

Non-invasive imaging of spinal cord blood supply

Citation for published version (APA):

Nijenhuis, R. J. (2007). *Non-invasive imaging of spinal cord blood supply*. Maastricht University. <https://doi.org/10.26481/dis.20070622rn>

Document status and date:

Published: 01/01/2007

DOI:

[10.26481/dis.20070622rn](https://doi.org/10.26481/dis.20070622rn)

Document Version:

Publisher's PDF, also known as Version of record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.umlib.nl/taverne-license

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

repository@maastrichtuniversity.nl

providing details and we will investigate your claim.

Chapter XI

Summary and Conclusions

Aneurysms of the thoracoabdominal aorta (TAAA) comprise a life-threatening disorder. When the aorta reaches a diameter of more than 6 cm surgery is indicated. During surgery the aorta is cross-clamped and the aneurysm is replaced by a prosthetic graft. One of the most feared and devastating events that can occur during and after surgery is paraplegia. The cause for this complication is temporary or permanent interruption of the blood supply to the spinal cord. To prevent paraplegia it is of absolute importance to preserve, and when needed to restore, the blood supply to the spinal cord. The largest and therefore considered the most important supplier of the spinal cord is the artery of Adamkiewicz. Until very recently catheter angiography was the only imaging modality capable of visualizing the Adamkiewicz artery. However, the use of catheter angiography in TAAA patients has two major disadvantages. First of all, it is not possible to localize the Adamkiewicz artery in all TAAA patients (detection rate between 43 and 86%). Secondly, this invasive imaging technique may induce paraplegia in itself. Due to recent technical improvements it has become possible to visualize blood vessels of the spinal cord with non-invasive imaging modalities such as MR angiography. The aims of this thesis were to develop a reliable MR angiography technique that is able to consistently localize the Adamkiewicz artery and its segmental supplier, to validate this MR angiography technique, compare it with CT angiography, and finally to assess the clinical utility of MR angiography.

In *chapter II*, we have investigated if the MR angiography technique developed, was capable to visualize and localize the Adamkiewicz artery and its segmental

supplier in 8 patients with a herniated thoracic intervertebral disc. In these non-vascular compromised patients preoperative localization can be of importance, as during (thoracoscopic) surgery segmental arteries may be damaged or deliberately sacrificed to prevent bleeding. If this were to concern the segmental supplier of the Adamkiewicz artery this could lead to ischemia of the spinal cord and thus paraplegia. MR angiography was found to be capable of localizing the Adamkiewicz artery and its segmental supplier in all 8 patients. Preoperative knowledge of the segmental supplier level led in 3 cases to a change in the side of surgical approach, to avoid any damage to this segmental supplier. In none of the 8 operated patients postoperative paraplegia occurred.

In *chapter III*, two different contrast agents were explored to optimize MR angiography image quality and to test the reproducibility in localizing the artery of Adamkiewicz in TAAA patients. The use of the new contrast agent (Gadobutrol 1.0-M) did not improve image quality. Nevertheless, it was confirmed that MR angiography could reproducibly localize the Adamkiewicz artery and its segmental supplier.

In *chapter IV*, we have tested a newly developed MR angiography technique that aimed to improve the differentiation between the inlet artery (i.e., the Adamkiewicz artery) and the similarly shaped outlet vein (i.e., great anterior radiculomedullary vein). The reason for conducting this study was the observation that the outlet vein was already enhanced in the first dynamic phase in many of the TAAA patients. This new MR angiography technique allowed faster scanning, which enabled complete separation between the inlet artery and outlet vein based on time differences in

contrast arrival. A disadvantage of this new technique was that the field of view, within the required time resolution, was limited to the spinal cord itself. Therefore, the entire trajectory of the supplying segmental artery from the aorta to the spinal cord could not be visualized, which is, however, of importance for clinical use. Nevertheless, this was the first MR angiography technique described that showed complete separation of inlet artery and outlet vein based on time difference of contrast arrival.

In *chapter V*, the first of two validation studies is described. In this first study, MR angiography based localization of the Adamkiewicz artery was compared with catheter angiography (i.e., standard of reference) in patients with a suspected vascular malformation of the spinal cord. MR angiography could correctly localize the level and side of the Adamkiewicz artery in 14 out of 15 patients. In contrast to catheter angiography, MR angiography could localize the outlet vein of the spinal cord. Convincing separation between the inlet artery and outlet vein could be accomplished using the two-phase MR angiography approach and analysis of signal intensity courses of these two vessels.

In *chapter VI*, the second validation study is described. Here the spinal cord of a postmortem TAAA patient was prepared to determine the course and origin of the Adamkiewicz artery and the outlet vein for comparison with preoperative MR angiography of this deceased patient. The two-phase MR angiography could localize the Adamkiewicz artery and separate it from the outlet vein. Both localization and configuration of these two spinal cord vessels as visualized by MR angiography were in complete agreement with the spinal cord specimen.

In *chapter VII*, computed tomography (CT) and MR angiography were compared to investigate which of these two modalities is most suited for localizing the Adamkiewicz artery in TAAA patients. Apart from localizing the Adamkiewicz artery the image quality was also assessed in 39 patients. Using MR angiography it was found that two observers were able to localize the Adamkiewicz artery on average in 97% of the cases compared to 71% with CT angiography. Overall image quality was also judged to be better for MR angiography. The most important explanation why MR angiography performed better than CT angiography was that a higher contrast-to-noise ratio for the Adamkiewicz artery was accomplished using MR angiography. The contrast-to-noise ratio in CT angiography was moreover found to decrease with increasing abdominal diameters, while for MR angiography the contrast-to-noise ratio was independent of abdominal diameter. Since TAAA patients are often corpulent, MR angiography is the preferred imaging modality for the localization of the Adamkiewicz artery in TAAA patients.

In *chapter VIII*, we have assessed the clinical value of preoperative MR angiography in combination with intraoperative neuromonitoring for the localization of the crucial spinal cord blood supplying trajectory. It was found that this trajectory could either be direct or indirect. Usually the blood supplying trajectory runs from the aorta via the segmental artery (at the level of the Adamkiewicz artery), to the Adamkiewicz artery and finally to the anterior spinal artery and spinal cord. Segmental arteries can become partially or completely occluded during the course of aortic aneurysmal disease. We found in TAAA patients with

atherosclerotic vascular disease, that of the 30 segmental arteries that usually exist between vertebral levels T3 and L5, on average only 9 segmental arteries had an open direct connection with the aorta. In patients with an aortic dissection we found that on average 18 segmental arteries were still open. In cases where the segmental artery at the level of the Adamkiewicz artery was partially or completely occluded, MR angiography was able to visualize an extra-anatomical collateral trajectory that derived from an open segmental artery which originated from a higher or lower vertebral level. It is important to note that in all patients a left heart bypass was used. This provides arterial perfusion caudal to most distally placed aortic clamp. In this manner only the aortic cross-clamped area is not perfused, in contrast to the aortic areas above and below the aortic clamps. When the preoperatively visualized blood supplying trajectory to the spinal cord was not excluded by aortic cross-clamping from aortic circulation, the spinal cord function was unaffected. This implied a negative-predictive value of 100%. On the other hand, when the blood supplying trajectories were excluded from aortic circulation by the aortic clamps, spinal cord function decreased only in 32% of the cases. This meant that in 68% of the cases spinal cord function was not dependent on the preoperatively visualized trajectory. These patients must rely on additional collateral trajectories that maintain spinal cord function. The Adamkiewicz artery could be preoperatively localized in 100% of the patients by MR angiography. However, localization of the Adamkiewicz artery only is apparently not sufficient and collateral supplying trajectories have to be depicted as well. Visualization of these additional

trajectories forms the new goal of preoperative MR angiography.

In *chapter IX*, the clinical utility of MR angiography in patients with suspicion of a vascular spinal cord abnormality is investigated. Localization of the arterial feeders of a vascular abnormality, in advance to catheter angiography (i.e., standard of reference), could reduce the amount of injected contrast material as well as the exposure time to ionizing radiation. In addition, MR angiography may prevent unnecessary invasive catheter angiography in patients without any vascular abnormality. We obtained no false positive or negative findings with MR angiography in 34 patients. The exact vertebral level of an arteriovenous fistula, which is the most common vascular abnormality of the spinal cord, could be localized within one vertebral level in all patients. Considering arteriovenous malformations, MR angiography is at the moment only capable to localize the largest arterial feeder. Catheter angiography is therefore still required to localize possible additional arterial feeders and to classify different subtypes of arteriovenous malformations, which is mandatory for therapy choice. The most important benefit of MR angiography for this patient population is that it allows non-invasive assessment of the presence of absence of a vascular spinal cord abnormality. This enables a more targeted catheter angiography on the one hand or can prevent such unnecessary invasive diagnostic procedures on the other hand.

CONCLUSIONS

1. The MR angiography technique developed is able to consistently and reproducibly visualize and localize the Adamkiewicz artery and its segmental supplier.
2. Differentiation between the Adamkiewicz artery and the outlet vein (i.e., great anterior radiculomedullary vein), which are often simultaneously visualized in the first dynamic phase, is possible by using a two-phase MR angiography approach and signal intensity analysis of these two vessels as a function of time.
3. Complete separation of the Adamkiewicz artery and outlet vein, based on temporal differences in contrast enhancement, can be accomplished with fast dynamic MR angiography.
4. Validation studies using catheter angiography and a postmortem specimen show that MR angiography correctly localizes the Adamkiewicz artery and outlet vein.
5. In TAAA patients MR angiography achieves a higher detection ratio for localizing the Adamkiewicz artery as compared to CT angiography and therefore is the preferred imaging modality for this indication.
6. When the segmental supplier of the Adamkiewicz artery is not excluded from the direct aortic circulation, and thus is located outside the cross-clamped aortic area, the predictive value of MR angiography for an (unaffected) stable intraoperative spinal cord function is 100%.
7. Localization of the Adamkiewicz artery and its segmental supplier are not sufficient to predict intraoperative spinal cord dysfunction in all TAAA patients. Depiction of collateral supplying trajectories is mandatory/necessary to achieve a better risk estimation.
8. The presence and localization of spinal dural arteriovenous fistula can accurately be diagnosed or excluded by MR angiography. This enables more targeted catheter angiography and can prevent such unnecessary invasive diagnostic procedures.
9. MR angiography is capable to localize the largest arterial feeder of an arteriovenous malformation. However, catheter angiography is still required for localizing additional arterial feeders and classification in the different subtypes, which is important for the choice of therapy.

Nederlandse samenvatting

Een aneurysma (bloedvatverwijding) van de thoracale en abdominale aorta (TAAA) is een levensbedreigende aandoening. Indien deze slagader een diameter bereikt van meer dan 5 cm vormt dit een indicatie voor een operatie. Bij deze operatie wordt de aorta afgeklemd en het aneurysmatische deel van de aorta vervangen door een vaatprothese. Een van de meest gevreesde complicaties die kan optreden door de operatie is het ontstaan van paraplegie (dwarslaesie). De oorzaak hiervan is dat de bloedvoorziening naar het ruggenmerg, die direct uit de aorta afkomstig is, gedurende de operatie kan worden onderbroken om de vaatprothese te kunnen inhechten. Om paraplegie te voorkomen is het van belang de bloedtoevoer tijdens de operatie te waarborgen en zonodig te herstellen. De grootste en daarom beschouwd als de belangrijkste voeder van het ruggenmerg is de arterie van Adamkiewicz. Tot op heden was het alleen met invasieve katheter angiografie mogelijk om de Adamkiewicz arterie te lokaliseren. Het gebruik van deze techniek in TAAA patiënten heeft echter twee grote nadelen. Ten eerste is katheter angiografie slechts in staat de arterie van Adamkiewicz in een beperkt aantal TAAA patiënten te lokaliseren (43-86%) en ten tweede kan deze invasieve techniek zelf paraplegie induceren. Daarom wordt preoperatieve beeldvorming met katheter angiografie doorgaans niet toegepast in TAAA patiënten. Recente technische ontwikkelingen hebben het mogelijk gemaakt dat de bloedvaten van het ruggenmerg kunnen worden gevisualiseerd met behulp van niet-invasieve beeldvormende modaliteiten, zoals MR en CT angiografie. Het doel van dit proefschrift was een betrouwbare MR angiografie techniek te ontwikkelen, die in staat zou moeten zijn de

arterie van Adamkiewicz en zijn voedende segmentaal arterie consistent te kunnen lokaliseren. Voorts is de ontwikkelde MR angiografie techniek gevalideerd, vergeleken met CT angiografie en op klinische waarde getoetst.

In *hoofdstuk II*, is bepaald of de ontwikkelde MR angiografie techniek in staat is de arterie van Adamkiewicz en zijn voedende segmentaal arterie te visualiseren en te lokaliseren in patiënten met een thoracale intervertebrale hernia. Voor deze niet vasculair belaste patiënten kan preoperatieve lokalisatie van belang zijn, omdat tijdens de (thoracoscopische) operatie het risico bestaat dat segmentaal arteriën beschadigd raken of bewust opgeofferd worden om bloedingen te voorkomen. Indien dit de segmentale arterie betreft die de arterie van Adamkiewicz voedt, zou dit kunnen leiden tot het optreden van ruggenmerg ischemie en dus paraplegie. MR angiografie bleek in staat de arterie van Adamkiewicz en de voedende segmentaal arterie in alle 8 patiënten te kunnen lokaliseren. Dit leidde ertoe dat de operatieve benadering in een drietal gevallen veranderde van zijde, om de voedende segmentaal arterie van de Adamkiewicz te vermijden. In geen van de 8 geopereerde patiënten trad (postoperatieve) paraplegie op.

In *hoofdstuk III*, worden twee verschillende contrastmiddelen vergeleken met als doel de beeldkwaliteit van MR angiografie te optimaliseren en de reproduceerbaarheid te testen voor het lokaliseren van de arterie van Adamkiewicz in TAAA patiënten. Het gebruik van het nieuwe contrastmiddel (Gadobutrol, 1.0-M) leidde niet tot een verbeterde beeldkwaliteit. Deze studie bevestigde echter wel dat MR angiografie in staat is reproduceerbaar de arterie van Adamkiewicz en de voedende

segmentaal arterie te lokaliseren.

In *hoofdstuk IV*, wordt een nieuwe MR angiografie methode onderzocht om de differentiatie tussen de arterie van Adamkiewicz en de grote anterieure drainerende ruggenmergsvene te verbeteren. De aanleiding voor deze studie was de observatie dat in veel TAAA patiënten de grote anterieure drainerende ruggenmergsvene reeds is aangekleurd in de eerste dynamische fase. Met deze nieuwe MR angiografie techniek kon sneller worden gescand waardoor separatie tussen arterie en vene mogelijk bleek op basis van tijdsverschil in contrast aankleuring. Een nadeel van deze techniek was dat het gebied dat kon worden gescand, waarbij de minimaal benodigde tijdsresolutie niet werd overschreden, beperkt bleef tot alleen het ruggenmerg zelf. Het traject van de voedende segmentaal arterie vanaf de aorta naar de Adamkiewicz arterie kon niet worden gevisualiseerd, hetgeen echter wel van belang is wanneer men deze techniek in de klinische praktijk wil gaan gebruiken. Desondanks was dit de eerste MR angiografie techniek die deze manier van temporele differentiatie bewerkstelligde voor de bloedvaten van het ruggenmerg.

In *hoofdstuk V*, wordt de eerste van twee validatie studies beschreven. In deze studie is de toepassing van MR angiografie voor de lokalisatie van de Adamkiewicz arterie gevalideerd met de gouden standaard katheter angiografie in patiënten met een mogelijke vasculaire afwijking van het ruggenmerg. MR angiografie bleek de arterie van Adamkiewicz correct te kunnen lokaliseren in 14 van de 15 patiënten. Daarnaast was MR angiografie ook in staat de grote anterieure drainerende ruggenmergsvene te detecteren. Met katheter angiografie daaren-

tegen kon deze vene in geen enkele patiënt worden gevisualiseerd. Door de acquisitie van twee direct opeenvolgende dynamische fasen en signaal intensiteit analyse van de arterie en vene was het mogelijk deze vaten betrouwbaar van elkaar te onderscheiden.

In *hoofdstuk VI*, wordt de tweede validatie studie beschreven. In deze studie is het ruggenmerg van een geopereerde en helaas overleden TAAA patiënt vrij geprepareerd om het verloop van bloedvaten te vergelijken met MR angiografie. De preoperatieve twee-fasen MR angiografie kon de arterie van Adamkiewicz lokaliseren en onderscheiden van de grote anterieure drainerende ruggenmergsvene. Zowel de lokalisatie als configuratie van deze twee ruggenmergsvaten bleken volledig overeen te komen met het vrij geprepareerde ruggenmerg.

In *hoofdstuk VII*, worden Computer Tomografische (CT) angiografie en MR angiografie met elkaar vergeleken om te bepalen welke van de twee beeldvormende modaliteiten het meest geschikt is voor de lokalisatie van de Adamkiewicz arterie in TAAA patiënten. Naast lokalisatie werd ook de beeldkwaliteit vergeleken. Uiteindelijk bleek dat twee observatoren de arterie van Adamkiewicz gemiddeld in 97% van 39 geïnccludeerde patiënten konden lokaliseren met MR angiografie en slechts in 71% met CT angiografie. De algehele beeldkwaliteit werd eveneens beter beoordeeld voor MR angiografie. De belangrijkste verklaring waarom MR angiografie betere resultaten gaf was dat een gunstigere contrast ruis verhouding werd bereikt voor de Adamkiewicz artery ten opzichte van zijn directe omgeving. Verder bleek de contrast ruis verhouding voor CT angiografie af te nemen met toenemende buikomvang. Voor MR angiografie bleek een

toename in buikomvang geen invloed te hebben op de contrast ruis verhouding. Aangezien TAAA patiënten vaak corpulent zijn, is MR angiografie de meest geschikte beeldvormende modaliteit voor de visualisatie van de Adamkiewicz in TAAA patiënten.

In *hoofdstuk VIII*, wordt de klinische waarde van preoperatieve MR angiografie onderzocht voor het lokaliseren van het cruciale bloedtoevoerende traject naar het ruggenmerg in combinatie met intra-operatieve neuromonitoring in de vorm van motor evoked potentials (MEPs). De bloedtoevoer naar het ruggenmerg bleek direct en indirect te kunnen verlopen. Normaliter verloopt het traject direct vanuit de aorta via de segmentaal arterie, op het niveau van de Adamkiewicz arterie, naar de Adamkiewicz arterie en uiteindelijk naar de arterie spinalis anterior en het ruggenmerg. Segmentaal arteriën kunnen echter in de loop van het ziekteproces van de aorta partieel of volledig geoccludeerd raken. In TAAA patiënten met atherosclerotisch vaatlijden bleek dat er van de 30 segmentaal arteriën, die normaal gesproken aanwezig zijn tussen het wervelniveau T3 en L5, gemiddeld nog maar 9 waren die een open (directe) verbinding met de aorta hadden. In patiënten met een dissectie daarentegen werden gemiddeld 18 open segmentaal arteriën gevonden. In die patiënten, waarbij de segmentaal arterie op het niveau van de Adamkiewicz arterie partieel of volledig was geoccludeerd, kon MR angiografie een extra-anatomisch traject visualiseren waarbij de Adamkiewicz arterie via een hoger of lager gelegen open segmentaal en intersegmentale connecties werd voorzien van bloed. Wanneer het met MR angiografie preoperatief gelokaliseerde

bloedtoevoerende traject niet werd uitgekamd bleef de ruggenmergsfunctie intact. Dit betekende dat de negatief voorspellende waarde 100% was. Anderzijds wanneer de bloedtoevoerende route wel werd afgesloten door het afklemmen van een deel van de aorta, daalde de ruggenmergsfunctie in 32% van de patiënten, hetgeen betekende dat de ruggenmergsfunctie in 68% van de patiënten niet afhankelijk was van het preoperatief gelokaliseerde traject. In deze patiënten moest er dus een additioneel (collateraal) traject bestaan dat de ruggenmergsfunctie in stand hield. MR angiografie bleek in 100% van de patiënten in staat de Adamkiewicz arterie te lokaliseren. Kennelijk is het afbeelden van de Adamkiewicz arterie op zich dus niet voldoende en dient ook het toevoerende collaterale traject bepaald te worden. Visualisatie van dit additionele traject vormt het nieuwe speerpunt in preoperatieve MR angiografie.

In *hoofdstuk IX*, wordt de klinische toegevoegde waarde van MR angiografie voor patiënten met een verdenking op een vasculaire afwijking van het ruggenmerg beschreven. Lokalisatie van de arteriële voeders naar de vasculaire afwijking voorafgaand aan de gouden standaard, katheter angiografie, zou potentieel een reductie in de hoeveelheid gebruikt contrastmiddel en blootstelling aan ioniserende straling kunnen betekenen. Daarnaast zouden mogelijk ook onnodige diagnostische katheter angiografische onderzoeken kunnen worden voorkomen. Voor de detectie van vasculaire ruggenmerg afwijkingen werden in geen van 34 patiënten fout negatieve of fout positieve resultaten verkregen met MR angiografie. Het exacte wervelniveau van een arterioveneuze fistel, welke verreweg de meest voorkomende

vasculaire afwijking is van het ruggenmerg, kon tot op een nauwkeurigheid van één wervelniveau in alle patiënten worden gelokaliseerd. Voor arterioveneuze malformaties is MR angiografie op dit moment alleen in staat de grootste arteriële voeder te detecteren. Voor de lokalisatie van additionele voeders en subclassificatie van de verschillende typen arterioveneuze malformaties, wat van belang is voor de therapiekeuze, is nog steeds katheter angiografie noodzakelijk. Het voordeel van MR angiografie is dat nu op een non-invasieve wijze de aanwezigheid van een vasculaire laesie kan worden aangetoond of worden uitgesloten. Hierdoor kan de katheter angiografie meer gericht worden uitgevoerd en worden onnodige invasieve diagnostische procedures voorkomen.

CONCLUSIES

1. De ontwikkelde MR angiografie techniek is in staat consistent en reproduceerbaar de arterie van Adamkiewicz en zijn voedende segmentaal arterie te visualiseren en te lokaliseren.
2. Differentiatie tussen de arterie van Adamkiewicz en de grote anterieure drainerende ruggenmergsvene, welke vaak tegelijkertijd worden afgebeeld in de eerste fase, is mogelijk door gebruik te maken van twee-fasen MR angiografie en signaal intensiteit analyse van deze twee vaten als functie van de tijd.
3. Volledige separatie van de Adamkiewicz arterie en de grote anterieure drainerende ruggenmergsvene kan worden bereikt met snelle dynamische MR angiografie op basis van tijdsverschil in aankleuring van deze twee vaten.
4. Validatie studies verricht met katheter angiografie en een postmortem specimen tonen aan dat MR angiografie correct de arterie van Adamkiewicz en de grote anterieure drainerende ruggenmergsvene kan lokaliseren.
5. In TAAA patiënten heeft MR angiografie een hogere detectie ratio voor het lokaliseren van de arterie van Adamkiewicz dan CT angiografie en is daarom de te prefereren beeldvormende modaliteit voor deze indicatie.
6. Wanneer de voedende segmentaal arterie van de Adamkiewicz arterie tijdens de operatie niet wordt afgesloten van de directe circulatie uit de aorta, en zich dus buiten de aortale klemposities bevindt, is de voorspellende waarde van MR angiografie voor een stabiele intra-operatieve ruggenmergsfunctie 100%.
7. Lokalisatie van de Adamkiewicz arterie en zijn voedende segmentaal arterie zijn niet toereikend voor het voorspellen van een daling van de intra-operatieve ruggenmergsfunctie in alle TAAA patiënten. Visualisatie van collaterale bloedvoorzienende trajecten lijkt nodig voor een betere risico inschatting van de kans op ruggenmergsfunctie dalingen.
8. Arterioveneuze fistels kunnen accuraat worden gelokaliseerd of uitgesloten met MR angiografie. Hierdoor kan de katheter angiografie meer gericht en dus sneller worden uitgevoerd en worden onnodige invasieve diagnostische procedures voorkomen.
9. MR angiografie kan de grootste voeder van een arterioveneuze malformatie lokaliseren. Katheter angiografie is echter nog steeds nodig voor de lokalisatie van additionele voeders en subclassificatie van de verschillende typen arterioveneuze malformaties, hetgeen van belang is voor de therapiekeuze.