

# Kwaliteitsdocument Cardiale MRI

## Inhoud

### 1. Inleiding

“ 3.” Protocol en technische achtergrond

### 1. Inleiding

Door de snelle ontwikkelingen in de afgelopen jaren verplaatst de niet-invasieve cardiale beeldvorming zich van de wetenschapsfase naar de klinische fase. De cardioloog en radioloog zijn gebaat bij een goede samenwerking om tot een kwalitatief goed eindresultaat van het cardiale CT en MR onderzoek te komen. Om de kwaliteit van deze onderzoeken te borgen zijn protocollen noodzakelijk m.b.t. uitvoering van het onderzoek. Voor u ligt de eerste versie van het kwaliteitsdocument cardiale MRI. Dit document is een vertrekpunt voor nadere uitwerking van diagnostische algoritmen.

Commissie kwaliteit Nederlandse Vereniging voor Cardiologie

Sectie Cardiovasculaire radiologie Nederlandse Vereniging voor Radiologie

Utrecht en Vught, Februari 2012

## **“3.” Protocol en technische achtergrond**

### **Introductie**

### **Indicaties**

- Hartfalen (cardiomyopathie, myocarditis, infiltratieve afwijkingen)
- Ischemie en vitaliteit
- Kleplijden
- Congenitale hartafwijkingen
- Pericard afwijkingen
- Grote vaten
- Cardiale massa

### **Veiligheidsaspecten**

### **Organisatie**

- Procedures
- Faciliteiten
- Verslaglegging

### **Referenties**

## Introductie

Magnetic resonance imaging (MRI) is een beeldvormende modaliteit met unieke eigenschappen. Structuren en objecten kunnen in iedere richting worden afgebeeld met een uitstekende beeldkwaliteit. Daarnaast is het mogelijk om met behulp van deze techniek niet-invasief (zachte-) weefsels te typeren. MRI is mede hierdoor niet alleen een belangrijke beeldvormende modaliteit voor de evaluatie van het centrale zenuwstelsel, tumoren en musculo-skeletale afwijkingen, maar wordt ook steeds belangrijker voor de evaluatie van cardiale afwijkingen.

Cardiale MRI (CMR) biedt de mogelijkheid om relatief eenvoudig, accuraat hartfunctie te kwantificeren<sup>1,2</sup>, gebieden met littekenweefsel te identificeren<sup>3</sup> en myocardperfusie en vitaliteit te beoordelen<sup>4</sup>. Daarnaast is de techniek zeer geschikt om anatomie te beoordelen (congenitale hartafwijkingen)<sup>5</sup> en grote vaten af te beelden<sup>6</sup>.

Doordat MRI steeds meer mogelijkheden biedt voor cardiovasculair onderzoek en doordat scanners op grotere schaal beschikbaar komen, is het routinematige gebruik van cardiale MRI (CMR) in de dagelijkse klinische praktijk sterk toegenomen. Deze ontwikkeling geeft aanleiding tot een groeiende behoefte om een aantal zaken betreffende cardiale MRI eenduidig vast te leggen in een kwaliteitsdocument.

Dit eerste Nederlandse cardiale MRI kwaliteitsdocument is mede gebaseerd op een internationaal consensus panel report<sup>7</sup>, joint position statements<sup>8,9</sup> gepubliceerde appropriateness criteria<sup>10</sup>, verschillende state-of-the-art papers en de in 2008 gepubliceerde compacte (Europese) richtlijnen en specifieke scan protocollen voor klinisch gebruik van cardiale MRI<sup>11</sup>.

## Indicaties

Een recent gepubliceerde grote Europese registry<sup>12</sup> toonde dat het overgrote deel van CMR onderzoek wordt uitgevoerd op een 1.5 T scanner.

Meest voorkomende indicaties voor CMR bij deze registry zijn:

Cardiomyopathie / myocarditis:	ruim 30%
Verdenking coronaire hartziekten / aanwezigheid ischemie:	30%
Vitaliteits onderzoek:	15%
Kleplijden:	5%
Aorta pathologie	3%

Afhankelijk van lokaal aanwezige expertise, type scanner en patiëntenpopulatie kunnen indicaties voor CMR en uitgevoerde onderzoek lokaal verschillen.

## Hartfalen

CMR onderzoek in het kader van hartfalen (etiologie, therapiestratificatie, prognose) is overwegend gebaseerd op het bepalen van (globale) cardiale functie parameters (doormiddel van SSFP sequentie) in combinatie met weefselkarakterisering (LGE techniek).

## *Cardiomyopathieën*

### *Hypertrofische cardiomyopathie (HCM)*

Asymmetrische septum hypertrofie is het meest in het oog springende kenmerk van HCM maar een grote variatie aan verschijningsvormen is mogelijk. CMR is bij uitstek geschikt om de heterogeniteit in verschijningsvormen (postero-laterale of apicale hypertrofie, afwijkingen van de papillairspieren [antero-apicale verplaatsing of *double bifid* papillairspieren]) te visualiseren. CMR is ook in staat om meer nauwkeurig en reproduceerbaar wanddikte te beoordelen dan echocardiografie<sup>16</sup>. Dit laatste is klinisch relevant aangezien een wanddikte >30 mm belangrijke prognostische betekenis heeft.

Doormiddel van LGE kunnen focale gebieden met aankleuring in HCM patiënten worden geïdentificeerd. De aanwezigheid van gebieden met focale aankleuring is gerelateerd aan de kans op plotse dood, het ontwikkelen van linker ventrikel (LV) dilatatie (burn-out HCM) en hartfalen. De aanwezigheid van diffuse fibrose is met behulp van deze techniek echter veel minder goed aan te tonen. In 4% van de patiënten die zich initieel presenteren met HCM blijkt sprake van de ziekte van Fabry. LGE CMR maakt het mogelijk deze patiënten te identificeren aan de hand van ongebruikelijke aankleuring in de laterale wand. Percutane septale alcohol ablatie procedures laten zich goed evalueren doormiddel van de LGE techniek<sup>17</sup>.

### *Aritmogene rechter ventrikel cardiomyopathie (ARVC)*

ARVC is een erfelijke ziekte die gekarakteriseerd wordt door dilatatie en disfunctie van de rechter ventrikel (RV) waarbij myocardweefsel wordt vervangen door fibromateus- en vet weefsel. De LV kan echter ook bij dit proces betrokken zijn. Het stellen van de diagnose ARVC is gebaseerd op zowel functionele alsook morfologische kenmerken<sup>18</sup>. CMR is beter dan andere beeldvormende technieken in staat om de rechter ventrikel af te beelden, en is tevens in staat weefsel te typeren. Interpretatie van beelden kan echter zeer lastig zijn, mede vanwege de grotere natuurlijke variatie in verschijningsvorm van de RV.

Morfologische kenmerken: focale wandverdunding, focale hypertrofie, trabeculaire hypertrofie en dissarray, hypertrofie van de moderator band, dilatatie van de RV outflow tract en vette infiltratie van het myocard.

Functionele kenmerken: regionale wandbewegingsstoornissen, focale aneurysmata, globale RV dilatatie en disfunctie.

- Major criteria**
- gelokaliseerde aneurysmata
  - ernstige globale / segmentele dilatatie van de RV
  - globale systolische disfunctie
- Minor criteria:**
- milde globale/ segmentele RV dilatatie
  - regionale verschillen in contractie
  - globale diastolische disfunctie

Praktisch gezien dient tijdens het CMR onderzoek eerst gericht te worden op functionele afwijkingen van (met name) de RV vrije wand (cine imaging). Hierna kan middels T1-gewogen opnamen zonder en met vetsaturatie gezocht worden naar aanwijzingen voor vette infiltratie. Tot slot kan doormiddel van LGE opnamen beoordeeld/bevestigd worden of er focale veranderingen in samenstelling van het myocard (vette vervanging/ fibrose) is opgetreden.

Goede beoordeling en interpretatie van (focale) functionele afwijkingen kan alleen door ervaren onderzoekers worden uitgevoerd. In reeds genetisch typeerde patiënten heeft CMR een sensitiviteit van 96% en een specificiteit van 78%. In het algemeen is de specificiteit in relatie tot de Task Force criteria echter laag (29%).

Wel is gesuggereerd dat CMR patiënten met ARVC mogelijk in een vroeger stadium kan identificeren dan de Task Force criteria, die hier juist relatief meer ongevoelig voor zijn<sup>19</sup>. Recent zijn wijzigingen in de ARVC criteria voorgesteld om de specificiteit te verhogen<sup>20</sup>.

Voor CMR zijn de nieuwe criteria als volgt:

Regionale RV akinesie of dyskinesie of dissynchrone contractie met 1 van de volgende kenmerken:

BSA gecorrigeerde RV einddiastolische volume van  $\geq 110$  ml/m<sup>2</sup> voor mannen /  $\geq 100$  ml/m<sup>2</sup> voor vrouwen (**major**) of  $\geq 100$  ml/m<sup>2</sup> voor mannen /  $\geq 90$  ml/m<sup>2</sup> voor vrouwen (**minor**)

of

RV ejectie fractie  $\leq 40\%$  (**major**) of RV EF  $> 40\%$  tot  $\leq 45\%$  (**minor**).

#### *Dilaterende cardiomyopathie (DCM)*

Differentiatie tussen een ischemisch- en niet-ischemisch oorzaak voor DCM is klinisch van groot belang. Het aantonen van normale coronair arteriën bij coronair angiografie is hiervoor niet voldoende. CMR heeft een hoge sensitiviteit (81-100%) voor de detectie van coronairlijden in patiënten met een (onbegrepen) slechte ventrikel functie.

De LGE techniek speelt een belangrijke rol bij nadere typering van de etiologie van DCM. Tot 13% van de patiënten met DCM en normale coronairarteriën blij op basis van de LGE beelden (subendocardiale of transmurale aankleuring in specifiek stroomgebied) toch eerder een myocardinfarct te hebben doorgemaakt<sup>21</sup>. In 10-26% wordt er een focaal patroon van aankleuring waargenomen dat niet compatibel is met een doorgemaakt myocardinfarct. Deze gebieden met atypische aankleuring corresponderen in de regel echter wel met focale fibrose en kunnen richting gevend zijn voor de etiologie van de DCM.

#### *Stapelings ziekten*

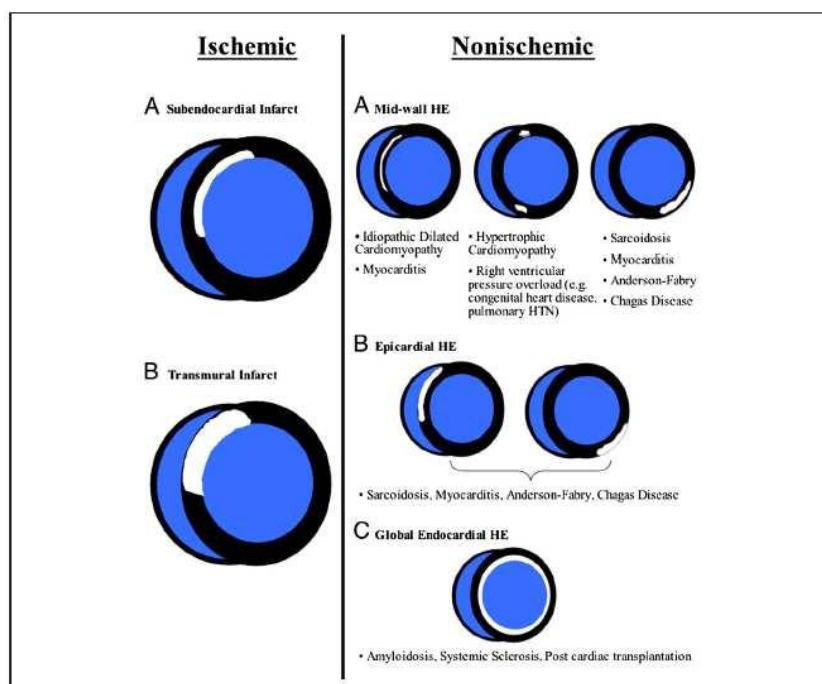
Amyloidose: CMR maakt het mogelijk om karakteristieke structurele afwijkingen (concentrische hypertrofie, verdikt inter-atriale septum en bi-atriale dilatatie), functionele afwijkingen (verminderde contractiliteit), en accumulatie van amyloid passend bij cardiale betrokkenheid bij amyloidose (circumferentiele subendocardiale

aankleuring) goed af te beelden. Met name het typische aankleuringspatroon heeft een hoge sensitiviteit (80%) en specificiteit (94%)<sup>22</sup>.

Sarcoidose: Naast het afbeelden van typische morfologische kenmerken zoals een dun septum, bi-ventriculaire dilatatie, systolische disfunctie en/of pericardeffusie kan LGE van toegevoegde waarde zijn bij verdenking op cardiale betrokkenheid bij sarcoidose. Vaak wordt bij deze patiënten een atypisch patroon van aankleuring in het midden van het myocard of epicardiaal gezien<sup>23</sup>. Soms wordt een aankleuringpatroon waargenomen dat wel compatibel is met een doorgemaakt infarct. De LGE beelden kunnen ook worden gebruikt om de opbrengst van een eventuele biopsie te vergroten.

T2 gewogen opnamen kunnen gebruikt worden om de mate van activiteit van het ziekteproces te beoordelen. Gebieden met oedeemvorming geassocieerd met inflammatie en granulomateuze laesies kunnen hiermee geïdentificeerd worden.

### **Patronen van aankleuring bij ischemische en non-ischemische cardiomyopathieën.**



Adapted from Karamitsos TD et al.<sup>24</sup>

## Myocarditis

Myocarditis is een ontsteking van het myocard, gaat gepaard met een geactiveerde systemische immuunrespons, vorming van oedeem, beschadiging en destructie van myocyten en productie van auto-antilichamen. CMR is de primaire beeldvormende modaliteit voor niet-invasieve evaluatie van (symptomatische) patiënten bij wie de verdenking op myocarditis bestaat.

### *Oedeem*

T2 gewogen opnamen zijn gevoelig voor oedeem (oedemateus weefsel geeft een heldere signaal intensiteit). *Triple inversion recovery spin echo pulse* sequenties met inversie pulsen voor suppressie van zowel vet als bloed geven een groot contrast tussen regionaal oedeem en normaal myocard. *Double inversion recovery* sequenties hebben echter een beteresignaal-ruis verhouding. Vaak is oedeemvorming regionaal maar soms kan dit ook globaal zijn. In dit laatste geval kan een kwantitatieve analyse van signaal intensiteit van toegevoegde waarde zijn.

Korte-as opnamen geven in het algemeen een meer robuuste beeldkwaliteit. Hierbij moet worden opgemerkt dat apicale korte-as opnamen soms minder goed kunnen worden beoordeeld t.g.v. artefacten als gevolg van signaal afkomstig van intraventriculair bloed.

### *Hyperemie en capillaire lek (vroege aankleuring met Gadolinium )*

Contrast-enhanced fast spin-echo T1 gewogen opnamen tijdens de vroege fase (eerste minuten) na contrastinjectie maken het mogelijk om een globaal toegenomen volume van Gadolinium distributie te detecteren als uiting van hyperemie bij inflammatie. Deze sequenties zijn echter gevoelig voor een variërend hartritme en variatie in het ademhalingspatroon (zeer constant ademhaling ritme en vasthouden van de ademhaling is dus noodzakelijk).

### *Necrose en fibrose*

De (late) gevolgen van myocarditis (celdestructie en vorming van fibrose) kan met hoge specificiteit door de LGE techniek worden gevisualiseerd. LGE heeft echter niet (dezelfde) constante sensitiviteit voor actieve en chronische ontsteking. Voor actieve myocarditis is de sensitiviteit van LGE 84%, voor chronische myocarditis 44%. LGE is minder gevoelig voor myocarditis die gepaard gaat met (zeer) beperkte of juist niet-focale (globale) destructie van myocyten.

T2 gewogen opnamen in combinatie met opnamen van vroege- en late Gadolinium-aankleuring geven de beste over-all diagnostische accuracy, waarbij tenminste 2 CMR criteria voor myocarditis positief moeten zijn.

	Sens(%)	Spec(%)	Accuracy	PPV(%)	NPV(%)
T2+LGE	25	95	56	86	50
T2 en/of LGE	60	66	62	79	43
ledere 1 uit 3	88	48	70	68	76
ledere 2 uit 3	67	91	78	91	69



***Samenvattend worden de volgende diagnostische CMR criteria voorgesteld bij de klinische verdenking op myocarditis<sup>25</sup>:***

Regionaal of globaal verhoogde signaalintensiteit op T2-gewogen opnamen  
Globaal verhoogde myocardiale signaalintensiteit t.o.v. skeletspier vroeg na toediening van Gadolinium op T1-gewogen opnamen  
Aanwezigheid van tenminste 1 focale laesie met late aankleuring op LGE beelden (niet compatibel met perfusie gebied van coronairarterie)

Voor het stellen van de diagnose dienen tenminste 2 van de 3 criteria positief te zijn.

## Ischemie en vitaliteit

### *Coronair arteriën*

Bij de huidige stand van de techniek, legt CMR het af tegen CT en conventionele angiografie voor het visualiseren van coronair arteriën. Afbeelden van coronair arteriën is dan ook geen standaard toepassing van CMR. Betrouwbaar beoordelen van de aanwezigheid van coronair stenoses gaat gepaard met een sensitiviteit 50-94% en specificiteit 50-100%.

Visualiseren en beoordelen van coronair arteriën middels CMR wordt dan ook niet aanbevolen, behoudens voor identificatie van coronairanomalieën<sup>7</sup>.

### *Ischemie*

Ischemie kan doormiddel van adenosine stress- en rust-perfusie onderzoek onderzocht worden of doormiddel van dobutamine stress onderzoek.

#### *Adenosine stress perfusie*

Adenosine veroorzaakt onder andere endotheel-afhankelijke relaxatie van glad spierweefsel in de arteriewand. Dilatatatie treedt alleen op in normaal functionerende arteriële segmenten. In segmenten waar endotheel door plaque vorming gescheiden wordt van de media treedt niet tot nauwelijks dilatatatie op. In een normaal functionerende arterie zal onder invloed van dilatatatie de flow tot een factor 5 toenemen terwijl dit veel minder zal zijn bij een aangetast vat. Tijdens infusie met adenosine (maximale vasodilatatatie bereikt na 180 sec infusie) kan Gadolinium worden toegediend. Bij een eerste passage ("first-pass") zullen contrastverschillen optreden tussen segmenten met goed functionerende arteriën (helder wit) en segmenten die gevoed worden door een (belangrijk) atherosclerotisch vat (nauwelijks tot geen aankleuring). Dit kan visueel direct goed beoordeeld worden.

Adenosine heeft een korte halfwaarde tijd (10 sec). Cafeïne-houdende producten dienen vanaf 24 uur voor toediening van adenosine niet ingenomen te worden. Contra-indicaties voor gebruik van adenosine zijn asthma en dipyridamol gebruik. Anti-ischemische medicatie dient idealiter 4 dagen voor het onderzoek gestaakt te worden.

Adenosine first-pass perfusie-CMR heeft een goede correlatie met bevindingen bij conventionele angiografie (sensitiviteit 91%, specificiteit 81%)<sup>26</sup> en heeft een (tenminste) vergelijkbare diagnostische opbrengst als SPECT (MR IMPACT study)<sup>27</sup>.

### *Dobutamine stress-CMR*

In de klinische praktijk wordt meer gebruik gemaakt van adenosine-perfusie onderzoek dan van dobutamine-stress onderzoek (21 vs. 11%). Waarschijnlijk is dit mede het gevolg van het feit dat toepassing van dobutamine stress-CMR meer bewerkelijk is en in de regel meer tijd vraagt dan onderzoek met adenosine. Bij dobutamine stress wordt het optreden van systolisch functieverlies bestudeerd onder invloed van oplopende dosering dobutamine. Het optreden van hypokinesie, akinesie of zelfs dyskinesie in een myocardsegment tijdens dobutamine infusie wordt beschouwd als een uiting van ischemie .

Vorbereidingen voor een dobutamine stress onderzoek zijn identiek aan dobutamine stress onderzoek verricht middels een andere beeldvormende modaliteit. Alle anti-ischemische medicatie dient bij voorkeur 4 dagen voorafgaand aan het onderzoek (tijdelijk) gestaakt te worden.

Toepassing van dobutamine stress CMR is ondanks de mogelijke inductie van ventriculaire ritmestoornissen, extra-systolie, misselijkheid en/of braken, veilig gebleken. Bij 1000 opeenvolgende stress-CMR onderzoeken werd in 6.4% van de gevallen bijwerkingen gerapporteerd en slechts in 0.5% traden ventriculaire ritmestoornissen op<sup>28</sup>. In een studie met 400 patiënten werd slechts in 4% cardiale bijwerkingen gerapporteerd waaronder 1 patiënt met ventrikelfibrilleren<sup>29</sup>.

Tijdens het onderzoek dient het ritme bewaakt te worden en de beelden direct te beoordelen op veranderingen in segmentele functie. Reanimatie faciliteiten (crash-car, defibrillator) dienen in de nabijheid van de scanner (bijvoorbeeld de MRI voorbereidingsruimte) te staan.

Dobutamine heeft een sensitiviteit van 89% en een specificiteit van 80% voor de detectie van >50% stenosering terwijl adenosine perfusie een sensitiviteit en specificiteit heeft van respectievelijk 91% en 62%<sup>30</sup>. Door toepassing van tissue tagging kan de detectie van een significante coronairarterie stenose met dobutamine verder verbeterd worden<sup>31</sup>.

Dobutamine stress-CMR kan van toegevoegde waarde zijn bij patiënten met een pre-existente slechte linker ventrikelfunctie. Low-dose dobutamine onderzoek maakt het dan mogelijk om vitaliteit te beoordelen (tijdelijk [partieel] functie herstel), terwijl high-dose dobutamine ischemie kan tonen.

Het is belangrijk om te realiseren dat de sensitiviteit en specificiteit van adenosine-perfusie en dobutamine-stress technieken mede bepaald worden door lokale expertise, beeldkwaliteit, gebruikte pulssequenties, maar ook afhankelijk zijn van de gebruikte scanner.

## Vitaliteit

### LGE

Doormiddel van de LGE techniek kan de aanwezigheid, lokalisatie en uitgebreidheid van fibrose / infarctweefsel worden vastgesteld. Door de hoge spatiële resolutie kunnen ook kleine (subendocardiale) infarcten geïdentificeerd worden. Er bestaat een omgekeerde relatie tussen de transmurale uitgebreidheid van het gebied met aankleuring en functioneel herstel na revascularisatie<sup>32</sup>. Zowel in het acute infarct alsook in het chronische infarct, kan herstel van functie worden voorspeld, zonder dat de patiënt een stresstest hoeft te ondergaan. Dit maakt deze techniek zeer geschikt om routinematig in de dagelijkse klinische praktijk in te passen.

De combinatie van T2-gewogen opnamen en LGE opnamen maakt het mogelijk om te differentiëren tussen een acuut en chronisch infarct. Een acuut infarct gaat gepaard met oedeemvorming en zal dus in tegenstelling tot een chronisch infarct, een hoge signaal intensiteit op T2-gewogen opnamen geven. Conventionele turbo spin-echo sequenties voor identificatie van oedeem worden in grote mate gehinderd door artefacten. Nieuwe, T2-gewogen technieken hebben dit nadeel veel minder waardoor de nauwkeurigheid voor het afbeelden van oedeem is toegenomen.

### Dobutamine stress CMR

Hoewel het merendeel van onderzoek naar vitaliteit doormiddel van LGE plaatsvindt kan ook met behulp van low-dose dobutamine vitaliteitsonderzoek worden uitgevoerd indien er preëxistente (globale of segmentele) wandbewegingsstoornissen aanwezig zijn en een wanddikte  $\geq 5$  mm.

Indien verbetering van functie optreedt in een hypo- of akinetisch myocardsegment bij een lage dosering dobutamine wordt dit segment als vitaal beschouwd. Wanneer in datzelfde segment bij hoge(re) dosering dobutamine wederom hypo- of akinesie optreedt ('bifasische respons' lees: ischemie) bestaat er een grote kans dat revascularisatie van betreffende segment tot persisterende functieverbetering zal leiden.

Toepassing van tagging naast cine-imaging verbetert de beoordeelbaarheid van de beelden en leidt tot een betere sensitiviteit en specificiteit.

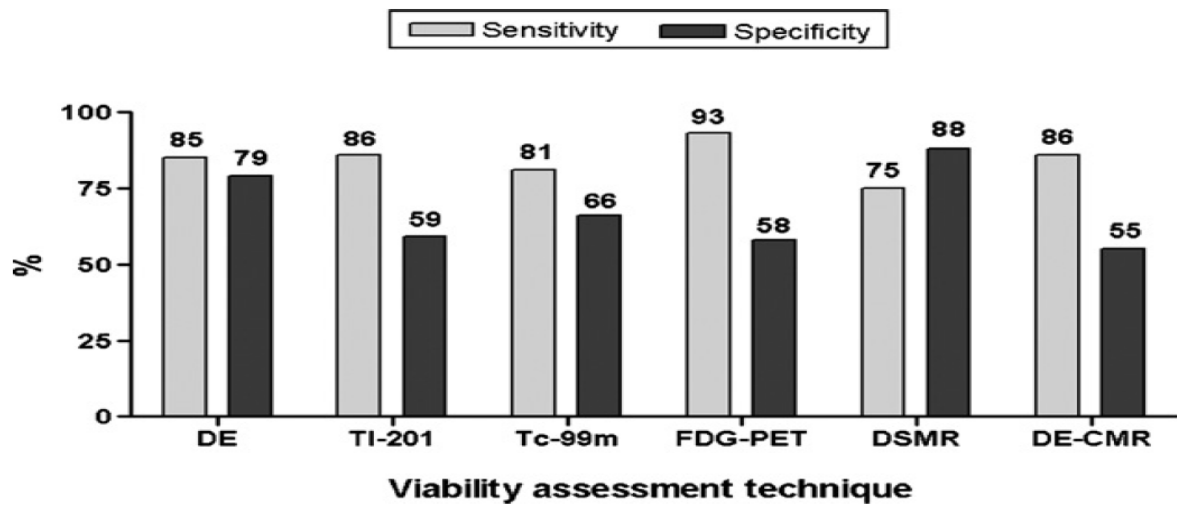
### Dobutamine stress-CMR

	Sens(%)	Spec(%)
Cine imaging	75	88
Tagging	90	93

Adapted from Tomlinson et al<sup>33</sup>.

De combinatie van low-dose en high-dose dobutamine, waarbij niet alleen cine opnamen maar ook tagging opnamen worden gemaakt, direct gevolgd door stress-perfusie opnamen tijdens high-dose dobutamine en tot slot LGE opnamen heeft waarschijnlijk de grootste diagnostische opbrengst.

**Evaluatie van vitaliteit: sensitiviteit en specificiteit van verschillende beeldvormende modaliteiten.**



Adapted from Kaandorp et al<sup>34</sup>.

## Kleplijden

Echocardiografie is de aangewezen techniek voor evaluatie van kleppathologie. Transoesofageale echocardiografie is meer geschikt dan CMR om klepmorfologie en kleine, snel en irregulair bewegende structuren zoals vegetaties te beoordelen. Alleen bij een slecht acoustisch window kan CMR een complementaire rol spelen. CMR maakt het wel mogelijk om doormiddel van flowmetingen relatief eenvoudig de functionele ernst van (meervoudige) kleppathologie te evalueren en nauwkeurig te vervolgen, inclusief effect op ventrikel functie en dimensies.

## Congenitale hartafwijkingen

Bij evaluatie van (complexe) congenitale hartafwijkingen speelt CMR een belangrijke rol<sup>5,35-37</sup>. Toepassing van CMR kan de noodzaak tot een diagnostische catheterisatie, de duur en de risico's hiervan beperken. Bij jonge, en/of ernstig zieke kinderen wordt CMR meestal in aanvulling gebruikt op echocardiografisch onderzoek. Dit vanwege de noodzaak tot sedatie en monitoring van jonge kinderen. Bij oudere kinderen en volwassenen is CMR de eerste-lijns techniek voor evaluatie van (complexe) (postoperatieve) congenitale cardiale problematiek. Gezien de specifieke congenitale cardiale problematiek wordt geadviseerd het onderzoek bij voorkeur uit te voeren in een centrum gespecialiseerd in congenitale hartziekten of in een CMR expert centrum.

***Een compleet CMR onderzoek in het kader van (de verdenking op) een congenitale hartafwijking dient tenminste de volgende onderdelen te bevatten:***

Anatomische (spin-echo) opnamen in transversale en tenminste sagitale of coronale richting.

Functie opnamen (SSFP sequentie) in korte-as richting voor bepaling van ventrikel functie, volumes en massa, aangevuld met lang-as opnamen van rechter- en/of linker ventrikel afhankelijk van indicatie.

Op indicatie metingen van flowsnelheid en -volume doormiddel van velocity mapping om shuntgrootte, gradiënt en/of regurgiterend volume te kunnen bepalen.

MRA opnamen met behulp van gadolinium van aorta, pulmonaal arteriën, en venen.

## Pericard afwijkingen

Zowel CMR alsook computertomografie (CT) zijn geschikt om anatomische afwijkingen van het pericard (verdikking, effusie, cysteuze afwijkingen) te beoordelen<sup>38,39</sup>. Hierbij is CT beter in staat om calcificaties te detecteren. CMR biedt daarentegen de mogelijkheid om functionele afwijkingen geassocieerd met een pericard afwijking, te evalueren.

Gradiënt echo en SSFP tonen beide pericardeffusie met een verhoogde signaal intensiteit. Spin echo opnamen zijn geschikt om de typische anatomische afwijkingen bij een pericarditis constrictiva (smalle en lange RV, vergroot RA en gedilateerde vena cava inferior (VCI), stase van bloed in de atria en verdikt pericard) te visualiseren. Tagging maakt het mogelijk om gebieden met adhesies te detecteren.

Flowmetingen ter hoogte van de inmonding van de VCI of vena cava superior kunnen behulpzaam zijn bij de functionele evaluatie van pericard afwijkingen.

Pericardcysten hebben een lage signaalintensiteit op T1-gewogen opnamen en een hoge signaalintensiteit op T2-gewogen opnamen. De signaalintensiteit van cysten is meestal ook hoog op gradiëntecho opnamen.



## Grote vaten

CMR is naast CT zeer geschikt om grote vaten te evalueren<sup>6,40</sup>. Doormiddel van MRA opnamen kan het vasculaire lumen worden afgebeeld. In aanvulling hierop kan de vaatwand worden beoordeeld (T1 en T2 opnamen) op aanwezigheid van hematoom/thrombus, inflammatie en/of atherosclerotische plaquevorming. Bloedflow kan gemeten worden met behulp van velocity mapping.

### *Aortadissectie*

CMR kan uitstekend worden toegepast voor het diagnosticeren van een aorta dissectie<sup>41-43</sup> en (post-chirurgische) follow-up hiervan<sup>44</sup>. Niet alleen kan de dissectie flap goed worden gevisualiseerd maar ook kan een eventueel aanwezig aortaklep insufficiëntie worden gedetecteerd en pericardvocht worden aangetoond.

Ook een intramuraal hematoom en penetrerend ulcus van de aortawand kan goed geëvalueerd en vervolgd worden met behulp van CMR.

### *Marfan*

CMR is de eerst aangewezen techniek voor follow-up van de aorta bij het syndroom van Marfan<sup>45</sup>.

### ***Klasse I indicaties voor CMR onderzoek (diagnose en follow-up) van grote vaten zijn:***

Thoracaal aneurysma aorta (en Marfan)
Chronische aorta dissectie
Intramuraal hematoom
Penetrerend ulcus
Anatomie van pulmonaal arteriën en venen

Adapted from Pennell DJ et al<sup>7</sup>.

## Cardiale massa

Bij evaluatie van een cardiale massa dienen de volgende aspecten aan bod te komen: lokalisatie, weefsel karakteristieken en stagering.

***Een cardiale massa dient systematisch op de volgende aspecten onderzocht te worden:***

- specifieke locatie
- vorm
- beweeglijkheid
- samenstelling van structuur aan de hand van beeldkarakteristieken
  - vet
  - vocht
  - bloed(-afbraak) bestanddelen
  - perfusie
  - vergroete intersitiële ruimte

Naast echocardiografie leent CMR zich bij uitstek voor deze doeleinden. Door de hoge spatiële resolutie en mogelijkheid om in iedere gewenste richting afbeeldingen te maken, kan de relatie met omliggende structuren goed zichtbaar worden gemaakt. Daarnaast kan CMR gebruikt worden om een massa nader te karakteriseren.

### *Thrombus*

Een (LV) thrombus kan goed gevisualiseerd worden middels de SSFP sequenties en de LGE techniek (geen aankleuring).

### *Tumoren*

#### *T1-gewogen opnamen*

Een hoge signaal intensiteit op T1 gewogen opnamen kan passen bij vette tumoren (lipoom, liposarcoom), recente bloeding, cysteuze afwijking en melanoom. Een structuur met lage signaal intensiteit op T1 gewogen opnamen past ook bij cysteuze afwijkingen, signaal verlies in vasculaire malformaties, gecalcificeerde laesies of lucht.

#### *T2-gewogen opnamen*

Cysten hebben hoge signaalintensiteit. Vetsaturatie kan gebruikt worden om een massa die vet bevat, te detecteren.

### *Gadolinium*

First-pass perfusie kan gebruikt worden om rijk gevasculariseerde tumoren (hemangioom, angiosarcoom) te identificeren. Necrotische gebieden kleuren in een vroege fase na contrast toediening juist niet aan. Late aankleuring is vaak afwezig bij cysteuze afwijkingen en bij de meeste benigne tumoren.

**Karakteristieken van verschillende tumoren en massa's.**

<b>Massa</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>Gd</b>
Thrombus			geen
Myxoom	/		+ tot ++
Fibroom	/	/	rand aankleuring
Rhabdomyoom			geen tot +
Hemangioom			+++
Feochromocytoom			+++
Lymfoom			heterogeen
Maligne fibreus histiocytoom	heterogeen		++
Angiosarcoom	heterogeen	heterogeen	heterogeen tot +

Adapted from O'Donnell et al<sup>46</sup>.

## Veiligheid

Het gebruik van MRI is niet zonder veiligheidsrisico's. Met het toenemend gebruik van MRI is ook het aantal incidenten, waaronder zelfs enkele met dodelijke afloop, de laatste jaren toegenomen. Actuele informatie met betrekking tot veiligheid en MRI kan worden gevonden op de website MRIsafety.com.

Algemene contra-indicaties: claustrofobie (2-4% van de bevolking), ferromagnetische implantaten (geïmplanteerd gehoor apparaat) en aanwezigheid van een pacemaker/ICD. Een relatieve contra-indicatie is belangrijke aritmie (b.v. [snel] atrium fibrilleren).

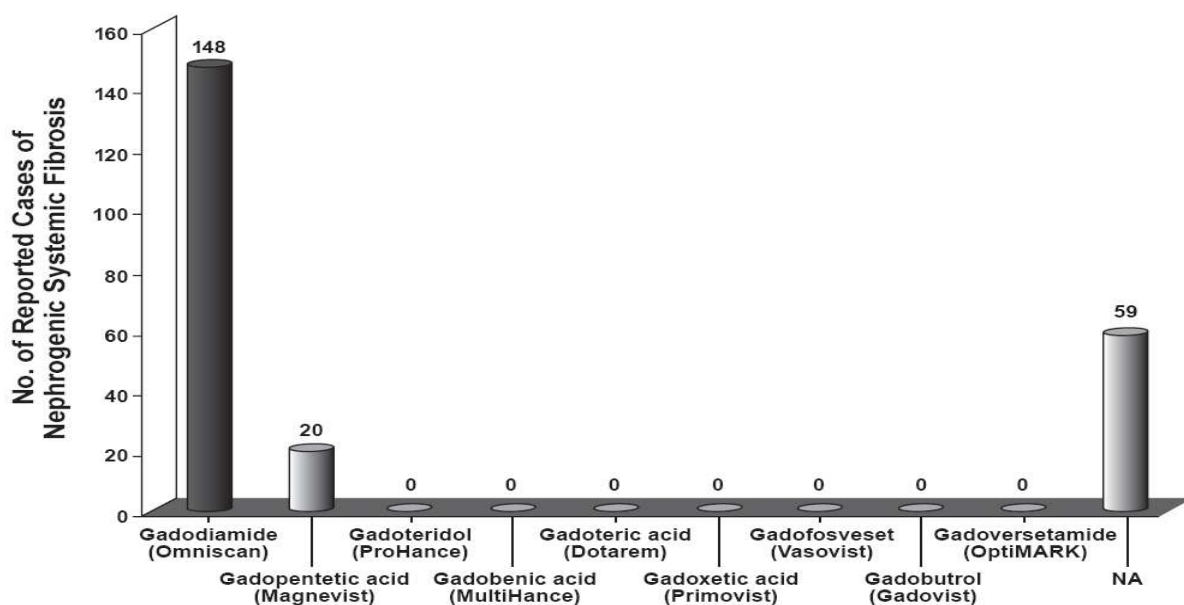
Geen contra-indicatie: sternumhechtingen, intracoronaire stents en bijna alle mechanische kunstkleppen (behoudens ball-in-cage).

### Contrastmiddelen

Het gebruik van Gadolinium bevattende contrastmiddelen is niet geheel onschuldig. Gadolinium-houdende contrast middelen zijn geassocieerd met het ontstaan van nefrogene systemische fibrose (NSF), met name bij patiënten met verminderde nierfunctie<sup>47-50</sup>.

Dit heeft er toe geleid dat de Food and Drug Administration (FDA) in 2008 een waarschuwing voor alle gadolinium-houdende contrast middelen heeft doen uitgaan. Indien de eGFR minder dan 30 mL/min/1.73m<sup>2</sup> bedraagt en de aanvrager samen met de specialist cardiale beeldvorming van mening zijn dat de informatie die bij het cardiale MRI onderzoek verkregen kan worden de zeer geringe risico's verbonden met de toediening van gadolinium rechtvaardigen, kan het onderzoek ook in deze patientengroep plaatsvinden. Echter, er dient dan wel voor een laag-risico contrastmiddel uit de klasse van de macrocyclische chelaten worden gekozen. Zie hiervoor de vigerende richtlijnen binnen de radiologie."

### Aantal voorvallen van NSF in relatie tot gebruikte Gd contrastmiddel.






Adapted from Shellock FG et al<sup>48</sup>.

### *Pacemakers/ICD's*

Als gevolg van nieuwe ontwikkelingen en verbreding van het indicatie-gebied, wordt een groeiend aantal hartpatiënten behandeld met implanteerbare elektronische systemen zoals pacemakers, interne cardiale defibrillatoren (ICD's) en loop recorders. De FDA heeft pacemakers en ICD's niet goedgekeurd voor gebruik in een MRI (omgeving). Dit standpunt wordt onderschreven door de verschillende fabrikanten van devices. In toenemende mate zal in de klinische praktijk echter de vraag opkomen, of een patiënt uitgerust met een elektronisch device, een (niet cardiale) MRI scan mag ondergaan.

### **Objecten en devices worden internationaal als volgt gelabeld voor gebruik in een MRI omgeving:**

	<b>MR SAFE:</b> object heeft geen bekende schadelijke effecten in alle MRI omgevingen
	<b>MR CONDITIONAL:</b> object heeft geen schadelijke effecten onder specifiek gedefinieerde condities die gelden voor zowel het gebruik van het object, alsook voor de MRI gerelateerde karakteristieken.
	<b>MR UNSAFE:</b> object is schadelijk onder alle MRI omstandigheden

### *Pacemakers*

Op dit moment is er slechts één pacemaker systeem *MR conditional*. Alle andere systemen zijn *MR unsafe*. Ondanks deze beperkingen zijn er de afgelopen jaren een groeiend aantal studies gepubliceerd die rapporteerden over de effecten en veiligheidsaspecten van MRI en geïmplanteerde (*MR unsafe*) devices<sup>51-54</sup>. Hierbij moet worden opgemerkt dat in geen van deze studies het hart het gescande object was. Specifieke informatie over de effecten van een cardiale scan op een elektronisch device zijn dan ook nauwelijks beschikbaar. Daarnaast zijn alle onderzoeken uitgevoerd op 1.5T scanners. Klinische informatie m.b.t. 3T scanners en devices is op dit moment niet beschikbaar.

In het algemeen kan gesteld worden dat pacemaker-afhankelijke patiënten een groter risico lopen dan pacemaker-onafhankelijke patiënten. Behalve onvoorspelbare interacties tussen MRI scanner en pacemaker, resulterend in pacemaker malfunctie, vormt het opwarmen van pacemaker leads met als gevolg (onvoorspelbaar) verlies van capture de grootste bedreiging voor deze patiënten.

Echter, na afweging van belangen en risico's en na aanpassing van pacemaker instellingen en met in achtname van het gebruik van bepaalde pulsesequenties (SAR << 2.0 W/kg) en gescand gebied, kan een patiënt met een pacemaker een MRI scan ondergaan.

## ***Aanbevolen veiligheidsmaatregelen voor scannen van een patiënt met pacemaker***

1. Bevestig dat een MRI scan klinisch noodzakelijk is en dat het voordeel opweegt tegen de (potentiële) risico's
2. Laat patiënt informed consent invullen
3. Scan alleen pacemaker-onafhankelijke patiënten
4. Reanimatie apparatuur en getraind personeel dient tijdens de scan bij de scanner aanwezig te zijn
5. Pacemaker technicus dient voor duur van het onderzoek in de nabijheid van de MRI scanner te zijn
6. Reprogrammeer de pacemaker voor de duur van de MRI scan: lead in bipolar mode; schakel minute ventilation feature uit
7. Verhoog de pacing output naar submaximaal. Indien de benodigde output al op submaximaal staat, voer de scan dan niet uit
8. Continue ECG monitoring
9. Puls-oximetrie monitoring
10. Reduceer SAR, bijvoorbeeld door verhoging van de repetitietijd of field-of-view en/of verlaag de flipangle of de acquisitie bandwijdte
11. Evalueer het functioneren van de pacemaker direct na de scan procedure en na 6-12 weken

### ***ICD***

ICD's zijn vooralsnog absoluut gecontraïndiceerd. Desondanks zijn er enkele zeer kleine studies gepubliceerd waarbij bij ICD patiënten een (niet-cardiale) MRI scan is uitgevoerd<sup>54-56</sup>. Meestal werd de therapie-mode voorafgaand aan de scan uitgezet. Het is echter niet uitgesloten dat onder invloed van de scan procedure de ICD een reset ondergaat waarbij de therapie-mode (afgeven van shocks) ongemerkt geactiveerd wordt. Het switchen van gradiënten kan door de ICD worden geïnterpreteerd als ventrikelfibrilleren zodat de kans op ongewenste therapie (shock) zeer nadrukkelijk aanwezig is. Daarnaast is gebleken dat de levensduur van de batterij onder invloed van een MRI scan sterk wordt bekort.

### *Medicatie*

Het gebruik van medicatie (dobutamine, adenosine, betablokker) rondom een CMR scan brengt (bekende) veiligheidsrisico's met zich mee. Een crashcar dient dan ook altijd aanwezig te zijn in de nabijheid van de MRI scanner.

### *Reanimatie procedure*

Duidelijke protocollen hoe te handelen bij calamiteiten dienen aanwezig te zijn. Gezien het permanent aanwezige sterke magnetische veld, kan een patiënt pas adequaat gereanimeerd worden wanneer het slachtoffer uit de scanruimte is gehaald. Het is ten strengste verboden met reanimatieapparatuur de scan ruimte binnen te gaan. Losse metalen voorwerpen kunnen in dodelijke projectielen veranderen. In tegenstelling tot te doen gebruikelijk, moet de patiënt dus eerst naar een geschikte ruimte met reanimatiefaciliteiten (b.v. de voorbereidingsruimte) gebracht worden alvorens de reanimatie kan starten. Minimaal 1x per jaar dient een reanimatie setting geoefend te worden met alle betrokkenen.

### *Verslaglegging*

***Bij de rapportage van CMR onderzoek dienen de volgende zaken vermeld te worden:***

Indicatie/vraagstelling

Scangegevens: gebruikte type scanner en pulsesequenties, ritme en hartfrequentie, nierfunctie, contrastprotocol en totale hoeveelheid toegediend contrast medium, technische problemen en complicaties.

Globale kwaliteit en beoordeelbaarheid van de scan, benoemen artefacten  
Anatomie van het hart inclusief dimensie en afmetingen, pericard en grote vaten, onderlinge connecties.

Kwalitatieve globale functie van het hart, wandbewegingsstoornissen, klepafwijkingen

Niet-cardiale bevindingen

Indien van toepassing kwantitatieve analyse: Linker- en rechter ventrikel volumina, ejection fractie. Bij klepafwijkingen gradiënten en regurgiterend volume  
Interpretatie

Conclusie van bevindingen, eventueel in combinatie met aanbeveling of advies betreffende vervolgonderzoek of behandeling.

### *Beschikbaarheid van uitslagen*

Uitslagen van spoedonderzoeken dienen binnen 24 uur beschikbaar te zijn, klinische onderzoeken binnen 3 dagen en poliklinisch onderzoek binnen 5 werkdagen.

### *Dataopslag*

De beelden dienen volgens de algemeen geaccepteerde standaarden en wettelijke regels gearhiveerd te worden. In de regel zal dit op een PACS systeem zijn dat valt onder de verantwoordelijkheid van de afdeling radiologie en ICT. Beelden dienen beschikbaar te blijven voor latere vergelijking.



## Referenties

1. Grothues F et al. Comparison of interstudy reproducibility of cardiovascular magnetic resonance with two-dimensional echocardiography in normal subjects and in patients with heart failure or left ventricular hypertrophy. *Am J Cardiol* 2002;90:29-34
2. Grothues F et al. Interstudy reproducibility of right ventricular volumes, function, and mass with cardiovascular magnetic resonance. *Am Heart J* 2004;147:218-223
3. Kim RJ et al. The use of contrast-enhanced magnetic resonance imaging to identify reversible myocardial dysfunction. *N Engl J Med* 2000;16:1445-1453
4. Marcu CB et al. Clinical applications of cardiovascular magnetic resonance imaging. *CMAJ* 2006;10:911-917
5. Hirsch R et al. Diagnosis in adolescents and adults with congenital heart disease. Prospective assessment of individual and combined roles of magnetic resonance imaging and transesophageal echocardiography. *Circulation* 1994;90:2937-2951
6. Fattori R and Nienaber CA. MRI of acute and chronic aortic pathology: pre-operative and postoperative evaluation. *J Magn Reson Imaging* 1999;10:741-750
7. Pennell DJ et al. Clinical indications for cardiovascular magnetic resonance (CMR): Consensus panel report. *Eur Heart J* 2004;25:1940-1965
8. Fraser A et al. The future of cardiovascular imaging and non-invasive diagnosis. A joint statement from the European association of echocardiography, the working groups on cardiovascular magnetic resonance, computers in cardiology, and nuclear cardiology, of the European society of cardiology, the European association of nuclear medicine, and the association for pediatric cardiology. *Eur Heart J* 2006;27:1750-1753
9. CCS/CAR/CANM/CNCS/CANSCMR joint position statement on advanced noninvasive cardiac imaging using positron emission tomography, magnetic resonance imaging and multidetector computed tomographic angiography in the diagnosis and evaluation of ischemic heart disease-executive summary. *Can J Cardiol* 2007;23;2:107-119
10. ACCF/ACR/SCCT/SCMR/ASNC/NASCI/SCAI/SIR 2006 appropriateness criteria for cardiac computed tomography and cardiac magnetic resonance imaging. *J Am Coll Card* 2006 48;7;1475-1497
11. Schwitter J, editor. CMR Update 2008. ISBN 978-3-033-01674-3 .
12. Bruder et al. EuroCMR (European Cardiovascular Magnetic Resonance) Registry. *J Am Coll Card* 2009;54:1457-1466
13. Karamitsos TD et al. Operator induced variability in left ventricular measurements with cardiovascular magnetic resonance is improved after training. *J Cardiovascular Magn Reson* 2007;9:777-783
14. Mahrholdt H et al. Reproducibility of chronic infarct size measurement by contrast-enhanced magnetic resonance imaging. *Circulation* 2002;106:2322-2327
15. Kilner PJ et al. Flow measurement by magnetic resonance: a unique asset worth optimising. *J Cardiovascular Magn Reson* 2007;9:723-728
16. Rickers C et al. Utility of cardiac magnetic resonance imaging in the diagnosis of hypertrophic cardiomyopathy. *Circulation* 2005;112:855-861
17. McCann GP et al. Extent of myocardial infarction and reverse remodeling assessed by cardiac magnetic resonance in patients with and without right bundle branch block following alcohol septal ablation for obstructive hypertrophic cardiomyopathy. *Am J Cardiol* 2007;99:563-567

18. McKenna WJ et al. Diagnosis of arrhythmogenic right ventricular dysplasia/cardiomyopathy. Task Force of the Working Group on Myocardial and Pericardial Disease of the European Society of Cardiology and the scientific Council on cardiomyopathies of the International Society and Federation of Cardiology. *Br Heart J* 1994;71:215-218
19. Sen-Chowdhry S et al. Cardiovascular magnetic resonance in arrhythmogenic right ventricular cardiomyopathy revisited: comparison with task force criteria and genotype. *J Am Coll Card* 2006;48:2132-2140
20. Marcus FI, et al. Diagnosis of arrhythmogenic right ventricular cardiomyopathy/dysplasia (ARVC/D): proposed modification of the task force criteria. *Eur Heart J* 2010;31:806-814
21. McCrohon JA et al. Differentiation of heart failure related to dilated cardiomyopathy and coronary artery disease using gadolinium-enhanced cardiovascular magnetic resonance. *Circulation* 2003;108:54-59
22. Vogelsberg H et al. Cardiovascular magnetic resonance in clinically suspected cardiac amyloidosis: non-invasive imaging compared to endomyocardial biopsy. *J Am Coll Cardiol* 2008;51:1022-1030
23. Mahrholdt H et al. Delayed enhancement cardiovascular magnetic resonance assessment of non-ischaemic cardiomyopathies. *Eur Heart J* 2005;26:1461-1474
24. Karamitsos TD et al. CMR in heart failure. *J Am Coll Cardiol* 2009;54:1407-1424
25. Friedrich MG et al. Cardiovascular magnetic resonance in myocarditis: A JACC White Paper. *J Am Coll Card* 2009; 17:1475-1487
26. Nandalur KR et al. Diagnostic performance of stress cardiac magnetic resonance imaging in the detection of coronary artery disease: a meta-analysis. *J Am Coll Card* 2007;50:1343-53
27. Schwitter J et al. MR-IMPACT: comparison of perfusion-cardiac magnetic resonance with single-photon emission computed tomography for the detection of coronary artery disease in a multicentre, multivendor, randomized trial. *Eur Heart J* 2008;29:480-489
28. Wahl A et al. Safety and feasibility of high-dose dobutamine-atropine stress cardiovascular magnetic resonance for diagnosis of myocardial ischaemia: experience in 1000 consecutive cases. *Eur Heart J* 2004;12:1230-1236
29. Kuijpers D et al. Dobutamine stress MRI. Part I. Safety and feasibility of dobutamine cardiovascular magnetic resonance in patients suspected of myocardial ischemia. *Eur Radiol* 2004 (10):1823-1828.
30. Paetsch I et al. Comparison of dobutamine stress magnetic resonance, adenosine stress magnetic resonance, and adenosine stress magnetic resonance perfusion. *Circulation* 2004;110:835-842
31. Kuijpers D et al. Dobutamine cardiovascular magnetic resonance for the detection of myocardial ischemia with the use of myocardial tagging. *Circulation* 2003 107:1592-1597
32. Kim RJ et al. The use of contrast-enhanced magnetic resonance imaging to identify reversible myocardial dysfunction. *N Engl J Med* 2000;343:1445-1453
33. Tomlinson DR et al. Assessment of myocardial viability: comparison of echocardiography versus cardiac magnetic resonance imaging in the current era. *Heart Lung Circ* 2008;17:173-185
34. Kaandorp TA et al. Cardiovascular MR to assess myocardial viability in chronic ischaemic LV dysfunction. *Heart* 2005;91:1359-1365
35. Marcotte F et al. Evaluation of adult congenital heart disease by cardiac magnetic resonance imaging. *Congenit Heart Dis* 2009;4:216-230
36. Simonetti OP and Cook S. Technical aspects of pediatric CMR. *J Cardiovasc Magn Reson* 2006;8:581-593

37. Babu-Narayan SV et al. Non-invasive imaging in adult congenital heart disease using cardiovascular magnetic resonance. *J Cardiovasc Med* 2007;8:23-29
38. Rienmüller R et al. CT and MR imaging of pericardial disease. *Radiol Clin North Am* 2004;42:587-601
39. Wang ZJ et al. CT and MR imaging of pericardial disease. *Radiographics* 2003;23:S167-180
40. Litmanovich D et al. CT and MRI in diseases of the aorta. *Am J Roentgenol* 2009;193:928-940
41. Nienaber CA et al. The diagnosis of thoracic aortic dissection by noninvasive imaging procedures. *N Engl J Med* 1993;328:1-9
42. Sommer T. et al. Aortic dissection: a comparative study of diagnosis with spiral CT, multiplanar transesophageal echocardiography, and MR imaging. *Radiology* 1996;199:347-352
43. Cesare ED et al. Comparative evaluation of TEE, conventional MRI and contrast-enhanced 3D breath-hold MRA in the post-operative follow-up of dissecting aneurysms. *Int J Card Imaging* 2000;16:135-147
44. Deutsch HJ et al. Chronic aortic dissection: comparison of MR Imaging and transesophageal echocardiography. *Radiology* 1994;192:645-650
45. Kawamoto et al. Thoracoabdominal aorta in Marfan syndrome: MR findings of progression of vasculopathy after surgical repair. *Radiology* 1997;203:727-732
46. O'Donnell DH et al. Cardiac Tumors: Optimal Cardiac MR Sequences and Spectrum of Imaging Appearances. *Am J Radiol* 2009;193:377-387
47. Broome DR et al. Gadodiamide-associated nephrogenic systemic fibrosis: why radiologists should be concerned. *Am J Roentgenol* 2007;188:586-592
48. Shellock FG and Spinazzi A. MRI safety update 2008: part 1, MRI contrast agents and nephrogenic systemic fibrosis. *Am J Roentgenol* 2008;191:1129-1139
49. Grobner T. Gadolinium--a specific trigger for the development of nephrogenic fibrosing dermopathy and nephrogenic systemic fibrosis? *Nephrol Dial Transplant* 2006;21:1104-1108
50. Grobner T and Prischl FC. Patient characteristics and risk factors for nephrogenic systemic fibrosis following gadolinium exposure. *Semin Dial* 2008;21:135-139
51. Martin ET et al. Magnetic resonance imaging and cardiac pacemaker safety at 1.5-Tesla. *J Am Coll Cardiol* 2004;43:1315-1324
52. Schmiedel A et al. Magnetic resonance imaging of the brain in patients with cardiac pacemakers. Experimental and clinical investigations at 1.5 Tesla. *Rofo* 2005;177:731-744
53. Sommer T, et al. Strategy for safe performance of extrathoracic magnetic resonance imaging at 1.5 Tesla in the presence of cardiac pacemakers in non-pacemaker-dependent patients: a prospective study with 115 examinations. *Circulation* 2006;114:1285-1292
54. Nazarian S et al. Clinical utility and safety of a protocol for noncardiac and cardiac magnetic resonance imaging of patients with permanent pacemakers and implantable-cardioverter defibrillators at 1.5 Tesla. *Circulation* 2006;114:1277-1284
55. Gimbel JR et al. Outcome of Magnetic Resonance Imaging (MRI) in Selected Patients with Implantable Cardioverter Defibrillators (ICDs). *Pacing Clin Electrophysiol* 2005;28;270-273
56. Naehle CP et al. Magnetic resonance imaging at 1.5-T in patients with implantable cardioverter-defibrillators. *J Am Coll Card* 2009;54:549-555

57. Kanal E et al. American College of Radiology White Paper on MR Safety. *Am J Roentgenol* 2002;178:1335-1347
58. Pohost GM et al. Task Force 12: Training in advanced cardiovascular imaging (Cardiovascular magnetic resonance [CMR]). *J Am Coll Card* 2006;47:910-914