesen Fällen muß das Intervall zum Auffüllen auf 90 Sekunden ausgedehnt werden, ein Zeitabstand, der auch noch für gesunde Probanden gelten kann.

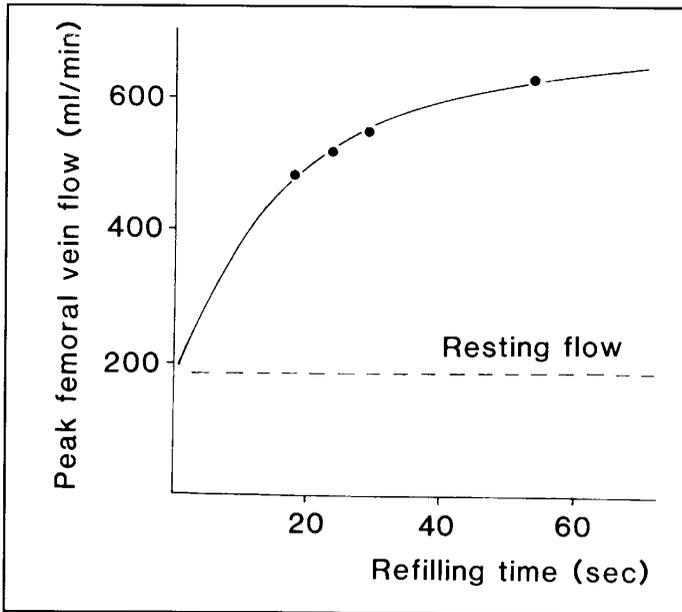


Abb. 6:
Anhebung der Höchstwerte des venösen Stroms in Funktion zum Kompressionsintervall.

Die folgenden Abbildungen veranschaulichen die verschiedenen Wirkungen unterschiedlicher Formen der intermittierenden Kompression auf den Femoralvenenstrom. Abbildung 7a stellt den hämodynamischen Effekt eines Geräts für die intermittierende Kompression dar, das mit einem leichten Anstieg des äußeren Drucks für 30 Sekunden arbeitet. Der Ausstrom steigt deutlich sichtbar bis zu einem Maximum und fällt dann auf ein neues Ruheniveau zurück, das bereits erreicht wird, bevor die Maximalkompression zur Anwendung gelangt. Mit einem solchen Gerät ist bei kontinuierlicher Anwendung kein hämodynamischer Effekt mit Ausnahme einer Verminderung des gesamten Ausstroms zu erzielen. Zum Vergleich soll Abbildung 7b herangezogen werden. Hier wurde der gleiche Maximaldruck angewendet, jedoch in einer wesentlich rascheren Folge. Mit diesem Gerät sind die Pulsationen des venösen Stroms wesentlich stärker ausgeprägt und deshalb mit wesentlich größerer Wahrscheinlichkeit dazu geeignet, Venenthrombosen zu verhindern.

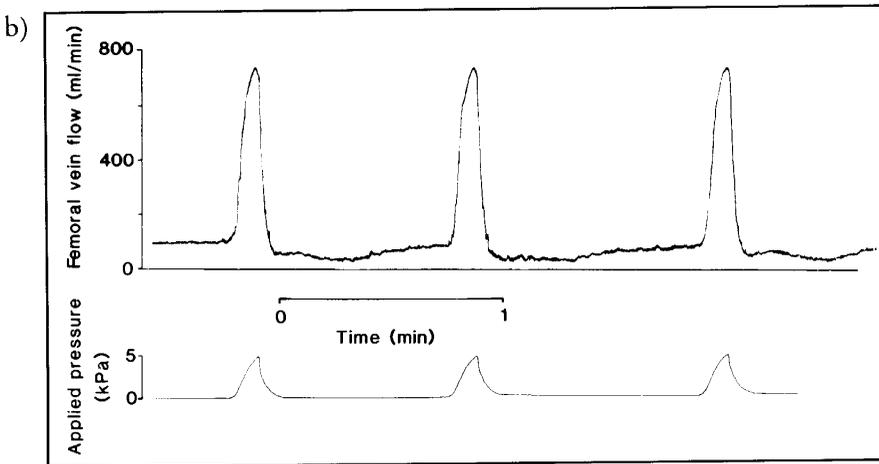
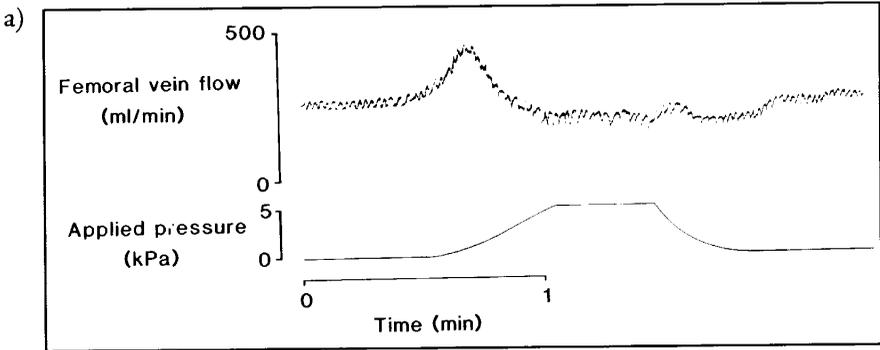


Abb. 7: Wirkung auf den Femoralvenenstrom: a) Stimulation mit langsamem Druckanstieg. — b) Stimulation mit raschem Druckanstieg.

Die Auswirkungen der intermittierenden Kompression beschränken sich nicht auf ein bloßes Leeren und Wiederauffüllen des venösen Systems am Unterschenkel. Zusätzlich entstehen eine Reihe von biochemischen Veränderungen wie die Zunahme der Fibrinolyse und Auswirkungen auf die Mechanismen, die die Blutzirkulation im Bein steuern.

Ein Beispiel dieser Auswirkungen wird in Abbildung 8 dargestellt.

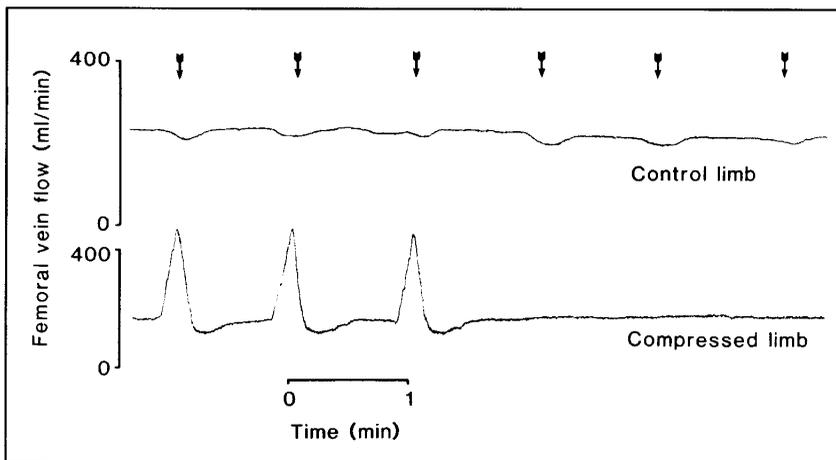


Abb. 8:
Stimulation des peripheren vasomotorischen Kontrollsystems durch intermittierende Beinkompression. Die obere Aufzeichnung stellt das unbehandelte und die untere Aufzeichnung das behandelte Bein dar.

Diese Abbildung stellt das Strömungsverhalten in den Femoralvenen eines Probanden zu gleicher Zeit dar. Die oben abgebildete Aufzeichnung stellt als Kontrolle das Verhalten im nicht-komprimierten Bein dar, während die unten abgebildete Aufzeichnung das Strömungsverhalten im komprimierten Bein wiedergibt. Die untere Abbildung zeigt deutlich die massiven zyklischen Veränderungen des venösen Stroms, die durch die intermittierende Kompression erzeugt werden können. Dieser Effekt schwindet unmittelbar mit der Beendigung der intermittierenden Kompression. Auch im nicht-komprimierten Bein werden Modulationen im Strömungsverhalten sichtbar, mit jeder Kompression erfolgt ein Absinken des Stroms. Auf den ersten Blick erscheint diese Modulation als bloße Auswirkung des erhöhten Widerstands gegenüber dem venösen Ausstrom des durch das komprimierte Bein in die V. cava ausgetriebenen Blutvolumens. Das zyklische Absinken des Stroms setzt sich jedoch noch einige Minuten nach Absetzen der intermittierenden Kompression scheinbar selbständig fort.

Dieses Phänomen ist Beweis für die Existenz eines vasomotorischen Kontrollsystems, das durch die intermittierende Kompression stimuliert wird.

Der Sitz dieses Kontrollsystems ist bisher unbekannt, aber der Stimulationseffekt könnte nutzbar gemacht werden, indem die intermittierende Kompression abwechselnd an beiden Beinen angewandt wird.

Schlußfolgerung

Die Anwendung der intermittierenden Beinkompression kann tiefgreifende hämodynamische Auswirkungen auf das venöse System haben. Geht man davon aus, daß die Verhinderung der postoperativen Thrombose im Prinzip darin besteht, den venösen Strom beim anästhesierten Patienten dem eines gehenden Menschen anzunähern, so besitzt die intermittierende Kompression außerordentliche Bedeutung.

Ein Gerät für die intermittierende Kompression sollte folgende Kriterien erfüllen, um eine hämodynamische Maximalwirkung zu erzielen:

- 1 Die Kompression sollte vom Fuß bis zum mittleren Unterschenkel angewendet werden.
- 2 Eine Basiskompression von 1 kPa sollte kontinuierlich angewandt werden.
- 3 Die überlagernden Druckimpulse sollten alle 90 Sekunden wirksam werden.
- 4 Die Impulse sollten einen äußeren Druck erzeugen, der sich von = 1 kPa bis zu maximal 6 kPa steigert und anschließend auf ein Basisniveau von 1 kPa zurückfällt.

Literatur

1. Cotton, L. T., Roberts, V. C. (1977). *Surgery*, 81, 228–235.
2. Roberts, V. C. (1977). *Triangle*, 16, 35–39.
3. Roberts, V. C., Sabri, S., Beeley, A. H., Cotton, L. T. (1972). *Brit. Med. J. Surg*, 59, 223–226.
4. Spiro, M., Roberts, V. C., Richards, J. B. (1970). *BMJ* 1, 719–723.