

## Appendix 1. MR-fysikaliska aspekter

### A1. DET STATISKA MAGNETFÄLTET I MR ( $B_0$ och dB/dz)

Det starka magnetfält som skapats i magnetkameran är alltid närvarande och kallas  $B_0$ . Detta fält är som starkast i mitten av tunneln, i det som kallas isocentrum. Magnetfältet avtar gradvis från isocentrum till utkanterna av rummet (och sträcker sig även ibland utanför magnetkamera-rummet). Magnetfältet omkring magnetkameran kallas ofta för 'strömfältet' och det anger vilken fältstyrkan (egentligen tätheten på det magnetiska flödesfältet) är vid en viss punkt i rummet utanför magnetkameran.

Förändringen i strömfältets styrka brukar man beskriva med termen 'spatiell magnetfältsgradient' (alternativt 'rumslig magnetfältsgradient') och den betecknas med dB/dz, där z refererar till z-riktningen i magneten, dvs längs med magnettunneln. På engelska kallas detta mått ofta för '*spatial field gradient*' (SFG). SFG i en punkt är alltid detsamma, det ändras inte.

Patientsäkerhet i relation till  $B_0$  och dB/dz avser ofta relationen till ett specifikt implantat eller en särskild kringutrustning och dessa parametrar. Tillverkarnas specifikationer för säker användning av sådana medicintekniska produkter kallas för 'MR-villkor' (eller '*MR-conditions*' på engelska).

#### A1.1 Statiskt magnetfält ( $B_0$ )

Två fenomen som påverkar ferromagnetiska föremål i närheten av magnetkameran är dels förflyttning i riktning direkt mot isocentrum, dels en vridkraft som verkar på föremålet för att linjera det i magnetfältets riktning (genom tunneln). Dragkraften är som störst nära tunnelöppningen medan vridkraften är störst vid isocentrum. Exempelvis ett implantat som nyligen har placerats kan ha ett MR-villkor som anger att man inte bör undersöka patienten förrän efter exempelvis sex veckor. Avsikten är att man vill låta implantatet förankras i vävnaden innan man utsätter den för några vrid- eller dragkrafter.

Ett mycket vanligt missförstånd kring MR-säkerhet är att endast ferromagnetiska metaller är farliga i samband med MR-undersökningar. Det stämmer dock inte; alla metaller och andra elektriska ledare är potentiellt farliga för en patient (se avsnittet om RF-exponering) och icke-ferromagnetiska föremål kan utöver detta även påverkas för så kallade 'Lenz-krafter'.

Faradays lag om elektromagnetiska fält säger att ett magnetfält som ändras kommer att inducera en spänning och en med den förknippad ström i en elektrisk ledare. Ju snabbare förändringen sker, och ju starkare magnet, desto större kommer inducerad spänning och ström att vara. Lenz lag är en direkt konsekvens av detta och den innebär att en kraft uppstår i

föremålet som flyttas; en kraft som motverkar (eller 'stoppar') rörelsen. Lenz-kraften uppstår alltså oavsett om det ledande materialet är ferromagnetiskt eller ej.

Lenz-kraften är i regel trivial för små föremål (upp till någon cm) men kan vara betydande för större föremål. Men den här effekten beror alltså även på hur fort föremålet förflyttas i magnetfältet kring magneten, även små objekt (exempelvis hörselbensproteser) kan därför påverkas kraftigt om de förflyttas mycket hastigt i närheten av magneten.

### A1.1 Spatiell magnetfältsgradient ( $dB/dz$ eller 'SFG')

Utbredning och konsekvenser av den spatiella magnetfältsgradienten,  $dB/dz$ , är kanske inte helt intuitiv. Den är allra störst i tunnelöppningen och försumbar i mitten av magneten där magnetfältet är mycket homogent. Dragkraften på ett ferromagnetiskt objekt är alltså mindre vid isocentrum än vid tunnelöppningen eftersom kraften beror på förekomst av en hög  $dB/dz$ . Särskilt stor är  $dB/dz$ -gradienten i en 'munkformad' volym vid kanten av tunnelöppningen. Det är av just den anledningen som de mätningar av implantat som görs inför att MR-villkor för ett implantat formellt skall etableras av tillverkaren, utförs just i kanten av tunnelöppningen. Det innebär också att dragkraften från magnetkameran på ett ferromagnetiskt föremål är som allra störst i tunnelöppningen, vilket resulterar i det man ofta kallar för 'projektileffekten'.

Kartor över  $dB/dz$  finns i tillverkarnas tekniska dokumentation och sådana visar att  $dB/dz$ -värdena är betydligt mindre i den centrala delen av tunnelöppningen. Eftersom exempelvis aktiva implantat i patienten av naturliga skäl ofta är placerade i patientens centrala delar så kommer ett sådant implantat således att påverkas betydligt mindre av  $dB/dz$ , än om de vore placerade längre från mitten av patienten.

## A2. TIDSVARIERANDE GRADIENTMAGNETFÄLT ( $dB/dt$ )

### A2.1 Inducerade spänningar

Patienter med implanterade eller kvarlämnade ledare i anatomiskt eller funktionellt känsliga områden (exempelvis neurofysiologiska elektroder i hjärnan) är utsatta för en ökad risk för påverkan om snabba gradientintensiva sekvenser (exempelvis fMRI, diffusion, och perfusionsmätning) används i samband med bildtagningen. Av den anledningen kan det vara motiverat att begränsa hur snabbt gradienterna ändras (dvs det som kallas för  $dB/dt$ ).

### A2.2 Buller från gradienter

Den mest uppenbara påverkan av tidsvarierande gradienter är buller (eftersom en magnet i princip fungerar som en konventionell högtalare). Patienten måste därför förses med hörselskydd, lämpligen både öronproppar med tillräcklig bullerdämpning och även

hörselskydd, så effektiva som möjligt. Ljudnivåerna kan uppgå till väl över 100 dBA i isocentrum av magneten. Det är dock inte alltid självklart enkelt hur hörselskydden används, särskilt öronpropparna. Örat bör hållas upp samtidigt som en komprimerad öronpropp placeras i örat. Håll sedan kvar fingret en stund så att proppen får möjlighet att expandera på plats. Det är viktigt att kontrollera konventionella hörselskydds passform och funktion med viss regelbundenhet eftersom hörselskydden slits med tiden.

**Dämpningsvärde:** Dämpningsvärdet för ett hörselskydd kan anges på tre olika sätt. Dels kan ett värde för "dBA" anges, dvs ett sammanvägt värde vid några olika ljudfrekvenser (en så kallad 'A-filterprofil', därav beteckningen dBA). Typiska värden på god bullerdämpning för hörselskydd med kåpor är en dämpning av 30-35 dBA. Ibland kan dessa kåpor vara svåra att få plats med i en trång huvudspole och av den anledningen måste hörselskydd med lägre dämpningsvärde användas istället. Ibland kan man även se beteckningarna H, M eller L och dessa betyder dämpning i högfrekvent, mellanfrekvent eller lågfrekvent frekvensområde.

Ett annat sätt att ange dämpningsvärdet är APV som anger dämpningen i olika frekvensband.

Numera anges dock ofta dämpningsvärdet med ett förenklat mått som betecknas SNR och som ofta används för att beskriva dämpning av industribuller. Det är viktigt att hörselskydden är CE-märkta eftersom de då testats på ett jämförbart sätt. Se exempelvis <https://www.av.se/globalassets/filer/publikationer/broschyrer/buller-och-horselskydd-broschyr-adi344.pdf>

### A2.3 Perifer nervstimulering (PNS)

PNS upplevs som en 'vibrerande känsla' som är fokuserad till ett litet område i kroppen och beror på att det förekommer snabbt varierande gradienter som exciterar nerver. Observera att gradienterna är starkast längre ifrån isocentrum, än precis i isocentrum, varför det ofta är perifera nervbanor i extremiteterna som påverkas mest av PNS -- till och med om de hamnat utanför field-of-view (FOV).

Hur kraftig effekten upplevs beror på magnituden på dB/dt, den tid som dB/dt appliceras och det inträffar särskilt för gradienter i y-riktningen även om max dB/dt, dvs vektorsumman av gradienterna i x, y och z, också har stor betydelse. Ju längre exponeringstid och ju kraftigare exponeringen är desto större sannolikhet således för att PNS skall inträffa.

PNS är inte skadlig och mycket sällan outhärdlig, bara märkbar för en del patienter och då endast i vissa situationer, dvs i samband med vissa pulssekvenser (såsom EPI, SSFP, DWI, etc). Oavsett så är det ändå önskvärt att försöka undvika att PNS uppstår för att göra patientupplevelsen så bra som möjligt. Man brukar kunna begränsa dB/dt till 'Normal Mode'

(80% av gränsen för en medelpopulation av patienter), alternativt 'First level' (= gränsen för medelpopulationen), på samma sätt som för RF-exponeringen (se nedan).

### A3. TIDSVARIERANDE RADIOFREKVENTA MAGNETFÄLT (RF)

Självsvängande elektromagnetiska fält (dvs 'RF'): För att undvika patientskador som kan uppkomma i samband med exponering för oscillerande (dvs svängande) eller 'radiofrekventa elektromagnetiska fält' (oftast benämnt 'RF-exponering' i texten nedan) som sker i samband med bildtagningen, så skall allt elektriskt ledande material som inte ovillkorligen används för undersökningen, plockas bort från patienten. Det räcker alltså inte att enbart koppla ifrån utrustningen (exempelvis oanvända ytpolar och EKG-ledare) utan föremålen måste även tas bort från magneten. Utöver det så bör man rutinemässigt kontrollera att spolar, övervakningssystem inte förefaller vara skadade eftersom även en sådan skada skulle kunna leda till brännskador på patienten.

#### A3.1 Överväganden kring uppvärmning av patient

**Diffus uppvärmning (SAR) och specifik energidos (SED):** Den dosimetriska termen som används för att uppskatta upptaget av RF-energi i vävnad i samband med MR-undersökning kallas för SAR (*Specific Absorption Rate*), som uttrycks i enheten watt per kilogram [W/kg]. Det finns några olika sätt att rapportera SAR på magnetkameran men i regel avses ett medelvärde över hela kroppen. Observera att SAR är ett dynamiskt mått som avser energiabsorptions hastighet och inte en summerad mängd energi (och alltså inte en 'dos', utan ett effektmått). Ett mera allmängiltigt mått är den så kallade  $B1_{rms}$  som är ett bättre mått än SAR, men för närvarande anges det inte så ofta för olika implantat.

'Specifik energidos' (SED, *Specific Energy Dose*) är ett relaterat mått som är användbart ibland och det anger den energimängd som upptas av patienten, räknat per kg kroppsvikt. SED beräknas som  $SAR \cdot tid$ , för en given pulssekvens och enheten är således [J/kg], Joule/kg). Vissa magnetkameror rapporterar inte enbart SAR utan även SED för att minska risken för obekväma uppvärmning som kan ske i samband med långa eller SAR-intensiva MR-sekvenser, exempelvis helryggsundersökningar.

Det som beskrivs ovan innebär en generell uppvärmning av patienten, vilket kan vara obehagligt för patienten men det är inte farligt, förutsatt att uppvärmningen inte är kraftig och sker under lång tid. Ett annat RF-relaterat fenomen är fokal uppvärmning ('hot spots') som i vissa situationer kan ge upphov till allvarliga brännskador. Sådana kan uppstå även om magnetkameran fungerar normalt och särskilda försiktighetsåtgärder måste därför tas rutinemässigt för att förebygga dem.

En rad hälsotillstånd kan försämra patienten förmåga att hantera uppvärmningen. Exempel är feber, fetma och vissa läkemedel som påverkar kroppen förmåga till värmereglering. IEC feber EN 60601-2-33 anger att en patient med högre kroppstemperatur än 39,5 C inte får scannas och om kroppstemperaturen är över 39,0 C så får skanning endast ske i *Normal Operating SAR Mode* (dvs max 2.0 W/kg, helkropp).

Olika magnetkameror hanterar SAR och SED-varningar på lite olika sätt och det är nödvändigt att MR-personalen är insatt i hur detta hanteras för en given magnetkamera. Eftersom uppvärmning på grund av RF-exponering är en dynamisk process så är det möjligt att lägga in kortare eller längre avkylningsperioder i bildinsamlingsprotokollet för att minska värmen i patienten, om SED-värdena är höga för en given undersökning.

**Brännskador:** I samband med en MR-undersökning så kan de elektriska spänningar och strömmar som genom RF-exponeringen induceras i elektriskt ledande material, inklusive kroppsvävnad, resultera i uppvärmning genom resistiva förluster. Sådan värmealstring kan vara så kraftig att den orsakar skada på vävnad, dvs brännskada. Olika implantatmaterial men även kroppsvävnad kan samverka och ge upphov till en sluten strömkrets (eller strömloop) i kroppen. Ju större diameter strömkretsen har, desto högre spänning och ström kan alstras vilket kan resultera i en brännskada i någon punkt längs ström-kretsen.

Det är nödvändigt att se till att patientens kroppsdelar inte i onödan bidrar till att det bildas en sådan ström-loop och av den anledningen så måste man bland annat se till att hudkontakt punkter inte bildas (exempelvis mellan låren, och/eller mellan hand och lår), i de områden som utsätts för RF-exponering. Ett tunt tyg såsom ett örngott är inte tillräckligt för att isolera utan avståndet bör vara något större i storleksordning 1 cm, använd därför lämpligen de kuddar som följer med magnetkameran. Av samma anledning får patienten inte vidröra tunnelväggen, i synnerhet i de områden där det elektriska fältet från den i magneten inbyggda RF-spolen ('kroppsspolen' eller QBC) är som starkast. Dessa områden är i regel vid ändarna av den i magneten inbyggda QBC som det starkaste elektriska fältet genereras och som kan ge upphov till brännskador. Det rekommenderas därför att hålla ett avstånd på minst ca 1 cm från tunnelväggen.

Ibland kan det vara nödvändigt att placera elektriskt ledande material i magnetkameran, i närheten av en patient (ledare, utrustning, osv). För sådant måste MR-villkoren från tillverkaren av den medicintekniska produkten följas.

**Uppvärmning genom 'resonans':** Elektriskt ledande föremål, såsom ledare, kan i vissa fall leda till att föremålet, liksom en mottagarantenn för radiovågor, absorberar energi från RF-fältet. Fenomenet att elektriskt ledande implantat tycks verka som en antenn kallas följaktligen 'antenn-effekten'. I objektet fokuseras denna energi i vissa punkter längs föremålet, särskilt i

ändarna av tunna oisolerade ledare. Man säger då att 'resonans' uppstår, på grund av just den här antenneffekten. Storleken av effekten beror på kombinationen av ett flertal olika faktorer exempelvis ledarens längd, diameter, tjocklek på isolering, 'cappning' av ändarna, placering i kroppen, orientering, den omgivande vävnadens elektriska egenskaper (exempelvis om det är fettvävnad, muskel eller luft), samt vilken frekvens (eller korresponderande våglängd) som RF-exponeringen har.

Antenneffekten kan leda till en avsevärd temperaturökning på över 90° C, men även betydligt lägre temperaturökningar kan vara problematiska, beroende på vilken vävnad som påverkas och hur temperaturkänslig den är. En kliniskt signifikant och allvarlig brännskada kan då uppstå på bara några sekunder i dessa punkter.

Ibland används särskilt långa ledare exempelvis Swan-Ganz eller Foley samt aktiva implantat som pacemaker, ICD, neurostimulatorer och cochleaimplantat. För dessa bör man särskilt överväga de risker som finns i synnerhet om kroppsspolen används, vid höga fältstyrkor (eftersom RF-frekvensen beror på om det är en 1,5T, 3T eller 7T magnet) och snabba RF-intensiva pulssekvenser som innebär hög RF-belastning på patienten. I många fall kan det vara nödvändigt att det görs en individuell risk-nytta analys. Behöver undersökningstiden kortas, kan man minska RF-exponeringen osv? Ledare som är längre än ungefär 5-10 cm, och som exponeras för RF, riskerar att värmas upp beroende på placering, orientering vävnadssammansättning etc.

Det kan i vissa fall vara så att resonans inte uppstår vid 1,5T medan den istället är kliniskt signifikant vid 3T. Det omvända förhållandet kan också uppstå, dvs starkast effekt vid 1,5T men obetydlig sådan vid 3T. Anledningen är att en 'antenn' genom sin längd alltid är avstämd till vissa specifika våglängder (och motsvarande frekvenser), vilka är längre i luft än i vävnad eftersom denna innehåller elektrolyter i olika koncentrationer. Resonansvåglängden (i regel maximal vid halva våglängden) är ungefär 26 cm vid 1,5T och ungefär 13 cm vid 3,0T även om dessa värden inte är exakta utan resonansvåglängden varierar väldigt mycket beroende på bland annat vilken vävnad som exponeras. Det är av den anledningen viktigt att alltid följa tillverkarens angivna MR-villkor för en medicinteknisk produkt, alternativt göra en strukturerad risk-nyttabedömning om MR-villkor saknas, eller av något annat skäl, för att minska risken för att brännskada skall uppstå. Man skall aldrig nöja sig med att tänka att brännskador händer ibland utan istället försöka hindra att de uppstår.

När någon del av ett elektriskt ledande material behöver placeras i anslutning till patienten och om det av någon anledning behöver vara inom volymen där RF-exponering sker (exempelvis inom QBC), så måste ledaren separeras så mycket som möjligt från patienten, med kuddar eller liknande för att undvika att brännskador uppkommer. Det är också lämpligt att placera ledare så långt som möjligt från tunnelväggarna i magnetkameran, särskilt inom det

område som ligger inom QBC (oftast ca 50-70 cm lång, i den centrala delen av magneten, kring isocentrum). I vissa speciella situationer kan det vara påkallat att använda kalla kompresser eller is för att undvika skadlig uppvärmning och en bedömning får göras från fall till fall. Det är värt att notera att även om RF-exponeringen dramatiskt avtar utanför den geometriska begränsningen av en sändande MR-spole (exempelvis en T/R-huvudspole eller QBC) så påverkas detta av patienten och RF-exponering sker därför även i viss utsträckning utanför spolen geometriska begränsning.

### A3.2 Om RF-uppvärmning, särskilda hänsyn

**Medvetlös patient.** Särskilda hänsyn bör tas till dessa.

**Elektriskt ledande kläder och smycken.** En del textila material som används i vissa typer av kläder innebär en ökad risk för brännskada då de innehåller elektriskt ledande material. Det är något som kanske inte alltid framgår enbart av utseendet. Smycken och liknande är ofta tillverkade av metall, ibland även magnetisk sådan, och de måste därför tas bort inför en MR-undersökning. Av den anledningen är det nödvändigt att patienterna byter om (med undantag för underkläder, om inte innehåller metall) till patientkläder av naturmaterial, såsom bomull. Samt tar av alla smycken och kosmetika inför en undersökning.

**Hudklammer/clips eller flera implantat i närheten av varandra.** Även om uppvärmningsrisken med små implantat, metallclips eller metallsuturer i allmänhet är mycket liten så ökar risken något om det är flera sådana implantat i närheten av, eller i direkt kontakt med varandra, i ett kluster. Patienten bör, liksom alltid, uppmanas att direkt larma om de känner något oväntat. Eventuellt kan en kall kompress hjälpa till för att förebygga uppvärmning.

Om flera implantat är placerade i närheten av varandra så ökar risken för brännskada. Ett exempel kan vara teleskoperade stentar, eller helt olika typer av implantat, som ligger intill varandra. Analys av en sådan situation bör göras genom en individuell risk-nytta-analys.

**Patienter med tatueringar.** Färger som används i tatueringar är inte kontrollerade eller dokumenterade medicintekniska produkter och även om det inte tycks vara väldigt vanligt så innehåller en del färgämnen elektriskt ledande komponenter. Det innebär väsentligen att det tatuerade området kan värmas upp och ge en brännskada. Särskilt om det aktuella området exponeras för RF och om RF-intensiva sekvenser används för insamling av bilder. För närvarande tycks det ej vara möjligt att ta reda på vilka pigment som används och det går därför inte heller att förutsäga i vilken utsträckning de potentiellt är problematiska.