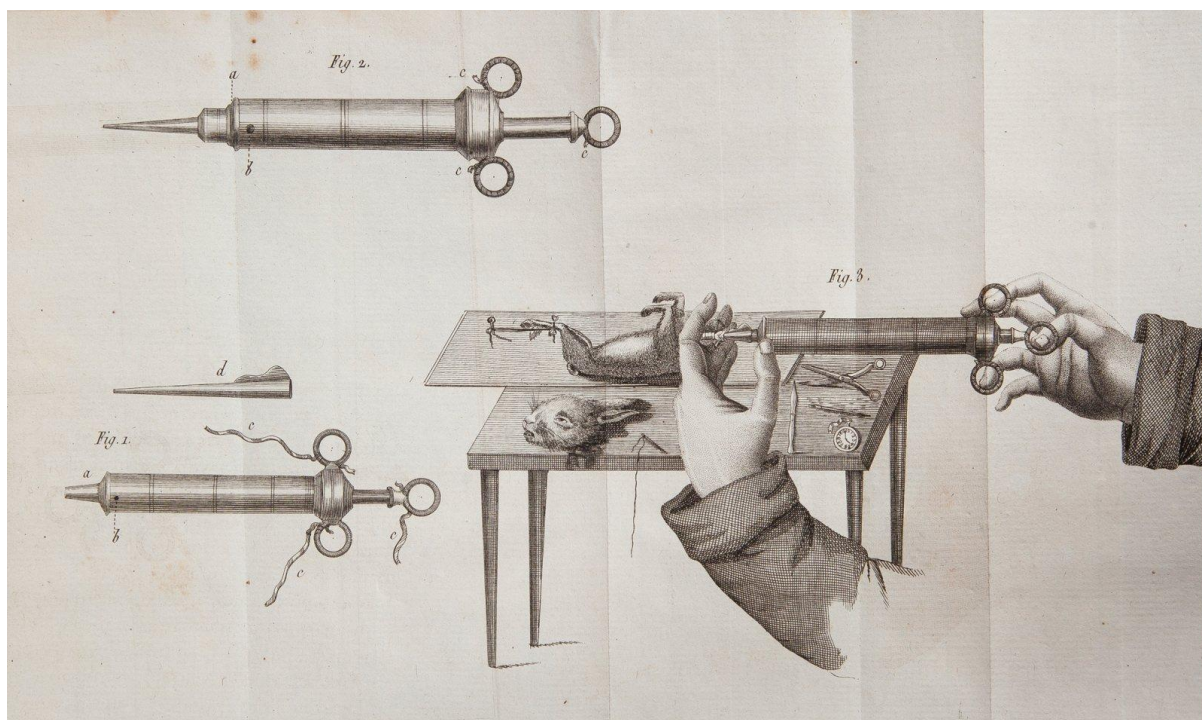


## Mimotelový obeh (*ECC - Extracorporeal Circulation, CPB – Cardio-Pulmonary Bypass*)

Základnou úlohou mimotelového obehu je nahradiť funkciu srdca a pľúc počas trvania operačného výkonu. V princípe to znamená odčerpať venóznú krv prichádzajúcu do srdca, zabezpečiť výmenu plynov, optimálnu teplotu a okysličenú krv potom prečerpať naspäť do obehu pacienta. Aj napriek tomuto relatívne jednoduchému konceptu, ovplyvňuje mimotelový obeh takmer všetky fyziologické procesy v organizme.

### História

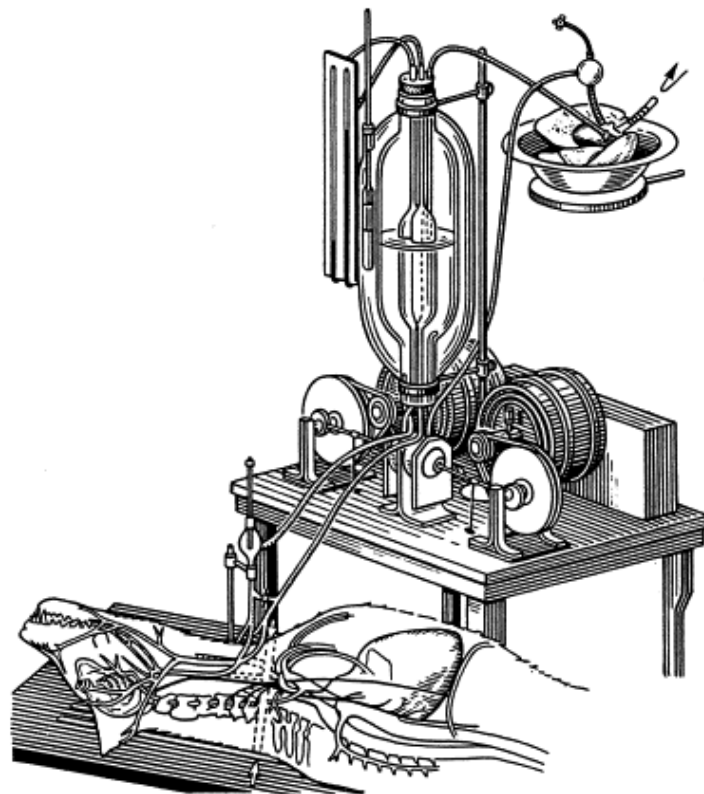
Myšlienka mimotelovej cirkulácie je pomerne stará. Už v roku 1812 publikoval francúzsky doktor a fyziológ César Julien Jean Le Gallois výsledky svojich pokusov na dekapitovaných zvieratách, u ktorých udržoval pľúcnu cirkuláciu pomocou malej striekačky.



Obrázok 1.: Le Galloisov pokus umelej cirkulácie na dekapitovanom zvieracom modeli. Zdroj: <https://www.gazette-drouot.com/en/lots/4335854>

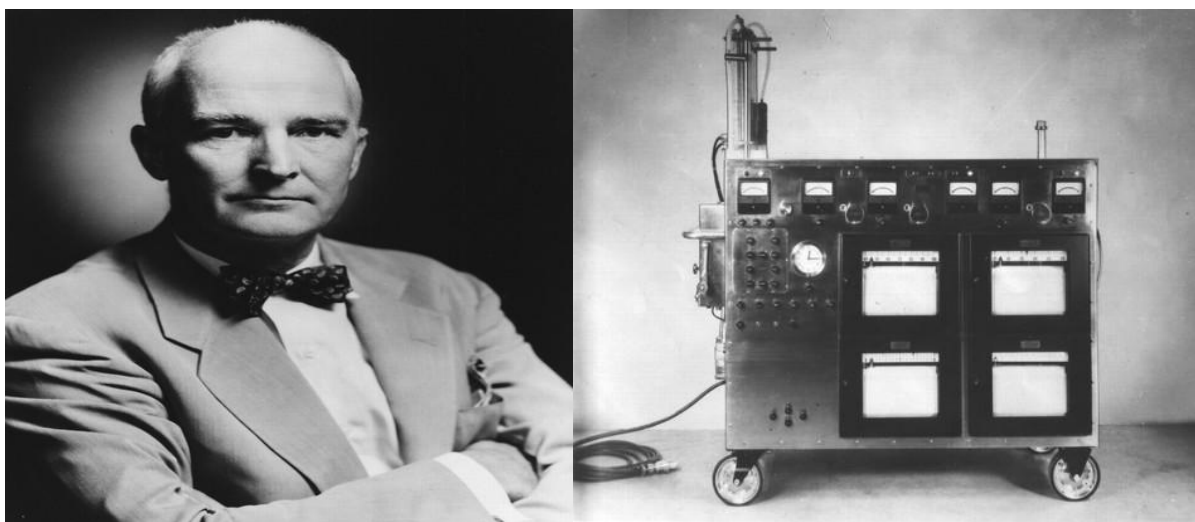
V priebehu 19. storočia pokračovali v tomto výskume viacerí vedci a fyziológovia. Von Schröder, Jacoby, von Frey a Gruber položili základy pre tri rôzne typy oxygenátorov, s ktorými úspešne perfundovali izolované zvieracie orgány. Ďalším významným míľnikom bolo objavenie heparínu McLeanom a Howelom v roku 1916.

Prvý funkčný mimotelový obeh zostrojil ruský vedec S. Brukhonenko. V známom experimente z roku 1926 dokázal udržať 2 hodiny cirkuláciu u psa so zastaveným srdcom.



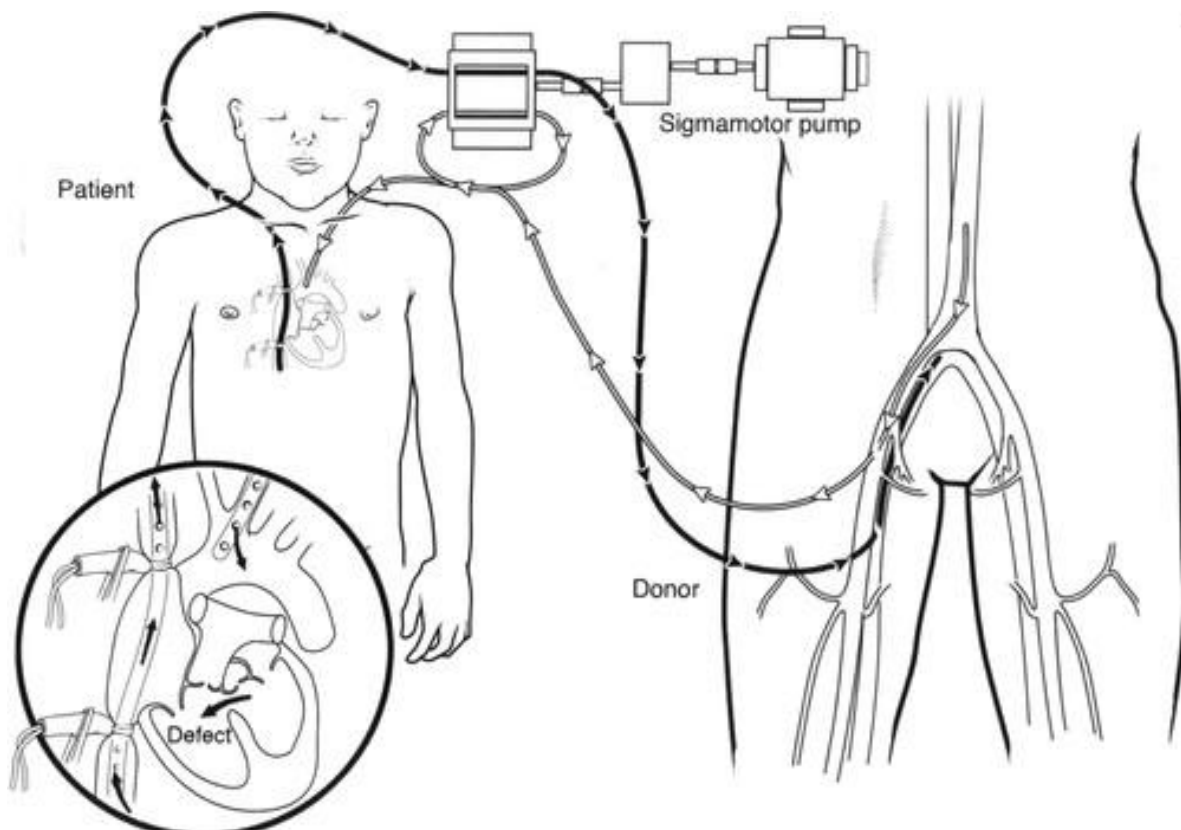
Obrázok 2.: Nákres prvého funkčného mimotelového obehu, ktorý zostrojil S. Brukhonenko. Zdroj: [https://www.annalsthoracicsurgery.org/article/S0003-4975\(00\)01091-2/fulltext](https://www.annalsthoracicsurgery.org/article/S0003-4975(00)01091-2/fulltext)

Problematike mimotelovej cirkulácie sa v 20. storočí venovali viacerí doktori a vedci, medzi inými napríklad Bjork, Senning a Crafoord. Gibbon začal so svojím výskumom v tridsiatych rokoch na Massachusetts General Hospital v Bostone. Jeho práca viedla v roku 1953 k prvej úspešnej kardiochirurgickej operácii na mimotelovom obehu, pri ktorej uzavrel mladej žene defekt predsieňového septa.



Obrázok 3.: Dr. J.H. Gibbon a jeho mimotelový obeh Gibbon-IBM model 2. Zdroj: <https://www.ahajournals.org/doi/10.1161/CIRCULATIONAHA.108.830174>

Neúspech ďalších štyroch operácií ho však viedol k predčasnému ukončeniu jeho práce v roku 1955. O podobnú operáciu sa už o dva roky skôr pokúšali aj kolegovia z Univerzity v Minnesote Dennis a Varco. V dôsledku chybnéj diagnostiky však pacient operáciu neprežil. Pitva ukázala, že pacient mal v skutočnosti parciálny atrioventrikulárny defekt. Neúspech Dennisa, viedol Lilleheia k rozvoju metodiky skríženej cirkulácie. Pri tomto type mimotelového obehu sa chirurgicky prepojil arteriálny a venózný systém operovaného pacienta a zdravého jedinca (najčastejšie rodič dieťaťa), ktorého srdce potom zabezpečovalo obeh v oboch riečiskách.

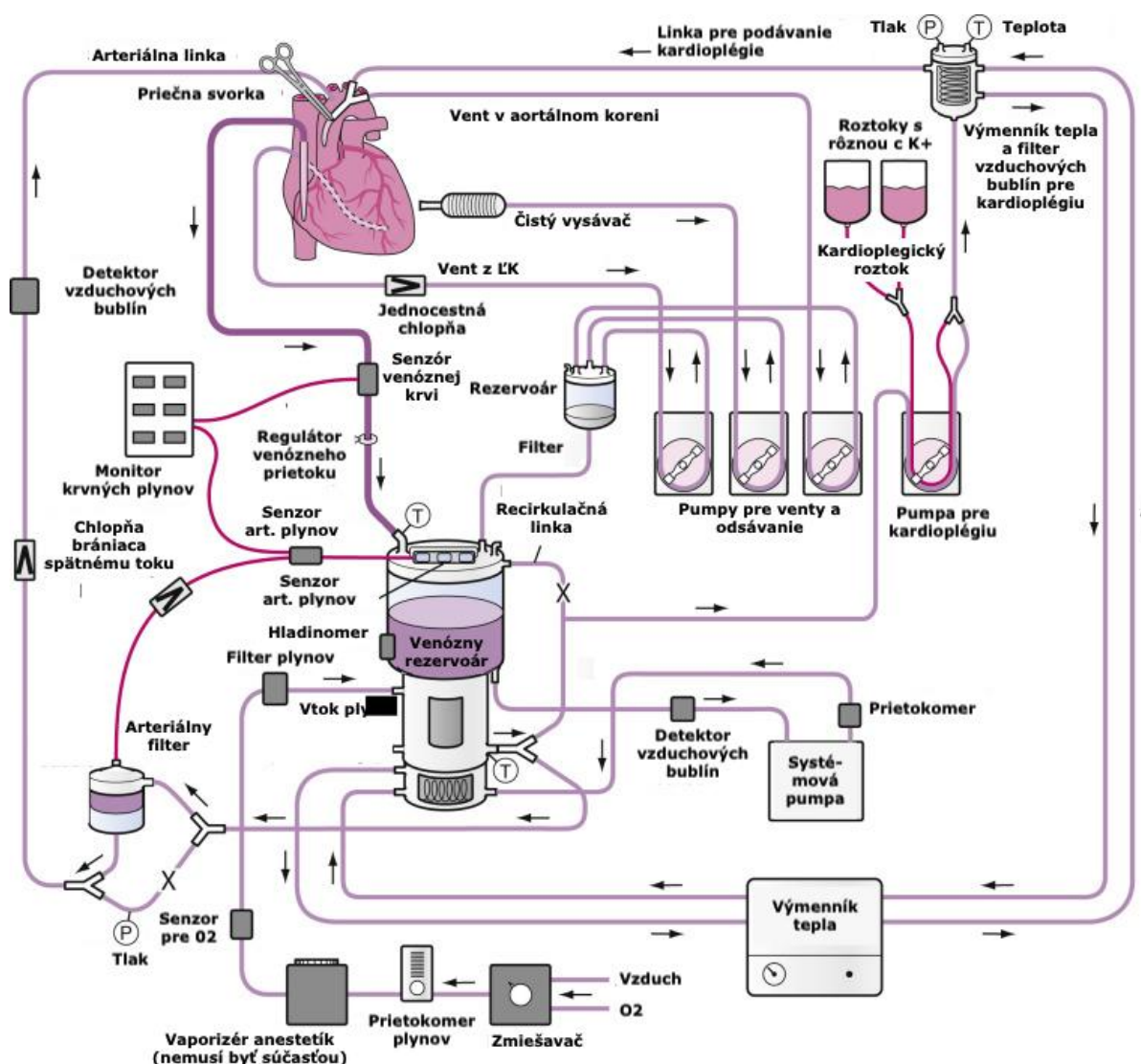


Obrázok 4.: Schémia skríženej cirkulácie. Femorálna artéria donora sa kanylou prepojila s arteriálnym systémom operovaného pacienta (aorta ascendenens) a v.femoralis s venóznym (horná a dolná dutá žila). Prietok bol regulovaný prostredníctvom pumpy.. Zdroj: <https://www.ahajournals.org/doi/10.1161/CIRCULATIONAHA.108.830174>

V marci 1954 začal so svojím tímom sériu operácií na 45 deťoch s vrodenuou vývojovou chybou srdca. Počas operácie zastával funkciu mimotelového obehu otec alebo matka dieťaťa. Operáciu prežilo 28 detí. V 53-ročnom sledovaní zaznamenali neskorú mortalitu u 8 detí. 20 prežilo ďalej bez kardiovaskulárnych komplikácií. Aj napriek tomu, že od tejto metodiky sa pomerne rýchlo upustilo, dokázali Lillehei a jeho tím otvoriť dvere ére modernej kardiochirurgie.

Prvá publikovaná úspešná séria operácií na mimotelovom obehu bola realizovaná na Mayo Clinic pod vedením Johna Kirklina. V 50-tych rokoch nadviazal svoj výskum na prácu Gibbona a spoločne s inžiniermi na Mayo Clinic zostrojil mimotelový obeh Mayo-Gibbon. Uvedenie mimotelového obehu do klinickej praxe viedlo k rapídneému rozvoju kardiochirurgie, pretože umožnil realizovať nové druhy výkonov. Táto metodika je dnes používaná v nemocniciach po celom svete.

## Základné súčasti



Obrázok 5.: Schéma mimotelového obehu Zdroj:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323429740000197>

**Venózna kanyla** – slúži na drénovanie venózneho krvi z pacienta

**Sústava hadíc** – slúžia na vedenie krvi. Moderné hadice majú vnútorný povrch potiahnutý heparínom, vďaka čomu redukujú riziko vzniku mikrotrombov a umožňujú vedenie mimotelového obehu pri nižšom ACT.

**Rezervoár** – slúži ako zásobník krvi. Existujú dva typy systémov – otvorený (hard-shell s pevnou stenou) a zatvorený (kolabovateľný). Pri zatvorenom systéme nedochádza ku

kontaktu krvi pacienta so vzduchom, vďaka čomu sa redukuje zápalová reakcia. Nevýhodou je nemožnosť použiť podtlak a „čistý vysávač“. Rezervoár obsahuje sústavu ventilov, ktoré umožňujú odoberať vzorky krvi a podávať farmaká, tekutiny alebo krvné transfúzie do obehu. V dnešnej dobe sú dostupné aj úplne uzatvorené systémy bez krvného rezervoára, ktoré umožňujú minimalizovať „nariedenie“ krvi pacienta (tzv. mini-ECC).

**Čerpadlo** – slúži na prečerpávanie krvi. V dnešnej dobe sa využívajú dva typy čerpadiel – centrifugálne a valčekové. Centrifugálne čerpadlo je šetrnejšie ku krvným elementom v porovnaní s valčekovým, nevýhodou je však výrazne vyššia cena. Voľba čerpadla závisí hlavne od predpokladaného trvania a náročnosti operácie a klinického stavu pacienta.

**Oxygenátor** – slúži na výmenu plynov. V dnešnej dobe sú takmer výhradne využívané membránové oxygenátory, pri ktorých je výrazne redukovaná mikroembolizácia a poškodenie krvných elementov v porovnaní so starými „bublincovými“ oxygenátormi.

Výmena plynov je regulovaná nastavením prietoku a množstva kyslíka v zmesi. Niektoré oxygenátory umožňujú podávanie inhalačných anestetík do okruhu. Súčasťou oxygenátora je aj výmenník tepla, ktorý slúži na udržiavanie optimálnej teploty a umožňuje veľmi presné a kontrolované ochladzovanie a zohrievanie pacienta, napríklad pri výkonoch vedených v hypotermii.

**Arteriálna linka:** slúži na čerpanie okysličenej krvi s optimálnou teplotou späť do tela pacienta.

**Vent:** samostatná nasávací linka, ktorá umožňuje odsávať krv na zabezpečenie relatívne bezkrvného operačného poľa a vzduch pri odvzdušňovacích manévroch počas odpájania pacienta od mimotelového obehu.

**Čistý vysávač:** umožňuje odsávať krv z operačného poľa. Táto krv sa drénuje do rezervoára a následne vracia do cirkulácie pacienta. Pri zatvorených systémoch nie je možné využiť čistý vysávač. Výhodou je redukcia krvných strát. Nevýhodou je však výraznejšia zápalová

reakcia. Krv v operačnom poli je v kontakte so vzduchom a tkanivami, z ktorých sa uvoľňuje obrovské množstvo pro-zápalových metabolitov (napríklad tkanivo poškodené elektrokoaguláciou pri preparácii).

**Systém krvnej plégie:** súčasťou prístroja pre mimotelový obeh je aj sústava hadíc a čerpadla, ktorá umožňuje miešanie plegického roztoku s krvou pacienta a jeho cielečné podávanie.

Systém umožňuje regulovať optimálnu teplotu, tlak a prietok podávaného roztoku.

**Senzory:** v rámci okruhu mimotelového obehu je zaradených viacero senzorov, ktoré umožňujú kontrolovať vedenie cirkulácie. Štandardne sa používa:

- a) Hladinomer – sleduje minimálnu hladinu krvi v rezervoári
- b) Tlakomery – sledujú tlak na arteriálnej a venóznej linke, v systéme plégie a ventu
- c) Detektor bublín – sleduje výskyt bublín v cirkulovanej krvi
- d) Kyslíkový senzor – sleduje dodávku kyslíka do oxygenátora
- e) Oxymeter – sleduje saturáciu na venóznej a arteriálnej linke
- f) Teplomer – sleduje teplotu cirkulovanej krvi
- g) Systém na kontinuálnu detekciu parciálnych tlakov plynov na arteriálnej a venóznej linke

**Ovládacia konzola:** obrazovky a ovládacie prvky, ktoré umožňujú ovládať a monitorovať mimotelový obeh

## **Základné princípy**

### **Arteriálna linka**

Tok arteriálnej krvi (outflow) do pacienta je zabezpečený vytvorením dostatočného gradientu medzi pumpou a arteriálnym riečiskom pacienta. Základný typ čerpadla predstavuje tzv.

valčeková pumpa. Tento typ čerpadla generuje takmer nepulzatilný tok. Je jednoduchý, spoľahlivý a lacný. Počas mimotelového obehu je systém nastavený na 300mmHg s minimálnymi poklesmi tlaku v dôsledku nastavenia takmer úplnej oklúzie (miera stlačenia hadice valčekom počas čerpania). Nevýhodou je zvýšená deštrukcia krvných elementov pri oklúzii. Povolenie oklúzie je síce šetrnejšie ku krvným elementom, nedovoľuje však stabilne udržať prietok pri meniacom sa odpore. Prietok valčekovej pumpy je za štandardných podmienok dobre predvídateľný a dá sa odvodiť z počtu otáčok za minútu a prievitu kanyly. Problém môže nastať pri využití podtlaku vyššieho ako 200mmHg na venóznej strane. Alternatívu k valčekovej pumpy predstavuje centrifugálne čerpadlo. Princípom je využitie odstredivej sily generovanej rotorom na zrýchlenie krvi v komore. Výsledný prietok čerpadlom je závislý na odpore vo výtoku čerpadla (afterload) a nie je ho možné odhadnúť iba na základe otáčok čerpadla. Pri takomto type čerpadla je preto potrebné do okruhu zaradiť aj prietokomer. Výhodou predstavuje menšie poškodenie krvných elementov, zníženie zápalovej odpovede a takmer nulové riziko rozpojenia systému pri oklúzii arteriálnej linky, pretože nedôjde k nárastu tlaku ako pri pre valčekom. Nevýhodná je najmä vyššia cena. Využitie centrifugálneho čerpadla sa preto odporúča najmä pri dlhších a komplikovanejších výkonoch, pacientoch v ťažkom stave alebo výkonoch v rámci pediatrickej kardiochirurgie.

### **Venózna linka**

Úlohou venóznej linky je drénovať krv prichádzajúcu do srdca. Rovnako ako na arteriálnej strane je hnacou silou tlakový gradient. Najčastejšie sa na tlakový gradient dosiahne jednoduchým samospádom. Tento prístup je jednoduchý, spoľahlivý, vo väčšine prípadov vysoko efektívny a cenovo nenáročný. Nevýhodou je relatívne úzky rozsah gradientov, ktoré je možné dosiahnuť a riziko zastavenia cirkulácie pri nasatí vzduchu. Pre drenáž samospádom je navyše nevyhnutný rezervoár, ktorý zvyšuje množstvo potrebného priming roztoku.



Alternatívou je vytvorenie gradientu pomocou aktívneho odsávania. V ideálnom prípade s možnosťou nastavenia a monitorovania požadovaného podtlaku. V týchto podmienkach sú vtokové a výtokové tlaky na sebe nezávislé a je možné ich samostatne regulovať.

Dostupnejšie a častejšie využívané riešenie je priame napojenie otvoreného „hard-shell“ rezervoára (nekolabujúci rezervoár s pevnou stenou) na štandardný podtlakový rozvod.

Hodnota podtlaku je zväčša neregulovaná na úrovni -40 až -60 cm H<sub>2</sub>O. Využitie podtlakovej venóznej drenáže (VAVT - vacuum-assisted venous return) umožňuje použiť menšie venózne kanyly (výhoda pri periférnej kanylácii), menší rezervoár, kratšie hadice a nižší priming objem. Ďalšou možnosťou aktívneho odsávania je použitie čerpadla. V tejto konfigurácii je efektívnejšie a bezpečnejšie centrifugálne čerpadlo.

### **Výmena plynov**

Výmenu plynov, teda nasýtenie krvi kyslíkom a odstránenie oxidu uhličitého, zabezpečuje oxygenátor. Na to, aby táto výmena prebiehala efektívne, je rovnako ako v pľúcach potrebná obrovská plocha. Staré modely oxygenátorov využívali na výmenu priamy kontakt krvi a plynu. Napríklad prebublávaním plynu cez krv alebo „rozlievaním“ krvi na veľkú plochu rotačných diskových oxygenátorov. Moderné oxygenátory sa snažia tento kontakt čo najviac eliminovať a tým obmedziť deštrukciu krvných elementov a rozvoj zápalovej odpovede. Na výmenu plynov využívajú mikroporózne membrány z umelých vlákien (napríklad polypropylén), odkiaľ pochádza aj ich názov – membránové oxygenátory. Najnovšie typy využívajúce silikónové alebo polymetylpenténové vlákna dokonca zabezpečujú výmenu bez rozhrania plyn – vzduch. Takáto efektívna výmena umožňuje bezpečné použitie oxygenátora na dlhšie ako 24 hodín (napríklad pri ECMO – Extracorporeal membrane oxygenation) a precíznu reguláciu arteriálneho pO<sub>2</sub> a pCO<sub>2</sub>, keďže za väčšiny okolností je extrakcia CO<sub>2</sub> dostatočná nezávisle od minútovej ventilácie.

## **Parciálny tlak kyslíka**

Jednou zo základných funkcií mimotelového obehu je dodať tkanivám dostatočné množstvo kyslíka ( $DO_2$ ) zodpovedajúce spotrebe ( $VO_2$ ). Táto dodávka však nemôže byť neadekvátne vysoká, pretože pri vyššom tlaku hrozí riziko formácie bublín. Hyperoxia je navyše spojená s tvorbou kyslíkových radikálov a zvýšeným oxidačným stresom. Počas mimotelového obehu sa parciálny tlak kyslíka udržiava v hladine medzi 150 – 250mmHg a adekvátnosť perfúzie a dodávky kyslíka tkanivám sa sleduje na základe hodnôt pH, laktátu a venózne saturácie. Optimálna hladina  $PaO_2$  sa reguluje na základe aktuálneho stavu pacienta zmenou prietoku, minútovej ventilácie a koncentrácie kyslíka.

Parciálny tlak kyslíka  $PaO_2$  je závislý na teplote, spotrebe kyslíka  $VO_2$ , prietoku  $Q$ , výkone oxygenátora a prietoku a zloženia plynu. Spotreba kyslíka tkanivami závisí hlavne od teploty a hĺbky anestézie. Pri poklese teploty (napríklad v hypotermickej fáze operácie) dochádza k poklesu spotreby kyslíka o približne 50% na každých  $7^\circ C$  v porovnaní s normotermiou ( $30^\circ C = 50\%$ ,  $23^\circ C = 25\%$ ,  $16^\circ C = 12,5\%$ ). V dôsledku nižšej teploty stúpa afinita hemoglobínu a rozpustnosť kyslíka v krvi. Vo fáze zohrievania naopak spotreba stúpa a kompenzuje sa metabolický dlh.

## **Parciálny tlak oxidu uhličitého**

Parciálny tlak oxidu uhličitého  $PaCO_2$  je možné na mimotelovom obehu regulovať zmenou pomeru medzi prietokom plynu do oxygenátora a prietokom krvi oxygenátorom.  $PaCO_2$  je okrem metabolickej aktivity tkanív závislý aj na teplote. Pri operáciách v hypotermii je preto nutné zvoliť vhodnú stratégiu sledovania a korekcie hladiny  $PaCO_2$  a pH.

Existujú dve stratégie kontroly:

- a) alpha-stat: táto stratégia je založená na sledovaní a udržiavaní pH na hodnote 7,4 meraných pri 37 °C nezávisle od pacientovej skutočnej teploty. Pri nižšej teplote preto dochádza k relatívnej hyperventilácii, poklesu PaCO<sub>2</sub> a vzostupu pH. Pri nižšej teplote sa hodnota pH-neutrality posúva smerom nahor a ostáva preto zachovaná optimálna funkcia viacerých enzýmových systémov. V dôsledku zníženého PaCO<sub>2</sub> však dochádza ku konstrikcii ciev zásobujúcich mozog a vazodilatácii v pľúcnom riečisku, čo vedie k obmedzeniu cerebrálnej perfúzie.
- b) pH-stat: pri tejto stratégii sa hodnota pH a PaCO<sub>2</sub> koriguje podľa aktuálnej teploty pacienta. Rozvíja sa relatívna respiračná acidóza a hyperkapnia, ktorá vedie k zvýšeniu cerebrálnej perfúzie. Zvýšená mozgová perfúzia je v niektorých situáciách výhodná, je však spojená s vyššou expozíciou mikroembolizácii.

Obe metódy vedenia cirkulácie majú svoje výhody a nevýhody a výber je vhodné prispôbiť aktuálnej situácii. Z dostupnej literatúry však vychádzajú lepšie výsledky pri použití alpha-stat v dospelých a pH-stat v pediatrickej populácii pacientov.

### **Antikoagulácia**

Mimotelový povrch predstavuje obrovský neendotelizovaný povrch, na ktorom by za štandardných okolností dochádzalo k tvorbe krvných zrazením. Okrem znefunkčnenia mimotelového obehu (kritické sú hlavne membrány oxygenátoru) môže tento proces ,v dôsledku obrovskej spotreby koagulačných faktorov ,viest' k rozvoju diseminovanej intravaskulárnej koagulácie. Na to aby bolo možné mimotelový obeh viesť, je nutné tento proces zastaviť. Zlatý štandard predstavuje **heparín**. Tento kyslý mukopolysacharid je relatívne bezpečný, má rýchly nástup účinku, jednoduché podávanie a dávkovanie a jeho účinok sa dobre sleduje. Molekula heparínu obsahuje špecifickú pentasacharidovú sekvenciu, ktorá sa viaže na antitrombín III (AT-III). Zmenou jeho konfigurácie asi 1000-násobne

urýchľuje tvorbu ekvimolárnych komplexov s aktívnymi faktormi zrážania, predovšetkým s trombínom a aktivovaným faktorom X. Heparín navyše zvyšuje aktivitu heparínového kofaktoru II, ktorý taktiež inhibuje trombín. Účinok heparínu je teda závislý od koncentrácie AT-III.

**Dávkovanie:** na účely mimotelového obehu je potrebná plná antikoagulácia v dávke 300 – 400 IU/kg. Niektoré centrá dávku stanovujú na základe bedside predoperačného testu odpovede pacienta na dávku.

**Monitorovanie:** na sledovanie účinnosti antikoagulácie sa pred spustením a v pravidelných intervaloch počas vedenia mimotelového obehu sleduje ACT (Activated clotting time – Aktivovaný koagulačný čas). Jednoznačne stanovená hodnota, ktorú treba dosiahnuť pre spustenie mimotelového obehu nie je stanovená. Väčšina centier používa ako hranicu čas 400 až 480s.

**Rezistencia:** neschopnosť dosiahnuť účinný stupeň antikoagulácie napriek adekvátnej dávke heparínu sa vyskytuje v 4 až 26% prípadov. Najčastejšou príčinou je nedostatočná koncentrácia AT-III. V minulosti sa tento problém riešil podaním čerstvej zmrazenej plazmy (FFP), v súčasnej dobe je však dostupný koncentrát faktoru s bezpečnejším profilom. Medzi ďalšie príčiny patrí napríklad súčasné podávanie nitroglycerínu alebo vysoká koncentrácia faktoru VIII, fibrinogénu alebo heparín-viažuceho faktoru. Tento faktor sa uvoľňuje z migrujúcich neutrofilov v odpovedi na závažnú bakteriálnu infekciu (napríklad pri sepe). Terapia heparínom v predoperačnom období môže tiež spôsobiť dysfunkciu alebo nedostatok AT-III.

**Heparínom indukovaná trombocytopenia (HIT):** existujú dve formy. Typ I je vyvolaný aktiváciou doštičiek a vyskytuje sa zhruba dva dni po podaní heparínu. Tento stav je sprevádzaný iba miernym poklesom doštičiek, je benígny a pre vedenie mimotelového obehu nepredstavuje kontraindikáciu. Typ II je spôsobený imunitnou odpoveďou a nastupuje 5 až

14 dní po podaní. Protilátky proti komplexu heparín-PF4 (Platelet Factor 4 – doštičkový faktor 4) sa viažu na trombocyty a aktivujú ich, pričom dochádza k výraznému poklesu. Táto nadmerná aktivácia vedie až u tretiny pacientov k rozvoju tromboembolických komplikácií.

Diagnóza je postavená na klinických prejavoch a laboratórnom dôkaze. U pacientov s históriou HIT je nutné vyšetrenie protilátok. Pokiaľ sa nezachytia cirkulujúce protilátky, je možné heparín použiť. V akútnej a subakútnej fáze s cirkulujúcimi protilátkami sa odporúča operáciu postponovať. Pokiaľ je indikovaná akútna operácia, odporúča sa zvoliť iný antikoagulačný režim s využitím bivalirudínu.

**Antidótum:** protamín sulfát je nízkomolekulárny silno zásaditý proteín s vysokým obsahom arginínu, ktorý s heparínom vytvára neúčinné komplexy. V minulosti sa získaval zo spermii lososovitých rýb. V dnešnej dobe sa produkuje rekombinantnými biotechnológiami. Protamín sulfát je lacný, má rýchly nástup účinku a jednoduché dávkovanie (1 – 1,3mg protamínu na 100IU heparínu). Podávanie protamínu je väčšinou dobre tolerované, často iba s výskytom prechodnej hypotenzie. Reakcia na protamín môže mať však aj katastrofálny priebeh a jeho podávanie by preto malo byť postupné s neustálym monitorovaním klinického stavu pacienta. Existujú 3 typy negatívnej reakcie na protamín. Typ I sa najčastejšie vyskytuje pri rýchlom podaní, je sprevádzaný poklesom systémového a pľúcneho tlaku, poklesom preloadu a hypotenziou. Typ II je spôsobený imunitnou odpoveďou a sprevádzaný anafylaxiou (IIa), anafylaktoidnou reakciou (IIb) alebo nekardiálnym edémom pľúc (IIc). Typ III je charakteristický výraznou vazokonstrikciou pľúcneho riečiska s rozvojom pľúcnej hypertenzie, ktorá môže viesť až k akútnemu pravostrannému srdcovému zlyhaniu. Vyvolávajúcou príčinou sú heparín-protamínové komplexy, ktoré pôsobia na cievnu stenu artérií v pľúcach.

**Rebound heparínu:** pomerne často sa vyskytujúci fenomén opätovného krvácania po adekvátnej neutralizácii heparínu protamínom. Vysvetľuje sa redistribúciou periférne viazaného heparínu do krvi. Terapia pozostáva z podania malej dávky protamínu.

**Alternatívne antikoagulanciá:** ako náhradu za heparín je u indikovaných pacientov (napríklad pre HIT) možné použiť napríklad priame inhibítory trombínu (Argatroban, Bivalirudín). Tieto molekuly nevyžadujú kofaktor, inhibujú voľný aj viazaný trombín a nevedú k produkcii protilátok. Nevýhodou je hlavne nedostupnosť priameho antidóta.

## Postup

**Zostavenie jednotlivých súčastí mimotelového obehu:** súčasti mimotelového obehu, ktoré dochádzajú do kontaktu s krvou pacienta sú jednorazové (oxygenátor, rezervoár, systém hadíc a pod.) a treba ich pred každým výkonom zostaviť. Celý systém sa následne skontroluje.

**Priming:** systém mimotelového obehu sa musí pred spustením naplniť roztokom, aby ho bolo možné podľa potreby okamžite spustiť bez rizika vzduchovej embolizácie. Ako „priming“ roztok je možné využiť kryštaloidy, koloidy alebo prípadne aj krv pacienta. Výber a zloženie roztoku sa líši medzi pracoviskami a závisí hlavne od skúseností daného pracoviska. Pri dospelaj populácii sa najčastejšie využíva 1400 – 1800ml roztoku (pri použití mini ECC bez rezervoára je možné tento objem redukovať na 450ml). Pokiaľ sa na priming nepoužije krv pacienta, dochádza vždy k hemodilúcii. Počas ECC sa toleruje hematokrit pod 30% (niektorí autori udávajú ako akceptovanú hranicu aj 14%). Skôr ako hladinu hematokritu sa však odporúča sledovať schopnosť krvi oxygenovať tkanivá.

**Antikoagulácia pacienta:** aby sa zabránilo vzniku trombov, je nutné pacienta antikoagulovať. Najčastejšie sa na tento účel využíva heparín, pretože sú s ním dlhodobé skúsenosti, má dobre predvídateľnú farmakodynamiku a lacné a dostupné Antidótum.

Účinnosť heparinizácie sa sleduje meraním ACT, ktoré sa počas vedenia mimotelového obehu v pravidelných intervaloch opakuje.

**Zavedenie kanýl:** existuje viacero chirurgických spôsobov a miest kanylácie. Výber závisí od stratégie operácie a preferencie operátora.

**Spustenie mimotelového obehu:** po správnom zavedení kanýl a dosiahnutí účinnej antikoagulácie je možné spustiť mimotelový obeh. Pokiaľ je potrebné zastaviť srdce, nasleduje naloženie klemu na ascendentnú aortu a podanie kardioplegického roztoku.

**Vedenie mimotelového obehu:** počas vedenia mimotelového obehu sa kontinuálne monitorujú parametre cirkulácie, acidobázy a vnútorného prostredia a na ich základe sa reguluje prietok krvi a plynov a jeho zloženie. Pokiaľ to operácia vyžaduje je možné postupné chladenie a zohrievanie pacienta (napríklad pri operácii na aortálnom oblúku).

**Fáza reperfúzie:** po skončení fázy operácie, ktorá vyžaduje mimotelový obeh sa srdce ponechá reperfundovať. Dochádza k vyplaveniu nahromadených metabolitov, stabilizácii myokardu a obnove rytmu. Dĺžka tejto fázy závisí od dĺžky ischemie srdca.

**Odpájanie od mimotelového obehu:** po dosiahnutí akcie srdca s vyhovujúcou kinetikou a frekvenciou, fyziologickej teploty a odvdzdušnení je možné postupne odpájať mimotelový obeh. Znižuje sa podpora a funkciu čerpadla postupne preberá srdce.

**Obnovenie koagulácie:** pokiaľ je srdce úspešne odpojené a nepredpokladá sa ďalšie pokračovanie v mimotelovom obehu je možné účinok podaného antikoagulantia zrušiť podaním protilátky. V prípade heparínu sa podá Antidótum protamín sulfát.

## **Možnosti kanylácie**

Pred spustením samotného mimotelového obehu je nutné zaviesť arteriálnu a venóznú linku.

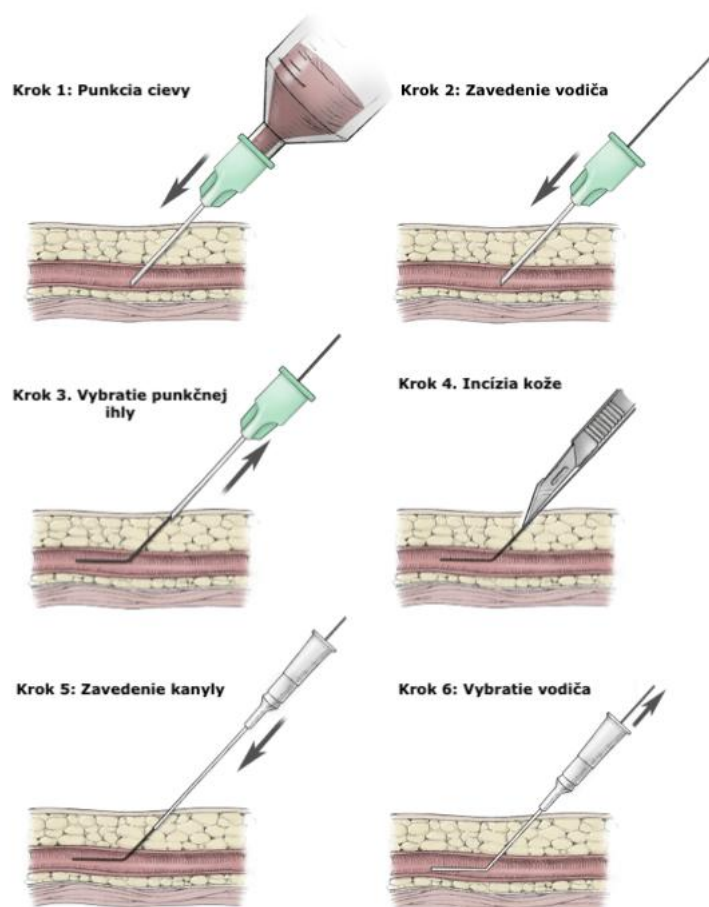
Kanyláciu môžeme realizovať viacerými postupmi.

## Priama kanylácia

Pri tomto postupe je kanylá zavádzaná priamo pod kontrolou zraku. V prvom kroku si chirurg spraví vhodný operačný prístup a miesto pre kanyláciu odpreparuje a priamo vizualizuje. Výhodou je možnosť miesto priamo skontrolovať palpačne a v prípade pochybností aj s využitím ultrazvuku. Miesto kanylácie potom chirurg obšije tabakovým intramurálnym stehom a po tómií steny zavedie kanylu priamo do lumenu.

## Kanylácia Seldingerova metóda

Túto metódu prvýkrát opísal švédsky rádiológ Sven Seldinger v roku 1953. Po punkcii cievy ihlou sa do nej zavedie drôtený vodič, po ktorom je punkčnú tómiu možné postupne rozšíriť sériou dilatátorov a nakoniec zaviesť kanylu. Touto metódou



je možné kanylovať priamo pod kontrolou zraku alebo perkutánne.



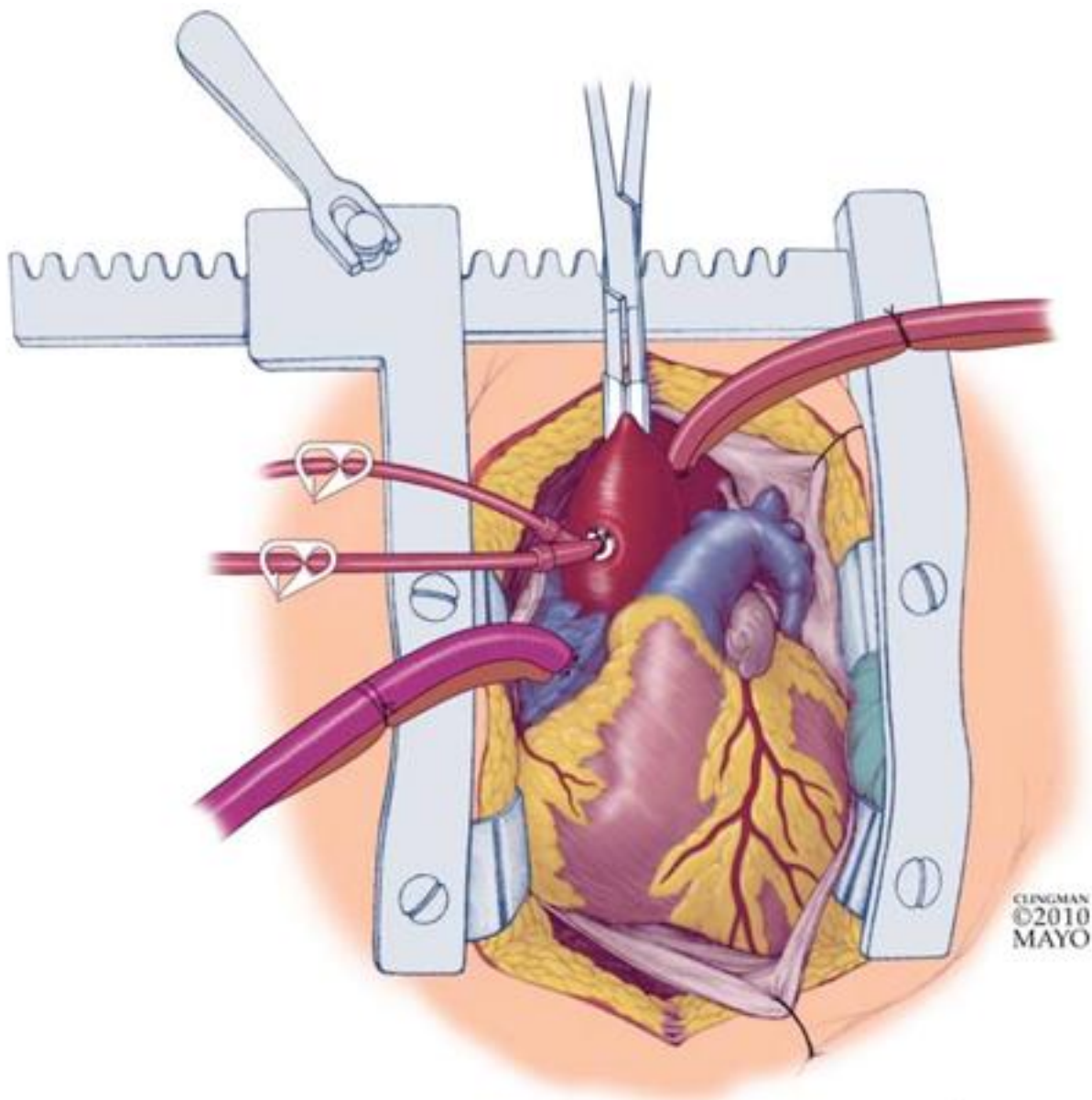
Obrázok 6.: Seldingerova metóda kanylácie. Zdroj: <https://www.ebmconsult.com/articles/seldinger-technique-intravenous-iv-placement>

## **Možné miesta kanylácie**

### **Arteriálna linka**

#### **Aorta ascendens**

Priama kanylácia aorty ascendens je najčastejšie využívaným postupom pri operáciách realizovaných z mediánnej sternotómie. Pri obmedzenom mieste, napríklad pri mini invazívnych operáciách, je možné ascendentnú aortu kanylovať menšou kanylou Seldingerovou metódou.



Obrázok 7.: Štandardná kanylácia: aortálna linka v aorte ascendens, venózna linka zavedená cez uško pravej predsene a centrálne zavedený vent a kanylá pre podávanie antegrádnej kardioplégie. Zdroj: [https://hpi.de/fileadmin/user\\_upload/fachgebiete/plattner/teaching/TrendsBioinformatics/TiB2017/Intermediate\\_Presentations/Frederic\\_Schneider.pdf](https://hpi.de/fileadmin/user_upload/fachgebiete/plattner/teaching/TrendsBioinformatics/TiB2017/Intermediate_Presentations/Frederic_Schneider.pdf)

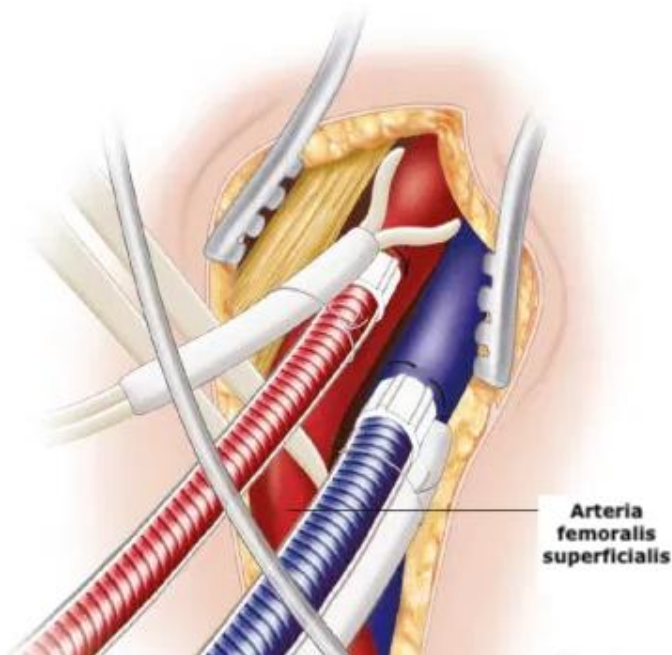
### **Arteria femoralis**

Kanylácia a. femoralis umožňuje spustenie mimotelového obehu bez potreby otvorenia hrudníka. Napríklad pri reoperácii, kde je vysoké riziko poškodenia tkanív pri preparácii. Pri tejto periférnej kanylácii preteká krv aortou retrográdne.

Podmienkou pre využitie tohto prístupu je suficientná aortálna chlopňa (alebo len

minimálna regurgitácia), pretože pri retrográdnom toku môže dochádzať k dilatácii ľavej komory s možným poškodením myokardu a vznikom akútneho edému pľúc.

A. femoralis sa najčastejšie kanyluje Sledingerovou metódou, buď priamo alebo perkutánne. Pri cievach malého kalibru môže kanyla obturovať celý lumen, zamedziť periférnemu prietoku a tým spôsobiť ischemiu končatiny. V takejto situácii, hlavne pri dlhších výkonov s vyšším rizikom končatinovej ischemie, je možné na artériu

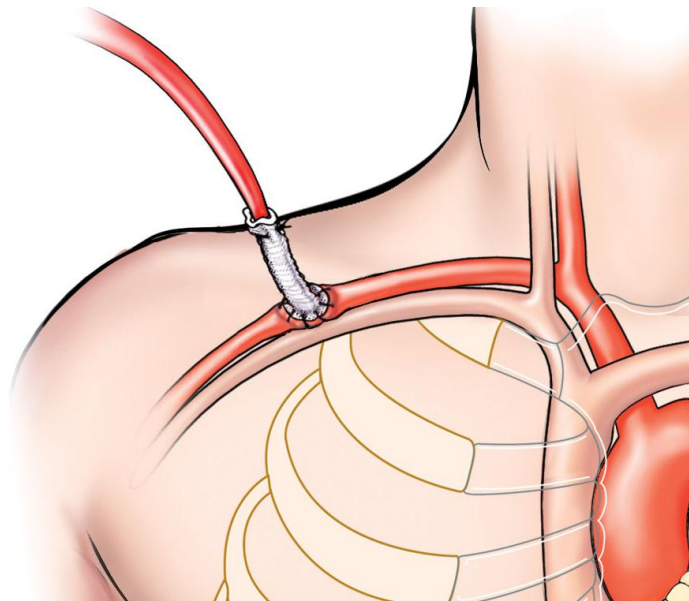


našiť lineárnu cievnu protézu a kanylu zaviesť priamo do nej.

Obrázok 8.: Periférna kanylácia a. a v. femoralis l.dx.. Zdroj: <https://thoracickey.com/cannulation-techniques-for-cardiopulmonary-bypass/>

### **Arteria subclavia**

Výhodou tohto prístupu je v porovnaní s kanyláciou a. femoralis antegrádnny tok aortou a možnosť selektívnej perfúzie kráňa, čo sa využíva pri operáciách so zastavením obehu (cirkulačný arrest). Napríklad pri riešení disekcie ascendentej aorty. Cieva sa kanyluje najčastejšie pod kontrolou zraku Seldingerovou metódou alebo cez našitú lineárnu cievnu protézu.



Obrázok 9.: Periférna kanylácia a. subclavia cez cievnu protézu. Zdroj: <https://consultqd.clevelandclinic.org/acute-type-a-aortic-dissection-repair-where-to-cannulate/>

## Venózna linka

### Pravá predsieň

Priama kanylácia pravej predsieni použitím tzv. double-stage kanyly (*nasávacie otvory v mieste hornej aj dolnej dutej žily*) sa využíva pri operáciách, ktorých nie je potrebné otvárať pravostranné srdcové oddiely. Výhodou je dobrá drenáž z oboch dutých žíl, dobrý prístup a jednoduchá kanylácia s jedinou tómiou. Nevýhodou je nemožnosť otvoriť pravostranné oddiely srdca kvôli riziku nasatia vzduchu a zastavenia obehu.

### Selektívna kanylácia hornej a dolnej dutej žily

Pri tomto postupe sa kanyly zavádzajú priamo do dutých žíl. Výhodou je možnosť dotiahnuť duté žily a otvoriť pravostranné srdcové oddiely. Nevýhodou oproti kanylácii pravej predsiene je horší prístup, najmä k dolnej dutej žile, a nutnosť dvoch tómií (pravá predsieň alebo horná a dolná dutá žila).

### **Vena femoralis**

Kanylácia v. femoralis umožňuje spustenie mimotelového obehu bez potreby otvorenia hrudníka. Veľkosť femorálnej vény niekedy neumožňuje zaviesť kanylu s dostatočným kalibrom, aby bola krv drénovaná samospádom a je nutné na drenáž využiť podtlak. Podtlak je možné využiť iba pri rezervoároch s otvoreným systémom. V. femoralis sa najčastejšie kanyluje Seldingerovou metódou, buď priamo alebo perkutánne.

## **Vent**

### **Arteria pulmonalis**

Aorta pulmonalis je dobre prístupná kanylácii. Nevýhodou je fragilná stena a obmedzenie operačného poľa, napríklad pri preparácii aortálneho oblúku.

### **Vena pulmonalis**

Venae pulmonales sú v porovnaní s a. pulmonalis horšie dostupné, ale v niektorých prípadoch takto zavedený vent menej obmedzuje operačné pole. Výber závisí najmä od stratégie operácie a preferencie operátora.

## **Nevýhody mimotelového obehu**

Aj napriek nesporným výhodám a obrovskému pokroku v možnostiach chirurgickej liečby, ktoré mimotelový obeh umožnil, sprevádza jeho použitie množstvo nežiadúcich účinkov.

Využitie mimotelového obehu by malo preto podliehať prísnyim indikačným kritériám a dĺžka trvania by mala byť limitovaná iba na nevyhnutný čas.

Základné faktory vedúce k rozvoju nežiadúcich účinkov:

- a) Krv cirkuluje cez neendotelizované povrchy
- b) Počas cirkulácie sa do obehu dostávajú vzduchové a časticové mikroemboly
- c) Na jednotlivé zložky pôsobí nefyziologické šmykové napätie
- d) Počas vedenia mimotelového obehu je minimálny alebo žiaden prietok cez pľúcne riečisko
- e) Hemodilúcia

**Hemodilúcia** – pred použitím mimotelového obehu musí byť okruh naplnený tzv. „priming roztokom“, balansovaným roztokom elektrolytov, ktorý sa zložením približuje krvnej plazme. Po spustení obehu, dochádza automaticky k „nariadeniu“ krvi pacienta, čo vedie k zníženiu koncentrácie všetkých funkčných zložiek krvi (hemoglobín, albumín, zrážacie faktory a pod.) s odpovedajúcimi nežiadúcimi účinkami. Tento problém je možné riešiť využitím okruhov bez rezervoára (označované ako mini-ECC), pri ktorých je množstvo primingu minimálne. Tento postup však nie je vhodný pre všetky typy operácií.

**Deštrukcia krvných elementov** – cirkuláciou krvi pacienta cez sústavu hadíc a čerpadiel a membrány oxygenátora dochádza k deštrukcii krvných elementov. Tento problém je možné parciálne riešiť využitím centrifugálneho čerpadla.

**Zápalová odpoveď** – táto skupina nežiadúcich účinkov je vyvolaná hlavne kontaktom krvi pacienta s neendotelizovaným povrchom umelých materiálov, vzduchom a poškodeným tkanivom v operačnom poli, ktorá vedie k spúšťaniu zápalových kaskád a imunitnej odpovedi. Tieto procesy vedú okrem

iného k aktivácii neutrofilov, krvných doštičiek, komplementu, cytokínov, kalikreín-bradykinínového systému, fibrinolytickej a koagulačnej kaskády.

**Chirurgické komplikácie** - súvisia s chirurgickou technikou a zahrňujú riziko poškodenia tkanív, disekcie ciev, zvýšených krvných strát a podobne.

Všetky tieto nežiadúce faktory sú vo väčšej alebo menšej miere úmerné dĺžke trvania mimotelového obehu a sú preto výraznejšie vyjadrené pri dlhšie trvajúcich výkonoch. Existuje mnoho ďalších patofyziologických procesov a ich vzájomných interakcií, ktoré sa spúšťajú vplyvom mimotelového obehu. Ich detailný opis ďaleko prevyšuje rozsah tejto kapitoly. Zjednodušene je možné povedať, že mimotelový obeh u pacienta vyvolá systémovú zápalovú odpoveď, redukciiu krvných elementov, hemokoagulačné poruchy a z nich vyplývajúci narušený hemodynamický status.

## Literatúra

- Kouchoukos, Nicholas T., et al. *Kirklin/Barratt-Boyes Cardiac Surgery E-Book*. Elsevier Health Sciences, 2012.
- Sarkar, Manjula, and Vishal Prabhu. "Basics of cardiopulmonary bypass." *Indian journal of anaesthesia* 61.9 (2017): 760.
- *Cardiac surgery in the adult*. Cohn, Lawrence H., 1937-2016 (Fifth ed.). New York. 2017-08-28. ISBN 978-0-07-184487-1. OCLC 930496902
- Butler, John, Graeme M. Rucker, and Stephen Westaby. "Inflammatory response to cardiopulmonary bypass." *The Annals of thoracic surgery* 55.2 (1993): 552-559.
- Kirklin, James K., et al. "Complement and the damaging effects of cardiopulmonary bypass." *The Journal of thoracic and cardiovascular surgery* 86.6 (1983): 845-857.
- Morgan, I. S., et al. "Superiority of centrifugal pump over roller pump in paediatric cardiac surgery: prospective randomised trial." *European journal of cardio-thoracic surgery* 13.5 (1998): 526-532.
- Fontes, Monique T., et al. "Arterial hyperoxia during cardiopulmonary bypass and postoperative cognitive dysfunction." *Journal of cardiothoracic and vascular anesthesia* 28.3 (2014): 462-466.
- Molyneux, V. K. "Andrew. *Equipment and monitoring for cardiopulmonary bypass*." (2015).
- Boettcher, Wolfgang, Frank Merkle, and Heinz-Hermann Weitkemper. "History of extracorporeal circulation: the conceptual and developmental period." *The journal of extra-corporeal technology* 35.3 (2003): 172-183.



