

# Diagnostika smrti mozku pomocí transkraniální dopplerometrie a transkraniální duplexní sonografie

**prof. MUDr. David Školoudík, Ph.D., FESO**

Centrum vědy a výzkumu, Fakulta zdravotnických věd, Univerzita Palackého v Olomouci

V roce 2014 byla transkraniální dopplerovská (TCD)/duplexní (TCCS) sonografie zařazena v České republice mezi pomocné metody prokazující zástavu mozkové cirkulace při stanovení smrti mozku. Základem diagnostiky zástavy mozkové cirkulace je zhodnocení hemodynamických parametrů v intrakraniálních tepnách – směru toku, průtokových rychlostí a indexů pulzatility anebo rezistence. V článku je popsána metodika stanovení zástavy mozkové cirkulace pomocí TCD a TCCS, která vychází z metodiky Neurosonologické komise České neurologické společnosti ČLS JEP.

**Klíčová slova:** sonografie, transkraniální dopplerometrie, smrt mozku, nitrolební hypertenze.

## Diagnosing brain death using transcranial Doppler and transcranial duplex sonography

In 2014, transcranial Doppler (TCD) / colour-coded duplex sonography (TCCS) was included among auxiliary methods for detecting cerebral circulatory arrest when determining brain death in the Czech Republic. The mainstay of diagnosing cerebral circulatory arrest is the evaluation of haemodynamic parameters in the intracranial arteries, i.e. flow direction, flow velocities, and pulsatility and/or resistance indexes. The article describes the methodology for detection of cerebral circulatory arrest using TCD and TCCS which is based on the methodology of the Neurosonological Committee of the Czech Neurological Society of the Czech Medical Association of Jan Evangelista Purkyně.

**Key words:** sonography, transcranial Doppler, brain death, intracranial hypertension.

## Úvod

Transkraniální dopplerovská sonografie (transcranial Doppler, TCD) a transkraniální barevná duplexní sonografie (transcranial color-coded duplex sonography, TCCS) byly na základě proběhlých studií recentně zařazeny do mnoha národních a mezinárodních standardů pro stanovení smrti mozku (Walter, Schreiber et Kaps, 2016; Monteiro et al., 2006). Jedná se o druhou nejčastěji používanou pomocnou metodu při stanovení zástavy mozkové cirkulace po elektroencefalografii (Walter, Schreiber et Kaps, 2016).

V roce 2014 byly transkraniální sonografické metody (TCD a TCCS) zařazeny zákonem č. 44/2013 Sb. mezi pomocné metodiky proka-

jící zástavu mozkové cirkulace při stanovení smrti mozku i v České republice (Zákon č. 44/2013 Sb. o darování, odběrech a transplantacích orgánů a o změně některých zákonů (transplantační zákon)). Podobně je toto vyšetření zakotveno v zákoních v normách Rakouska, Německa, Švýcarska, Belgie, Holandska, Lucemburska, Polska nebo v doporučení pro země Jižní Ameriky (Walter, Schreiber et Kaps, 2016; Wissenschaftlicher Beirat der Bundesärztekammer. Richtliniegemäß §16 Abs.1S. 1 Nr.; Ledoux, 2014; Luxembourg et al., 2009; Health Council of the Netherlands, 2015; Österreichisches Bundesinstitut für Gesundheitswesen 2013; Ministry of Health of Poland, 2007; Schweizerische Akademie der

Medizinischen Wissenschaften, 2011; Ducrocq et al., 1998; Consensus Group on Transcranial Doppler in Diagnosis of Brain Death, 2014; Školoudík et al., 2003).

V současnosti existují dvě dostupné ultrazvukové vyšetřovací metody, které umožňují neinvazivní měření průtoků intrakraniálními tepnami přes intaktní lebku – TCD a TCCS (Školoudík et al., 2003). Pomocí TCD nelze vizualizovat intrakraniální strukturální, avšak umožňuje identifikaci insonovaných intrakraniálních tepen pomocí údajů o směru toku krve a hloubce, ze které je signál snímán. TCCS je pak vyšetřovací metoda, která mimo dopplerometrického vyšetření toku (obdobně jako u TCD)



KORRESPONDENČNÍ ADRESA AUTORA:

prof. MUDr. David Školoudík, Ph.D., FESO, skoloudik@email.cz

Centrum vědy a výzkumu, Fakulta zdravotnických věd Univerzita Palackého v Olomouci

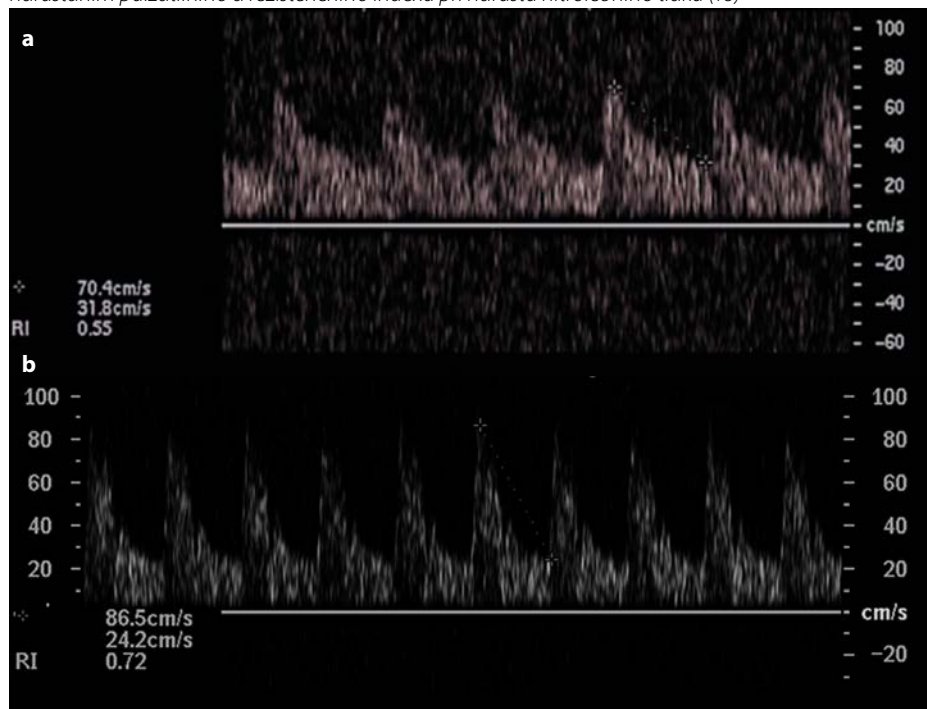
Hněvotínská 3, 775 15 Olomouc

Cit. zkr: Neurol. praxi 2017; 18(4): 244–247

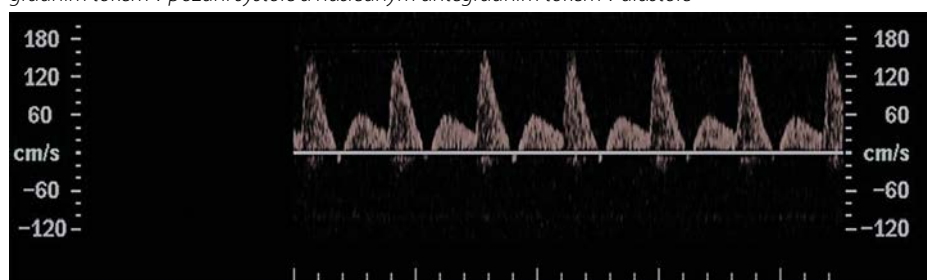
Článek přijat redakcí: 16. 1. 2017

Článek přijat k publikaci: 16. 3. 2017

**Obr. 1.** TCS/TCCS vyšetření: normální průtoková křivka při normálním nitrolebním tlaku (1a) s následným narůstáním pulzatilního a rezistenčního indexu při nárůstu nitrolebního tlaku (1b)



**Obr. 2.** TCS/TCCS vyšetření: obraz toku u pacienta v nitrolební hypertenzi s krátkým nulovým až retrográdním tokem v pozdní systole a následným antegrádním tokem v diastole



umožňuje i zobrazení intrakraniálních struktur včetně mozkového parenchymu v B-obrazu a intrakraniálních tepen v barevném nebo energetickém dopplerovském módu.

Základem diagnostiky zástavy mozkové cirkulace je zhodnocení hemodynamických parametrů v intrakraniálních tepnách – směru toku, průtokových rychlostí, a to jak maximální systolické rychlosti (peak systolic velocity, PSV), tak konečné diastolické rychlosti (end-diastolic velocity, EDV) a event. střední průtokové rychlosti (mean flow velocity, MFV) a indexů pulzatility (pulsatility index, PI) a rezistence (resistance index, RI). RI je definován jako rozdíl mezi PSV a EDV dělený PSV. PI je definován jako rozdíl PSV a EDV dělený MFV, přičemž normální rozmezí pro RI je 0,49–0,63, pro PI 0,6–1,1 (Školoudík et al., 2003).

Zástava mozkové cirkulace odpovídající smrti mozku a jedince je obecně definovaná jako stav, kdy intrakraniální tlak (intracranial pressure, ICP) je shodný nebo vyšší než mozkový perfuzní tlak

(cerebral perfusion pressure, CPP) (Tomek et al., 2014). Tento stav však ve většině klinických scénářů (např. u pacientů s kraniocerebrálním traumatem, cévní mozkovou příhodou, edémem mozku po mozkové hypoxii) nenastává okamžitě, ale postupně dochází k typickým hemodynamickým změnám v intrakraniálních tepnách, které můžeme sledovat pomocí TCD anebo TCCS. Při narůstajícím ICP dochází postupně k následujícím typickým změnám průtokové křivky v mozkových tepnách.

### Iniciální fáze nitrolební hypertenze

Nitrolební hypertenze je definována jako zvýšení ICP nad 15 mmHg. Při postupném nárůstu nitrolební hypertenze s ICP 15 až 30 mmHg dochází k odpovídajícímu nárůstu periferní rezistence v intrakraniálních tepnách, což lze detekovat při TCD/TCCS vyšetření pomocí nárůstu indexů PI a RI (obrázek 1a, b). Avšak tato změna není specifická jen pro nárůst nitrolební

hypertenze. Pro detekci nárůstu ICP je nutné provést TCD/TCCS vyšetření opakovaně s detekcí narůstání PI a RI. Pro maximální přínos tohoto vyšetření je vhodné provést první vyšetření ještě při normálním ICP, tedy před jeho nárůstem.

Při hodnotách ICP nad 30 mmHg dochází k výraznému zvyšování hodnoty PI a RI. Hodnota PI je považována za lehce lépe korelující marker nitrolební hypertenze než RI, avšak při TCCS vyšetření obtížněji měřitelná (Školoudík et al., 2003). Při hodnotách PI >3,0 je mozkový průtok (cerebral blood flow, CBF) menší než 20 % normálních hodnot, při hodnotách PI >4,0 je pak CBF dosahuje méně než 10 % normálních hodnot (Tomek et al., 2014). Při dalším narůstání ICP se postupně snižuje diastolická rychlost a systolický hrot se stává štihlejší. Když se ICP vyrovná diastolickému plnicímu tlaku, dojde ke krátkému úplnému vymizení průtoku v diastole, popřípadě i ke krátkému obrácení toku v pozdní systole (obrázek 2). V této fázi nedochází ještě k zástavě mozkové cirkulace, mozek je krevně zásoben alespoň během systolické fáze toku.

### Reverberační bifázický vzorec

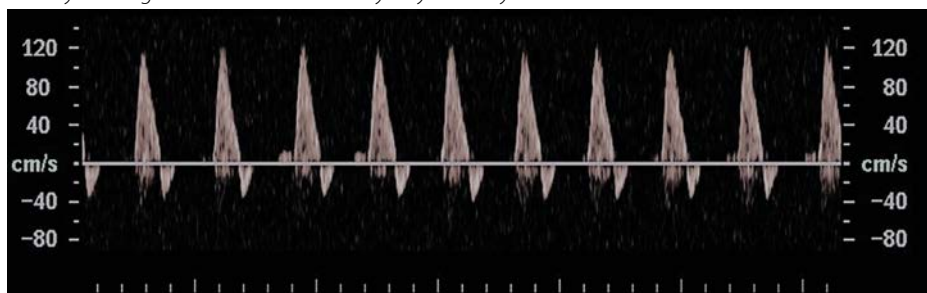
Při vyrovnávání CPP a ICP můžeme detekovat první obraz, který již může odpovídat zástavě mozkové cirkulace, tzv. reverberační bifázický vzorec. Průtoková křivka má během systoly anterográdní tok typu ostrého systolického hrotu, po kterém následuje retrográdní tok v diastole (obrázek 3). Během jednoho srdečního cyklu tak dochází k reverberaci (oscilaci) krevního toku – v systole teče krev do mozku, v diastole zpět. Teoreticky, pokud je plocha pozitivního (antegrádního) toku průtokové křivky shodná s plochou negativního (retrográdního) toku, pak je skutečný výsledný průtok (net flow) mozkem nulový. Tento tok pak lze považovat za obraz zástavy mozkové cirkulace. Z hlediska klinické praxe lze pro potvrzení zástavy mozkové cirkulace použít následující dvě kritéria:

- anterográdní fáze na vrcholu systoly má PSV nižší než 50 cm/s a zároveň není větší než čtyřnásobek maximální rychlosti retrográdního toku (obrázek 4)
- maximální rychlost antegrádního toku je maximálně o 10 cm/s vyšší než maximální retrográdní rychlost

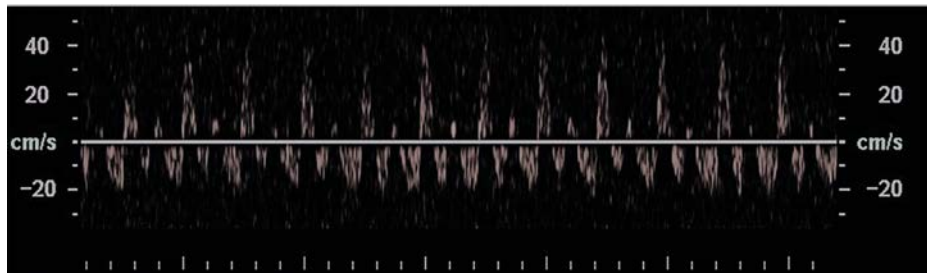
### Krátké systolické hroty

V další fázi zástavy mozkové cirkulace jsou při TCD/TCCS vyšetření detekovatelné krátké

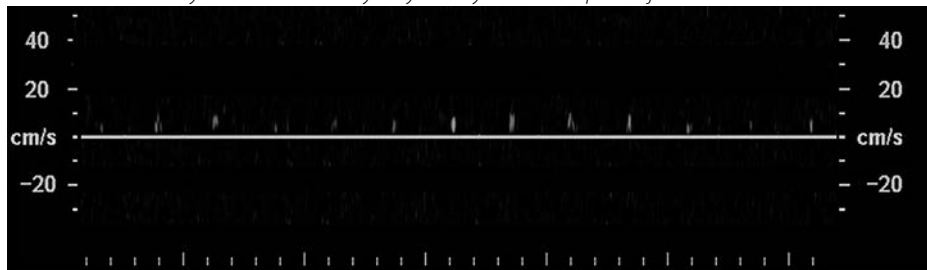
**Obr. 3.** TCS/TCCS vyšetření: nález reverberačního bifázického toku u pacienta v nitrolební hypertenzi s krátkým retrográdním tokem na konci systoly a nulovým tokem v diastole



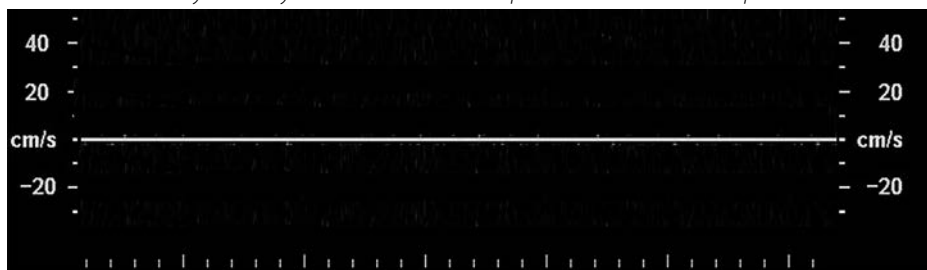
**Obr. 4.** TCS/TCCS vyšetření: nález reverberačního bifázického toku odpovídajícího zástavě mozkové cirkulace



**Obr. 5.** TCS/TCCS vyšetření: nález krátkých systolických hrotů odpovídajících zástavě mozkové cirkulace



**Obr. 6.** TCS/TCCS vyšetření: vymizení detekovatelného průtoku v intrakraniální tepně



systolické hroty (systolic spikes). Jejich podkladem je pravděpodobně jen přenesení pulzace toku z extrakraniálního řečiště a nemají již žádný hemodynamický význam s klinicky relevantním tokem krve do mozkové tkáně. Systolické hroty jsou oproti průtokové křivce při rezistentním toku (první fáze, bod 1) velmi krátkého trvání < 200 ms (obrázek 5). Pro detekci systolických hrotů je v přístroji třeba nastavit filtry k eliminaci pohybových artefaktů cévní stěny na jejich minimální hodnotu.

### Úplné vymizení detekovatelného toku v intrakraniálních tepnách

Finálním obrazem zástavy mozkové cirkulace při TCD/TCCS vyšetření je úplné vymizení jakého-

koliv detekovatelného toku ve všech zobrazitelných intrakraniálních tepnách (obrázek 6). Nicméně je potřeba si uvědomit, že u 5–25 % populace není možno zobrazit tok v intrakraniálních tepnách pro nedostatečnou prostupnost temporálního kostního okna pro ultrazvukové vlnění (z důvodu hypereostózy, osteoporózy apod.), a to v závislosti na věku a pohlaví (Školoudík et al., 2003). V těchto případech nelze TCD/TCCS vyšetření použít jako metodu ke stanovení zástavy mozkové cirkulace. Obraz úplného vymizení cirkulace lze uznat jako nález potvrzující zástavu mozkové cirkulace odpovídající smrti mozku pouze v případě, že v nedávné době, a to ne delší než půl roku, byly detekovány toky v intrakraniálních tepnách pomocí TCD/TCCS vyšetření, nejlépe na shodném typu přístroje.

## Metodika stanovení smrti mozku pomocí TCD a TCCS

Českou metodiku stanovení smrti mozku pomocí TCD a TCCS vypracovala Neurosonologická komise České neurologické společnosti ČLS JEP (Tomek et al., 2016). Vyšetření se provádí ultrazvukovým přístrojem umožňujícím TCD nebo TCCS vyšetření s dedikovanou transkraniální sondou s nosnými frekvencemi mezi 1 a 4 MHz, obvykle 2–3 MHz. Při TCCS vyšetření se provádí zobrazení intrakraniálních struktur v B-obrazu a tepen v barevném nebo energetickém dopplerovském modu a následně se získávají průtokové křivky ze zobrazitelných intrakraniálních tepen v dopplerovském modu duplexní transkraniální sondou. Alternativně stačí zobrazení pouze průtokových křivek z tepen Willisova okruhu při TCD vyšetření, a to při dobré prostupnosti kostních oken s podmínkou identifikace všech vyšetřovaných tepen.

Základem stanovení smrti mozku pomocí TCD/TCCS vyšetření je vyšetření průtoku v intrakraniálních tepnách přes temporální kostní okno (a. cerebri media, terminální segment a. carotis interna, event. a. cerebri anterior a a. cerebri posterior), a to oboustranně a subokcipitálně přes foramen magnum (a. vertebralis, a. basilaris), případně oboustranně transorbitálně (karotický sifon a. carotis interna).

Vyšetření může provádět pouze lékař se specializovanou způsobilostí v oboru neurologie s certifikátem funkční odbornosti v neurosonologii České neurologické společnosti ČLS JEP. Vyšetření musí být provedeno při středním arteriálním tlaku (MAP) minimálně 60 mmHg a současně systolickém arteriálním tlaku minimálně 90 mmHg. Průkaz mozkové smrti lze provést dvěma způsoby:

### 1) Nález jednoho z typických obrazů svědčících pro smrt mozku

a) Reverberační bifázický vzorec – alternující anterográdní tok na vrcholu systoly s průtokovou rychlostí nižší než 50 cm/s a následně retrográdní tok v diastole, přičemž rychlost anterográdního toku nepřesahuje čtyřnásobek rychlosti retrográdního toku, nebo výsledná rychlost toku při odečtení hodnot retrográdní rychlosti v diastole od hodnot anterográdní rychlosti v systole nepřesahuje 10 cm/s. V diastole nesmí být přítomen anterográdní tok.

b) Krátké systolické hroty – krátký anterográdní tok typu systolického hrotu pouze v úvodu

systoly s rychlostí maximálně do 50 cm/s a nulovým tokem po zbytek systoly a v diastole.

**2) Úplné vymizení detekovatelného průtoku ve všech vyšetřovaných tepnách intrakraniálně** u pacienta s předchozím transkraniálním sonografickým vyšetřením v posledním měsíci, kdy byl průtok detekován v a. cerebri media oboustranně, distálním úseku a. vertebralis a a. basilaris. Pokud nejsme schopni při prvním vyšetření detekovat tok v mozkových tepnách a pacient neměl předcházející transkraniální sonografické vyšetření, pak nelze pomocí TCD/TCCS smrt mozku stanovit.

Pro potvrzení smrti mozku musí být typický obraz průtoku krve v tepně svědčící pro smrt mozku (viz bod 1) nebo úplně vymizelý tok v případě, že z této tepny byl sonograficky detekován tok v posledním měsíci (viz bod 2), současně přítomen ve všech vyšetřovaných tepenných

segment intrakraniálních tepen, a to souvisle po dobu minimálně 30 minut. Pro forenzní účely je doporučeno zaznamenání (elektronicky nebo v tištěné formě) nálezů průtoku odpovídajícímu smrti mozku ve všech vyšetřovaných tepnách dle výše uvedeného protokolu s časovým odstupem minimálně 30 minut.

U nemocných se ztrátovým poraněním kalvy nebo po dekompresní kraniektomii může přetrvávat průtok v některých mozkových tepnách i v případě smrti mozku. V těchto případech nelze transkraniální sonografické vyšetření použít k průkazu smrti mozku. Obdobně falešně negativní nález zástavy mozkové cirkulace může být detekován u pacientů s artrie-venózním zkratem, např. karotido-kavernózní píštělí.

Další limitací TCD/TCCS vyšetření je nedostatečné temporální nebo subokcipitální kost-

ní okno, kdy nelze spolehlivě detekovat tepny Willisova okruhu, tedy minimálně oboustranně a. cerebri media, terminální segment a. carotis interna, a. vertebralis a a. basilaris. U těchto pacientů lze použít TCD nebo TCCS jen jako doplňkovou monitorovací metodu, pokud průtok v mozkových tepnách detekujeme alespoň dalšími možnými přístupy, např. transorbitálně nebo submandibulárně, a to k časově optimální indikaci jiné metody k definitivnímu průkazu mozkové smrti, např. angiografie nebo SPECT.

Naopak největší výhodou TCD/TCCS vyšetření je její dostupnost a mobilita. Vyšetření lze provést kdykoli i přímo u lůžka pacienta, což prokazatelně vede ke klinicky významnému urychlení stanovení diagnózy mozkové smrti a přispívá tak k lepšímu stavu dárce orgánů (Orban et al., 2012).

## LITERATURA

1. Consensus Group on Transcranial Doppler in Diagnosis of Brain Death. Latin American consensus on the use of transcranial Doppler in the diagnosis of brain death. *Rev Bras Ter Intensiva* 2014; 26: 240–252.
2. Ducrocq X, Hassler W, Moritake K, Newell DW, von Reutern GM, Shioqai T, Smith RR. Consensus opinion on diagnosis of cerebral circulatory arrest using Doppler-sonography: Task Force Group on cerebral death of the Neurosonology Research Group of the World Federation of Neurology. *J Neurol Sci* 1998; 159: 145–150.
3. Health Council of the Netherlands. Vaststellenvande dood bij postmortale orgaandonatie. Protocolen en criteria, inclusief geactualiseerd Hersendood protocol. Den Haag: Health Council of the Netherlands, 2015; publication no. 2015/13.
4. Ledoux D. Definition et diagnostic de la mort cerebrale. In: Monbaliu D, Lormans P, Ledoux D (Hrsg.) *Livre de poche Don d'organes et de tissus*. Leuven: Acco; 2014: 53–69.
5. Luxembourg HK, Nassau D, Di Bartolomeo M, Le Ministere dela Santé. Règlement grand-ducal du 3 décembre 2009 déterminant les procédés à suivre pour constater la mort en vue d'un prélèvement. *Journal Officiel du Grand-Duché de Luxembourg* 2009; A: 4291, available at: <http://www.legilux.public.lu/rgl/2009/A/4291/B.pdf>.
6. Ministry of Health of Poland. Obwieszczenie ministra zdrowia z dnia 17 lipca 2007 r. w sprawie kryteriów i sposobu stwierdzenia trwałego nieodwracalnego ustania czynności mózgu. *Monitor Polski* 2007; 46: Pos.547.
7. Monteiro LM, Bollen CW, van Huffelen AC, Ackerstaff RG, Jansen NJ, van Vught AJ. Transcranial doppler ultrasonography to confirm brain death: a meta-analysis. *Intensive Care Med* 2006; 32: 1937–1944.
8. Orban JC, El-Mahjoub A, Rami L, Jambou P, Ichai C. Transcranial doppler shortens the time between clinical brain death and angiographic confirmation. *Transplantation Journal* 2012; 94: 585–588.
9. Österreichisches Bundesinstitut für Gesundheitswesen. Empfehlungen zur Durchführung der Hirntoddiagnostik bei einer geplanten Organentnahme entsprechend dem Beschluss des Obersten Sanitätsrates vom 16. November 2013.
10. Schweizerische Akademie der Medizinischen Wissenschaften. Feststellung des Todes mit Bezug auf Organtransplantationen. Medizinisch-ethische Richtlinien. Basel: Schweizerische Akademie der Medizinischen Wissenschaften; 2011.
11. Školoudík D, Škoda O, Bar M, Brozman M, Václavík D, et al. *Neurosonologie*. Galén, Praha 2003.
12. Tomek A, Šaňák D, Šrámek M, Šroubek J, Školoudík D, Mikulík R, Neumann J, et al. *Neurointenzivní péče*, druhé přepracované a doplněné vydání. Mladá Fronta a. s., Praha 2014.
13. Tomek A, Školoudík D, Škoda O, Neumann J, Šaňák D, Mikulík R, Václavík D, Herzig R, Bar M. Metodika stanovení smrti mozku pomocí transkraniální sonografie vypracovaná Neurosonologickou komisí a Cerebrovaskulární sekci České neurologické společnosti ČLS JEP. *Cesk Slov Neurol N* 2016; 79/112(5): 608–611.
14. Walter U, Schreiber SJ, Kaps M. Doppler and duplex sonography for the diagnosis of the irreversible cessation of brain function („brain death“): current Guidelines in Germany and Neighboring Countries. *Ultraschall Med*. 2016; 37(6): 558–578.
15. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesärztekammer. Richtlinien gemäß § 16 Abs. 1 S. 1 Nr. 1 TPG für die Regel zur Feststellung des Todes nach § 3 Abs. 1 S. 1 Nr. 2 TPG und die Verfahrensregeln zur Feststellung des endgültigen, nicht behebbaren Ausfalls der Gesamtfunktion des Großhirns, des Kleinhirns und des Hirnstamms nach § 3 Abs. 2 Nr. 2 TPG, Vierte Fortschreibung. *Dtsch Arztebl* 2015; 112: A-1256.
16. Zákon č. 44 / 2013 Sb., o darování, odběrech a transplantacích tkání a o změně některých zákonů (transplantační zákon). In: *Sbírka zákonů*. 31. ledna 2013; částka 19: 305–317.